



INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Zakład Systemów Radiowych (Z-1)

Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej (Z-21)

Radiowe systemy trzeciej i następnych generacji

Praca nr: 01300016, 21300086

Warszawa - Wrocław, grudzień 2006

Tytuł pracy: **Radiowe systemy trzeciej i następnych generacji**

Numer pracy: 01300016, 21300086

Zlecniodawca: Praca statutowa

Słowa kluczowe: cyfrowy system radiokomunikacji ruchomej; PMR; PAMR; TETRA; TEDS; standaryzacja; WLAN; Wi-Fi; sieć kratowa; UWB; systemy radiokomunikacyjne; widmo częstotliwości radiowych; 3G; 4G

Kierownik pracy: mgr inż. Aleksander Orłowski

Wykonawcy pracy: mgr inż. Aleksander Orłowski (Z-1) – rozdz. 1, 2
dr inż. Maciej Grzybowski (Z-21) – rozdz. 3
inż. Krzysztof Kaczan (Z-1) – rozdz. 2
mgr inż. Rafał Pawlak (Z-1) – rozdz. 1
mgr inż. Przemysław Socha (Z-1) – rozdz. 2
mgr inż. Elżbieta Tomaszuk (Z-1) – rozdz. 1, 2

Praca wykonana w Zakładzie Systemów Radiowych (Z-1) oraz w Zakładzie Kompatybilności Elektromagnetycznej (Z-21) Instytutu Łączności

Kierownik Zakładu systemów Radiowych (Z-1): mgr inż. Aleksander Orłowski

Kierownik Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej (Z-21): dr inż. Janusz Sobolewski

Niniejsze opracowanie może być powielane i publikowane wyłącznie w całości.
Powielanie i publikowanie fragmentów wymaga uzyskaniu zgody Instytutu Łączności.

Spis treści

Wstęp

Rozdział 1

- Prace na rzecz specyfikacji szerokopasmowego, globalnego standardu radiokomunikacji ruchomej dla potrzeb publicznych służb bezpieczeństwa i ratownictwa

Rozdział 2

- Badania szerokopasmowych, radiowych systemów telekomunikacyjnych trzeciej i kolejnych generacji dotyczące użycia nowych systemów szybkiej transmisji danych
 - 2.1. Radiowe sieci lokalne o strukturze kratowej
 - 2.2. Badania sieci kratowej
 - 2.3. Techniki UWB

Rozdział 3

- Wymagania widmowe i aspekty kompatybilności elektromagnetycznej systemów radiokomunikacyjnych następnych generacji

Załączniki

- M. J. Grzybowski. "Zasoby widmowe systemów IMT-2000 – Rzeczywistość i strategia rozwoju". KKRRiT. Poznań. 2006.
- K. Kaczan. A. Orłowski. "Radiowe sieci lokalne WLAN (Wi-Fi) – projektowanie, optymalizacja, testowanie". Seminarium Instytutu Łączności. 25.10.2006 r.
- A. Orłowski. "Standard TETRA – stan aktualny i kierunki rozwoju". II spotkanie Forum TETRA – Polska. Warszawa. Instytut Łączności. 28.11.2006 r.

Wstęp

Niniejszy dokument jest wynikiem pracy zbiorowej wykonanej w Zakładzie Systemów Radiowych (Z-1) oraz Zakładzie Kompatybilności Elektromagnetycznej (Z-21) Instytutu Łączności w ramach działalności statutowej. Celem pracy było przygotowanie opracowania przedstawiającego wybrane zagadnienia rozwoju systemów radiokomunikacyjnych następnych generacji (NGN).

W przyjętych założeniach pracy sformułowano trzy zadania:

- Zadanie 1 pt. "Prace na rzecz specyfikacji szerokopasmowego, globalnego standardu radiokomunikacji ruchomej dla potrzeb publicznych służb bezpieczeństwa i ratownictwa".

Zadanie wykonane w Z-1, polegało na śledzeniu rozwoju systemów radiokomunikacji ruchomej przeznaczonych do zastosowań specjalnych, ze szczególnym uwzględnieniem prac ETSI dotyczących rozwoju standardu TETRA (*TETRA Release 2*).

Przedstawiono opinie użytkowników radiowych sieci dyspozytorskich odnośnie aktualnego zapotrzebowania na transmisję danych. Omówiono rozwój standardu systemu TETRA polegający na wprowadzeniu opcji *TETRA Enhanced Data Service* (TEDS). Opisano tę nową technikę: przepływność kanału danych, rodzaje modulacji, szerokość pasma kanału radiowego i związane z tym właściwości systemu. Zwrócono uwagę na istotne zmiany zasięgu w stosunku do wersji konwencjonalnej.

Wyniki tej części pracy przedstawiono w rodz. 1.

- Zadanie 2 pt. "Badania szerokopasmowych, radiowych systemów telekomunikacyjnych trzeciej i kolejnych generacji dotyczące użycia nowych systemów szybkiej transmisji danych".

Zadanie wykonane w Z-1, składa się z kilku tematów dotyczących śledzenia rozwoju radiowych sieci lokalnych (WLAN) i radiowych sieci osobistego otoczenia (WPAN), w tym zagadnień: budowy sieci o strukturze kratowej oraz ruchomych sieci ad-hoc, rozpoznania tematyki radiowych systemów ultraszerokopasmowych (*Ultra Wide Band, UWB*).

W ramach Zadania 2:

- przedstawiono podstawowe problemy dotyczące realizacji radiowych sieci lokalnych o strukturze kratowej;
- opisano założenia projektu, realizację i wyniki testów radiowej sieci lokalnej o strukturze kratowej z łączami składającymi się z kilku prześel przeprowadzonych w pomieszczeniach w budynku głównym IŁ;
- analizowano rozwój technik radiowej transmisji ultra szerokopasmowych (ultra-wideband radio, UWB radio). Przedstawiono kwestie dotyczące koniecznych regulacji związanych z wykorzystaniem dla potrzeb UWB zakresów częstotliwości przydzielonych służbom radiokomunikacyjnym. Omówiono zastosowania tych technik dla potrzeb szerokopasmowych łącz radiowych bliskiego zasięgu i w wielu dziedzinach gospodarki.

Wyniki tej części pracy przedstawiono w rodz. 2.

- Zadanie 3 pt. "Wymagania widmowe i aspekty kompatybilności elektromagnetycznej systemów radiokomunikacyjnych następnych generacji".

Zadanie wykonane w Z-21, dotyczyło rozpoznania kierunków rozwoju systemów radiokomunikacyjnych w celu określenie ich wymagań widmowych i kompatybilnościowych, których celem jest zharmonizowane wykorzystanie widma częstotliwości radiowych z odniesieniem do stanu zagospodarowania widma w Polsce.

Omówiono prognozy rozwoju systemów komórkowych trzeciej i następnych generacji oraz szczegółowo plany organizacji międzynarodowych dotyczące rezerwacji zasobów widmowych dla tych systemów, z odniesieniem do aktualnego stanu zagospodarowania widma w Polsce. Zwrócono uwagę na zagadnienia kompatybilnościowe, dotyczące wprowadzania następnych generacji systemów radiokomunikacyjnych.

Wyniki tej części pracy przedstawiono w rodz. 3.

Oprócz wyżej omówionych trzech podstawowych części dokumentu zatytułowanego "Radiowe systemy trzeciej i następnych generacji" w związku z wykonaniem pracy przygotowano:

- referat: M. J. Grzybkowski. "Zasoby widmowe systemów IMT-2000 – Rzeczywistość i strategia rozwoju", prezentowany na sesji plenarnej KKRRiT 2006 w Poznaniu;
- seminarium IŁ 25.10.2006 r. K. Kaczan. A. Orłowski. "Radiowe sieci lokalne WLAN (Wi-Fi) – projektowanie, optymalizacja, testowanie".
- prezentację w ramach II spotkania Forum TETRA – Polska, 28.11.2006 r. A. Orłowski. "Standard TETRA – stan aktualny i kierunki rozwoju";

Dokumenty te stanowią załączniki do niniejszego opracowania.

Zakład Systemów Radiowych (Z-1)

Rozdział 1

Prace na rzecz specyfikacji szerokopasmowego, globalnego
standardu radiokomunikacji ruchomej
dla potrzeb publicznych służb bezpieczeństwa i ratownictwa

Praca nr 01300016

Warszawa 2006

Spis treści rozdz. 1

Zadanie 1	3
1.0. Wstęp.....	3
1.1. Potrzeby w zakresie transmisji danych.....	4
1.3. TEDS	5
1.3.1. Interfejs radiowy.....	6
1.3.2. Warstwa fizyczna	8
1.3.3. Kanały QAM	11
1.3.4. Wymagania częstotliwościowe dla wprowadzenia TEDS	12
1.3.5. Inne interfejsy TEDS.....	12
1.3.6. Usługi TEDS	14
1.3.7. Rekonfiguracja urządzeń w związku z wprowadzeniem TEDS	15
1.3.8. Zasięg użyteczny TEDS	16
1.4. Podsumowanie.....	19
Wykaz akronimów użytych w rozdz. 1	19
Bibliografia do rozdz. 1	20

Zadanie 1

Prace na rzecz specyfikacji szerokopasmowego, globalnego standardu radiokomunikacji ruchomej dla potrzeb publicznych służb bezpieczeństwa i ratownictwa

1.0. Wstęp

Radiowe systemy dyspozytorskie, określane jako systemy PMR lub PAMR, są wykorzystywane przede wszystkim przez:

- służby bezpieczeństwa i ratownictwa, nazywane służbami "niebieskich świateł" (*blue lights services*), takie jak policja, straż pożarna, pogotowie ratunkowe;
- służby komunalne, np. odpowiedzialne za dostarczanie energii elektrycznej, gazu i wody oraz za kanalizację;
- transport publiczny, w tym koleje i komunikację miejską.

Z tego względu rodzaj i jakość usług uzyskiwanych w systemach PMR / PAMR ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i jakość życia obywateli.

Obecnie najbardziej popularnym, cyfrowym systemem PMR / PAMR jest system TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*), opracowany przez Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych (ETSI). TETRA jest wąskopasmowym, cyfrowym systemem radiowym z wielodostępem TDMA (*Time Division Multiple Access*), który w jednym kanale radiowym o szerokości 25 kHz umożliwia utworzenie czterech niezależnych kanałów fizycznych.

Jeden kanał fizyczny każdej stacji bazowej – zawsze pierwsza szczelina na jednej z fal nośnych stacji, jest zarezerwowany dla potrzeb sterowania systemem (*Broadcast Control Channel, BCCH*). Informacje z tego kanału są używane do przekazywania informacji koniecznych do synchronizacji stacji ruchomych ze stacją bazową, rozgłaszania informacji sieciowych i zarządzania połączeniami. Pozostałe szczeliny w sygnale radiowym stacji bazowej TETRA mogą być wykorzystywane jako kanały ruchowe (*Traffic Channel, TCH*) przeznaczone do cyfrowej transmisji głosu lub transmisji danych (TETRA V+D).

Szybkość transmisji danych w pojedynczej szczelinie czasowej (netto), zależy od zastosowanego nadmiarowego zabezpieczenia kodowego, i wynosi odpowiednio:

- 7,2 kbit/s (TCH/7.2) – przy najsłabszym zabezpieczeniu,
- 4,8 kbit/s (TCH/4.8),
- 2,4 kbit/s (TCH/2.4) – przy najsilniejszym zabezpieczeniu.

Kodowanie umożliwiające korekcję błędów zmniejsza szybkość transmisji do 2,4 kbit/s (netto) na szczelinę. Szybkość ta pozwala wykorzystywać usługi takie jak WAP i przesyłanie wiadomości tekstowych, w tym e-mail. Przesyłanie obrazów (fotografie, szkice, kopie dokumentów, odciski palców) jest możliwe przy zastosowaniu odpowiedniej techniki kompresji obrazu (np. JPEG). Dla innych zastosowań multimedialnych, a nawet do transmisji grafiki o większej rozdzielczości (np. fragmentu mapy), transmisja pliku przez kanał TETRA V+D trwa zbyt długo.

Teoretycznie większe szybkości transmisji danych w systemie TETRA V+D można uzyskać przydzielając do komunikacji z jednym terminalem ruchowym więcej szczelin czasowych. Przy zastosowaniu kodowania korekcyjnego w czterech szczelinach można w ten sposób uzyskać szybkość do 9,6 kbit/s. Dostęp do transmisji danych z większą szybkością

w szczelinach wielokrotnych stworzyłby warunki do rozwoju aplikacji, takich jak transmisja grafiki, obrazów o większej rozdzielczości.

Zasięg transmisji danych w jednej lub wielu szczelinach jest praktycznie taki sam jak dla transmisji głosu. Jednak, jeżeli te same szczeliny są dynamicznie przydzielane dla transmisji głosu i danych, tzw. "ranking" z priorytetem dla głosu, to jak wskazują doświadczenia QoS dla tak zorganizowanej transmisji danych w wielu szczelinach znacznie się zmniejsza. Ponadto transmisja (nadawanie) w wielu szczelinach zwiększa pobór mocy przez terminale sieci, co w przypadku zasilanych z baterii urządzeń noszonych jest parametrem krytycznym. Z tych względów w aktualnych ofertach firm dostarczających wyposażenie sieci TETRA nie promuje się transmisji w trybie V+D w wielu szczelinach.

Ze względu na tradycję i małą przepływność kanału danych systemu TETRA w praktyce we współczesnych sieciach PMR / PAMR dominującym składnikiem ruchu są grupowe połączenia głosowe, wykorzystuje się również przesyłanie wiadomości danych (*Short Data Service, SDS*) w kanale sterującym. Transmisja danych pakietowych stanowi niewielki procent generowanego ruchu.

Należy tu zauważyć, że wymagania służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i ratownictwo różnią się od wymagań "zwykłych" użytkowników sieci PMR / PAMR. Funkcjonariusze służb potrzebują łączności w sytuacjach nadzwyczajnych i w każdym miejscu, gdzie może zdarzyć się wypadek, także wtedy gdy sieci publiczne są zablokowane, albo przestały pracować z powodu wielogodzinnej awarii sieci energetycznej lub uszkodzenia istotnych elementów ich infrastruktury. Pokrycie terenu i pojemność sieci PMR dla służb powinny być planowane z zapasem, aby natłok nie powodował blokowania, z zastosowaniem środków takich jak wydłużony czas zasilania rezerwowego z baterii lub lokalnego zespołu prądotwórczego i autonomiczna praca stacji bazowych. Dostęp do komunikacji głosowej lub danych powinien następować szybko, bo w warunkach operacyjnych oczekiwanie na zestawienie połączenia jest niedopuszczalne. Kolejnym argumentem jest konieczność zapewnienia bezpieczeństwa informacji przed nieautoryzowanym dostępem. W tego rodzaju zastosowaniach wymaga się większego stopnia zabezpieczenia informacji – oprócz szyfrowania informacji przesyłanej drogą radiową powinno być możliwe szyfrowanie "end to end".

1.1. Potrzeby w zakresie transmisji danych

Rozwój aplikacji wspomagania dowodzenia, usprawniających pracę służb bezpieczeństwa i ratownictwa jest nierozdzielnie związany z koniecznością przesyłania różnych danych, także w komunikacji z przemieszczającymi się załogami. Wymagania "służb" w zakresie transmisji danych w sieci ruchomej mogą mieć związek z potrzebą szybkiego uzyskiwania i przekazywania aktualnych informacji, takich jak np.:

- lokalizacja pojazdów (AVL) i/lub osób (APL);
- przesyłanie fotografii osób i obiektów lub innych nieruchomych obrazów;
- natychmiastowe przesłanie instrukcji, planów budynków i map;
- pobieranie z baz danych informacji o osobach i pojazdach;
- pobieranie z baz danych informacji o substancjach niebezpiecznych;
- monitorowanie rytmu serca, temperatury itd. osób wykonujących bardzo ryzykowne zadania, albo pacjentów w czasie transportu do szpitala;
- przesyłanie obrazów z miejsca wypadku, aby lekarze mogli przewidzieć rodzaj obrażeń i zawniosować niezbędne środki;

- monitorowanie za pomocą kamer wideo prac związanych z dużym ryzykiem (usuwanie podejrzanych przedmiotów);
- CCTV, monitorowanie za pomocą kamer zagrożonych obszarów (prewencja);
- dane z urządzeń telemetrycznych;
- zdalne sterowanie urządzeniami ostrzegającymi.

W związku z tego rodzaju oczekiwaniami użytkowników sieci PMR / PAMR do programu prac rozwojowych prowadzonych przez ETSI w ramach projektu TETRA wprowadzono opracowanie systemu umożliwiającego uzyskanie większych szybkości transmisji danych niż oferowane w systemie TETRA V+D.

Przewidywane aplikacje szybkiej transmisji danych (*High Speed Data Service, HSD*) i szybkości transmisji danych wymagane dla obsługi tych aplikacji wg wyników analizy opublikowanych w raporcie ETSI TR 102 491 v.1.2.1 [1] przedstawiono w tab. 1.1. W rzeczywistych sieciach będą występować kombinacje usług i aplikacji wymienionych w tej tablicy, a wymagana pojemność będzie różnić się w zależności od charakteru użytkowników.

Z tab. 1.1 wynika, że dla większości aplikacji sieci PMR / PAMR polegających na transmisji danych wystarcza szybkość transmisji netto do 80 kbit/s. Być może inne aplikacje nie ujęte w tej tablicy wymagają większych szybkości. Jednocześnie należy zauważyć, że dla wielu z wymienionych aplikacji faktycznie wystarczają szybkości uzyskiwane obecnie w systemie TETRA V+D (pojedyncze kbit/s). Trzeba też podkreślić, że potrzeby różnych użytkowników są różne i szybkości dla poszczególnych pożądanych aplikacji należy analizować indywidualnie.

Informacje zebrane w tab. 1.1 wskazują również, że wprowadzenie usług szybkiego przesyłania danych (HSD) nie spowoduje zmniejszenia ruchu głosowego w sieciach PMR / PAMR, z tego względu wprowadzanie HSD do tych sieci spowoduje zapotrzebowanie na dodatkową pojemność konieczną dla obsługi aplikacji niegłosowych, zależną od rodzaju tych aplikacji, wielkości ruchu i wymaganych wskaźników QoS. Dotychczasowe doświadczenia dowodzą, że wymagania użytkowników odnośnie wielkości ruchu i QoS są zróżnicowane. Z tych względów zaprojektowane rozwiązania powinny być efektywnie dopasowane do potrzeb i dostępnego pasma.

Zatem wdrożenie usług HSD w sieciach PMR wiąże się z koniecznością pozyskania dodatkowych kanałów radiowych. Sprawa ta jest szczególnie ważna w przypadku systemów TETRA dla służb bezpieczeństwa i ratownictwa. Dla ich potrzeb, aby uwzględnić wszystkie wymagania związane z pracą w trybie bezpośrednim (DMO), trunkingowym (TMO) oraz łączności z obiektami latającymi (AGA), postuluje się przeznaczenie dodatkowo zakresów sąsiadujących z obecnie przeznaczonymi 380 MHz – 385 MHz i 390 MHz – 395 MHz, zatem rezerwowanie całego zakresu częstotliwości od 380 MHz do 400 MHz.

1.3. TEDS

Specyfikację systemu *TETRA Enhanced Data Service* (TEDS) opracowano zgodnie z mandatem obligującym ETSI do zdefiniowania specyfikacji systemu pakietowej transmisji danych dla zastosowań PMR i PAMR, w odpowiedzi na potrzeby użytkowników systemu TETRA w zakresie usług szybkiej transmisji danych (HSD).

Podstawowym celem opracowania TEDS, nazywanego także *TETRA Release 2*, było zaspokojenie istniejących obecnie i pojawiających się potrzeb użytkowników systemu TETRA na usługi szybkiej transmisji danych i multimedialne, w drodze wzbogacania usług

i udogodnień tego systemu. Wykorzystanie nowych technik transmisji ma również zapewnić konkurencyjność systemu TETRA jako światowego standardu PMR i PAMR.

Tab. 1.1: Wpływ aplikacji transmisji danych na obciążenie sieci systemu TETRA /*

Aplikacje nie głosowe	% wpływu na głos w 2005	Kbajt	kbit/s	Czas przesłania [s]	kbit/s netto	Grupa aplikacji
Usługi lokalizacji (AVL, APL)	-2 %	0,1	0,8	1	0,8	Krótkie dane w czasie rzeczywistym
Telemetria (przesyłanie w czasie rzeczywistym)	0 %	0,2	1,6	0,5	3,2	Krótkie dane w czasie rzeczywistym
Telesterowanie	0 %	0,2	1,6	0,5	3,2	Krótkie dane w czasie rzeczywistym
Próbkowania danych biomedycznych, w tym EKG	0 %	5	40	10	4	Krótkie dane w czasie rzeczywistym
Telemetria (przesyłanie w czasie rzeczywistym, 5 kbajt)	0 %	5	40	10	4	Krótkie dane w czasie rzeczywistym
WAP / formularze on-line	0 %	3	24	5	4,8	Interakcje z bazą danych
Wiadomości / lokalizacja / statusy osób i pojazdów (1 kbajt)	-2 %	1	8	1	8	Krótkie dane w czasie rzeczywistym
Zarządzanie danymi, np. C2 / zarządzanie pracownikami	-5 %	5	40	5	8	Interakcje z bazą danych
Dane o odciskach palców (oddzielone od obrazu odcisków)	0 %	10	80	10	8	Przesłanie pliku
Wysłanie pliku (10 kbajt)	1 %	10	80	4	20	Przesłanie pliku
Komunikacja między służbami, w tym Internet (10 kbajt)	0 %	10	80	4	20	Przesłanie pliku / aplikacje biurowe
Pytania do bazy danych (10 kbajt do 100 kbajt)	0 %	12,5	100	5	20	Interakcje z bazą danych
Aplikacje biurowe – ruchomy PC	0 %	12,5	100	5	20	Aplikacje biurowe
Połączenia do szpitali i krajowej sieci służby zdrowia	0 %	100	800	20	40	Przesłanie pliku
Połączenia do szpitali i krajowej sieci służby zdrowia	1 %	50	400	10	40	Aplikacje biurowe
Internet, w tym przeglądanie stron www (10 kbajt do 50 kbajt na stronę)	0 %	50	400	10	40	Aplikacje biurowe
Strumieniowe wideo (nadzór)	0 %			opóźnienie kilka sek.	50	Przesłanie wideo
Grafiki, mapy, lokalizacje (100 kbajt do 1 Mbajt)	-1 %	125	1000	20	50	Przesłanie obrazu
e-mail z załącznikami (2 Mbajt)	0 %	2000	16000	300	53	Przesłanie pliku
Wideo konferencje (64 kbit/s)	0 %				64	Przesłanie wideo
Przesyłanie fotografii (JPEG ~ 50 kbajt)	0 %	100	800	10	80	Przesłanie obrazu
Obraz odcisków palca	0 %	100	800	10	80	Przesłanie obrazu
Wideo klipy (1 Mbajt do 2 Mbajt)	0 %	2000	16000	32	500	Przesłanie wideo

/* szybkość danych netto

1.3.1. Interfejs radiowy

Ponieważ specyfikację TEDS zintegrowano ze specyfikacją TETRA V+D w ETSI w 2006 r. opracowano rozszerzoną wersję normy EN 300 392-2 V3.1.1, zawierającej definicje interfejsu radiowego systemu TETRA, której projekt opublikowano we wrześniu br. [2]. W porównaniu z poprzednią wersją specyfikacji interfejsu radiowego w ETSI TS 100 392-2 v.2.6.1 wprowadzono modyfikacje polegające na uwzględnieniu wymagań dotyczących usług HSD (*High Speed Data*) oraz komunikacji z MS umieszczonymi na statkach powietrznych AGA (*Air Ground Air*).

Rozszerzona specyfikacja interfejsu radiowego TETRA obejmuje specyfikacje warstwy fizycznej, warstwy łącza danych oraz warstwy sieciowej. Odnosnie warstwy fizycznej zdefiniowano:

- modulację,
- nadawanie i odbiór,
- synchronizację,
- kodowanie kanałowe,
- multipleksowanie kanału radiowego,
- sterowanie za pośrednictwem kanału radiowego.

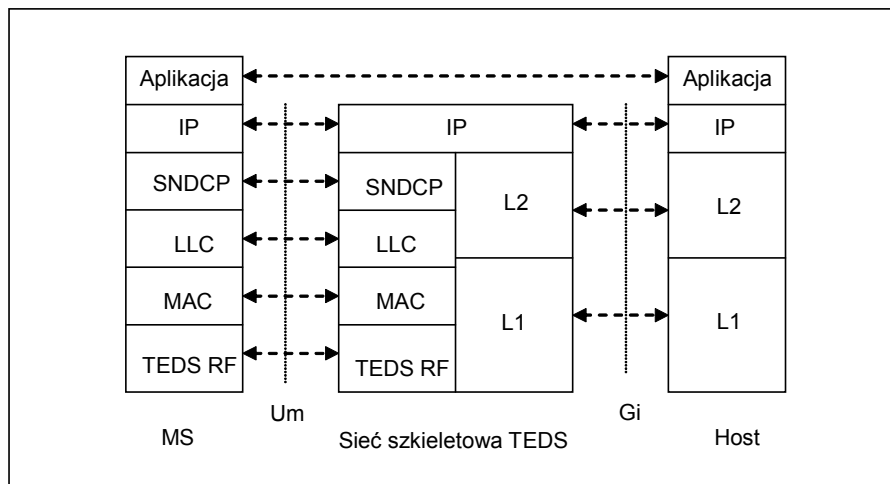
Ponadto określono usługi, polecenia i protokoły używane:

- do komunikacji głosowej i danych w trybie z komutacją obwodów,
- do zarządzania mobilnością użytkowników w obrębie systemu TETRA,

oraz usługi, polecenia i protokoły używane do pakietowej transmisji danych, składające się na specyficzny dla tego systemu protokół SNDCP (*Sub-Network Data Control Protocol*).

Wprowadzając TEDS zachowano kompatybilność z protokołami wyższych warstw sieci TETRA V+D zdefiniowanymi w poprzednich edycjach normy ETSI EN 300 392-2 odnośnie *TETRA Release 1*:

- dodając nowe elementy w warstwie fizycznej;
- modyfikując wyższe warstwy sieci (MAC, LLC i SNDCP) w celu umożliwienia obsługi przez interfejs radiowy znacznie większego ruchu IP.



Rys. 1.1: Stos protokołów interfejsu radiowego TEDS [1]

Legenda:

- Um – oznacza interfejs radiowy TEDS (pomiędzy MS a BS),
- LLC – Logical Link Control,
- MAC – Medium Access Control,
- SNDCP – SubNetwork Dependent Convergence Protocol,
- TEDS RF – warstwa fizyczna TEDS,
- IP – Internet Protocol (w warstwie 3 – sieciowej),
- L1 – warstwa 1 – fizyczna,
- L2 – warstwa 2 – łącza danych,
- IP – protokół internetowy,
- Gi – jest dla trybu pakietowego bramą węzła aplikacji (*Host*).

Na rys. 1.1 przedstawiono stos protokołów interfejsu radiowego TEDS w powiązaniu z aplikacją korzystającą z protokołów IP. Należy podkreślić, że z założenia usługi oparte na

TEDS wykorzystują transport IP. Dane przesyłane w trybie CS (*Circuit Switched*) są dostępne tylko w części V+D systemu TETRA. Ze względu na zachowanie kompatybilności wstecz z istniejącymi sieciami TETRA V+D w TEDS wykorzystuje się ten sam kanał sterujący.

Poniżej scharakteryzowano tylko zmodyfikowaną warstwę fizyczną TEDS. Opisy warstw MAC, LLC i SNDCP TEDS są zawarte w projekcie normy ETSI EN 300 392-2 v.3.1.1 [2] lub nowszych specyfikacjach ETSI, a ich opis wykracza poza przeglądowy charakter niniejszego opracowania.

1.3.2. Warstwa fizyczna

W warstwie fizycznej TEDS, oprócz modulacji $\pi/4$ DQPSK stosowanej dotychczas w kanałach radiowych TETRA V+D o szerokości 25 kHz, zdefiniowano nowe rodzaje modulacji i możliwość użycia kanałów radiowych o szerokości od 25 kHz do 150 kHz. Zastosowane rozwiązanie oferuje możliwość wyboru maksymalnej szybkości transmisji danych od uzyskiwanej aktualnie w sieciach V+D do szybkości osiąganej w radiowych sieciach 3G, a także wyboru wymaganej szerokości pasma stosownie do indywidualnych potrzeb użytkowników i dostępności odpowiednich kanałów radiowych.

Podstawowe cechy warstwy fizycznej systemu TEDS:

- możliwość stosowania wielu fal nośnych (kanałów radiowych) z dostępem TDMA;
- odstęp międzykanałowy: 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz lub 150 kHz;
- adaptacyjny wybór modulacji i kodowania zależnie od warunków propagacji;
- możliwość stosowania następujących rodzajów modulacji:
 - $\pi/4$ DQPSK (bezpośrednia fali nośnej RF), stosowana dla wspólnego kanału sterującego (protokół zgodny z TETRA V+D wg specyfikacji *TETRA Release 1*);
 - $\pi/8$ D8PSK (bezpośrednia fali nośnej RF), modulacja wprowadzona do specyfikacji systemu TEDS, aby umożliwić nieznaczne zwiększenie szybkości transmisji danych drogą ewolucji sieci TETRA V+D pracujących w dotychczas używanych kanałach RF o szerokości 25 kHz;
 - 4 QAM^{/*} dla łączy transmisji danych na granicy pokrycia;
 - 16 QAM^{/*} dla łączy transmisji danych o umiarkowanych szybkościach;
 - 64 QAM^{/*} dla łączy transmisji danych o dużych szybkościach;

^{/*} Uwaga. Ww. modulacje QAM stosuje się dla określonej, zależnej od szerokości kanału RF, liczby podnośnych modulujących falę nośną RF, przy czym osiem podnośnych przypada na każde 25 kHz szerokości pasma kanału RF, por. p. 1.3.3.

- użycie symboli "pilota" do estymacji kanału radiowego;
- kodowanie kanałowe (*Parallel Concatenated Convolutional Coding, PCCC*);
- wykorzystanie szczelin czasowych o długości normalnej i połówkowej;

Zastosowanie wymienionych środków powinno umożliwiać uzyskiwanie szybkości danych dla użytkownika w granicach od 30 kbit/s do 500 kbit/s.

W TEDS zachowano stosowany w systemie TETRA V+D wielodostęp TDMA z czterema szczelinami na jednej fali nośnej. Struktura ramek TDMA jest w obu wersjach systemu taka sama. Długość szczelin czasowych przy modulacji fazowej (modulacji $\pi/4$ DQPSK i $\pi/8$ D8PSK) odpowiada czasowi 255 symboli $500/9 \mu\text{s} \approx 55,56 \mu\text{s}$. Przy modulacji QAM szczelina czasowa składa się z 34 symboli modulacji, każdy o długości $5/12 \text{ ms} \approx 416,7 \mu\text{s}$.

W TEDS odstęp międzykanałowy 25 kHz jest stosowany w przypadku modulacji fazowej stosowanej w kanale sterującym TETRA V+D (modulacja $\pi/4$ DQPSK) i dla potrzeb

usprawnionej transmisji danych przy wykorzystaniu modulacji $\pi/8$ D8PSK. Szybkość modulacji wynosi 36 kbit/s przy $\pi/4$ DQPSK lub 54 kbit/s przy $\pi/8$ D8PSK. W kanałach do transmisji danych o szerokości 50 kHz, 100 kHz lub 150 kHz stosuje się wielowartościową modulację amplitudową QAM (4-QAM, 16-QAM i 64-QAM) podnośnych zdefiniowaną w ten sposób, że w paśmie o szerokości 25 kHz mieści się 8 podnośnych (podkanałów). Zatem liczba podnośnych wynosi odpowiednio:

- 8 w kanale o szerokości 25 kHz,
- 16 w kanale o szerokości 50 kHz,
- 32 w kanale o szerokości 100 kHz,
- 48 w kanale o szerokości 150 kHz.

Szybkość modulacji każdej podnośnej wynosi 2400 symboli/s.

Wymagania dotyczące mocy w sąsiednich kanałach nadajnika oraz odporności odbiornika na blokowanie i intermodulację dla modulacji QAM są inne niż stawiane w przypadku $\pi/4$ DQPSK i $\pi/8$ D8PSK. Odpowiednie wartości podano w ostatnich wersjach dokumentów ETSI: TR 102 491 [1] i EN 300 392-2 [2]. Jednakże w każdym przypadku obwiednia widma nadajnika TEDS (*TEDS spectrum mask*) ma spełniać wymagania określone w zaleceniu CEPT/ERC 74-01E [3] odnośnie poziomu emisji pozapasmowych.

Standard TEDS zaprojektowano do stosowania w tych samych zakresach częstotliwości, jak konwencjonalny system TETRA V+D, tj.:

- 380 MHz – 400 MHz, z odstępem dupleksowym 10 MHz;
- 410 MHz – 430 MHz, z odstępem dupleksowym 10 MHz;
- 450 MHz – 470 MHz, z odstępem dupleksowym 10 MHz;
- 870 MHz – 876 MHz / 915 MHz – 921 MHz, z odstępem dupleksowym 45 MHz;

z przeznaczeniem dolnej połówki pasma dla łącza w górę (od MS do BS) i górnej połówki pasma dla łącza w dół (od BS do MS).

Znormalizowane moce nadajników stacji ruchomych (MS) i stacji bazowych (BS) TEDS są takie same, jak definiowane wcześniej dla TETRA V+D, ale przy rewizji specyfikacji dodano nowe klasy mocy dla MS TEDS pracujących z QAM, klasę 5: +25 dBm (0,32 W) i klasę 5L: +22,5 dBm (0,18 W).

Natomiast poziom odniesienia dla statycznej czułości odbiornika ustalono jak następuje [2]:

- dla BS, modulacja $\pi/4$ DQPSK: –115 dBm,
- dla MS, modulacja $\pi/4$ DQPSK: –112 dBm,
- dla BS, modulacja $\pi/8$ D8PSK: –110 dBm,
- dla MS, modulacja $\pi/8$ D8PSK: –107 dBm.

Należy przypomnieć, że w kanale radiowym z zanikiem typowym dla warunkach miejskich (tzn. gdy opóźnienie składowych wielodrogowych jest mniejsze niż 5 μ s) wartością progową zakłóceń w kanale C/I_c (co-channel interference) przy modulacji $\pi/4$ DQPSK (TETRA V+D) i zastosowaniu kodeka ACELP o pełnej przepływności jest 19 dB, a dynamiczny poziom czułości odniesienia wynosi -106 dBm dla BS i -103 dBm dla MS.

W przypadku modulacji $\pi/8$ DQPSK wymagany stosunek C/I_c wynosi 25 dB, a dynamiczny poziom czułości odniesienia odpowiednio [2]: -100 dBm dla BS i -97 dBm dla MS.

Do oszacowania zasięgu komunikacji w systemie TEDS istotne są minimalne wymagania odnośnie dynamicznej czułości odbiornika przy wielowartościowych modulacjach QAM przeznaczonych do transmisji danych. W tab. 1.2 oraz tab. 1.3 podano wstępne wymagania

stawiane odpowiednio w odniesieniu do czułości odbiornika BS i MS określone dla bitowej stopy błędu (BER) wynoszącej 3 %.

Tab. 1.2: Poziomy czułości odbiornika BS dla modulacji QAM [1]

Szerokość pasma kanału [kHz]	Liczba podnośnych	Pasmo szumowe [kHz]	4-QAM, czułość dla BER 3 % [dBm]	16-QAM, czułość dla BER 3 % [dBm]	64-QAM, czułość dla BER 3 % [dBm]
25	8	19,2	–116	–109	–104
50	16	38,4	–113	–106	–100
100	32	76,8	–110	–103	–98
150	48	115,2	–108	–102	–96

Tab. 1.3: Poziomy czułości odbiornika MS dla modulacji QAM [1]

Szerokość pasma kanału [kHz]	Liczba podnośnych	Pasmo szumowe [kHz]	4-QAM, czułość dla BER 3 % [dBm]	16-QAM, czułość dla BER 3 % [dBm]	64-QAM, czułość dla BER 3 % [dBm]
25	8	19,2	–113	–106	–101
50	16	38,4	–110	–103	–97
100	32	76,8	–107	–100	–95
150	48	115,2	–105	–99	–93

Wymagane poziomy dynamicznej czułości odniesienia stacji bazowej i ruchomej, przy częstotliwościach poniżej 700 MHz, zastosowaniu kodu o sprawności (*coding rate*) $r = 1/2$ lub $r = 2/3$, dla trzech modulacji QAM podano w tab. 1.4 , tab. 1,5 oraz tab. 1.6 [2].

Tab. 1.4: Poziom dynamicznej czułości odniesienia BS i MS dla 4-QAM [2]

Pasmo kanału [kHz]	BS, $r = 1/2$ [dBm]	MS, $r = 1/2$ [dBm]
25	–111	–108
50	–108	–105
100	–105	–102
150	–104	–101

Tab. 1.5: Poziom dynamicznej czułości odniesienia BS i MS dla 16-QAM [2]

Pasmo kanału [kHz]	BS, $r = 1/2$ [dBm]	MS, $r = 1/2$ [dBm]
25	–106	–103
50	–102	–100
100	–100	–97
150	–99	–96

Tab. 1.6: Poziom dynamicznej czułości odniesienia BS i MS dla 64-QAM [2]

Pasmo kanału [kHz]	BS, $r = 1/2$ [dBm]	BS, $r = 2/3$ [dBm]	MS, $r = 1/2$ [dBm]	MS, $r = 2/3$ [dBm]
25	–101	–98	–98	–95
50	–98	–94	–95	–91
100	–95	–92	–92	–88
150	–94	–91	–91	–87

Analiza wymagań określonych w tych tablicach wskazuje znaczną zależność czułości od rodzaju modulacji (n-QAM), szerokości pasma kanału radiowego i sprawności kodowania (r). Np. w kanale o szerokości 50 kHz wymagany poziom dynamicznej czułości odbiornika BS zawiera się pomiędzy –108 dBm (4-QAM i $r = 1/2$) a –94 dBm (64-QAM i $r = 2/3$), co daje różnicę 14 dB znacząco wpływającą na zasięg transmisji. Ponieważ w radiokomunikacji ruchomej charakterystyki kanału radiowego są zmienne i zależne od czynników losowych w TEDS, w celu optymalizacji właściwości łącza radiowego systemu, wprowadzono sterowanie adaptacyjne polegające na możliwości zmiany rodzaju modulacji i sprawności kodowania stosowanych podczas transmisji radiowej.

Zatem do definicji interfejsu radiowego TEDS odnoszą się również zdefiniowane w normie ETSI EN 300 392-2 funkcje związane z synchronizacją i adaptacyjnym sterowaniem mocą nadajników, a w przypadku kanałów D8PSK i QAM także adaptacyjnego sterowania łączem.

W przypadku integracji TEDS i TETRA V+D w jednej stacji bazowej jedna lub więcej nośnych TEDS może być używana obok jednej lub więcej nośnych V+D. Zaimplementowanie wyższych warstw zgodnie z TEDS umożliwia obsługę transmisji TEDS IP oraz TETRA V+D.

1.3.3. Kanały QAM

Dla potrzeb szybkiej transmisji danych zaprojektowano możliwość stosowania kanałów radiowych o szerokości od 25 kHz do 150 kHz. Aby uzyskać system transmisyjny odporny na skutki propagacji wielodrogowej pasmo każdego z kanałów radiowych jest dzielone na podkanały, utworzone w trybie ze zwielokrotnieniem częstotliwościowym: 8 podnośnych na 25 kHz pasma kanału radiowego. Każda z tych podnośnych jest modulowana QAM. Wskutek rozdzielenia strumienia przesyłanych danych na wiele podnośnych uzyskuje się odpowiednio mniejszą szybkość modulacji i odporność na rozproszenie parametrów czasowych odbieranego sygnału cyfrowego.

Ponieważ szybkość modulacji każdej z podnośnych wynosi 2400 symboli/s (2,4 ksymboli/s), to całkowita szybkość modulacji wynosi:

- 19,2 ksymboli/s w kanale 25 kHz (8 podnośnych),
- 38,4 ksymboli/s w kanale 50 kHz (16 podnośnych),
- 76,8 ksymboli/s w kanale 100 kHz (32 podnośnych),
- 115,2 ksymboli/s w kanale 150 kHz (48 podnośnych),

co odpowiada szybkościom transmisji (brutto) podanym w tab. 1.7.

Odstęp częstotliwości pomiędzy podnośnymi wynosi 2,7 kHz i jest ściśle, poprzez zależności matematyczne, związany z czasem pojedynczego symbolu modulacji.

Symbole modulacji podnośnych (*sub-carrier symbol*, *SS*) mogą przenosić dane użytkownika systemu (*Data Subcarrier Symbol*, *DSS*) lub informacje konieczne dla synchronizacji

odbiorników (*Synchronization Sub-carrier Symbol, SSS*) oraz symbole pilota (*Pilot Sub-Carrier Symbols, PSS*).

Tab. 1.7: Szybkość bitowa w kanałach QAM – brutto [kbit/s]

Rodzaj modulacji	Szerokość pasma kanału radiowego			
	25 kHz	50 kHz	100 kHz	150 kHz
4-QAM	38,4	76,8	153,6	230,4
16-QAM	76,8	153,6	307,2	460,8
64-QAM	115,2	230,4	460,8	691,2

Szybkość transmisji oferowana użytkownikom ze względu na nadmiar systemowy jest mniejsza.

1.3.4. Wymagania częstotliwościowe dla wprowadzenia TEDS

Do wprowadzenia TEDS jest konieczne uzyskanie kanałów radiowych o odpowiedniej szerokości. Należy sądzić, że ze względu na istniejący deficyt wolnych częstotliwości, kanały dwupasmowe o szerokości 2×100 kHz i 2×150 kHz w praktyce nie znajdą zastosowania [6]. Zatem można przyjąć, że dla wprowadzenia szybkiej transmisji danych w sieci TETRA każda stacja bazowa powinna zostać wyposażona w jedną falę nośną z kanałem dwupasmowym o szerokości 50 kHz. Ocenia się (*TETRA Association 2006*), że minimalna, absolutnie konieczna szerokość pasma dla zbudowania takiej sieci wynosi $2 \times 20 \times 50$ kHz = 2×1 MHz, zaś minimalna rezerwowana szerokość pasma obliczona na podstawie uzasadnionych potrzeb użytkowników powinna wynosić raczej $2 \times 1,5$ MHz.

Jeżeli założyć potrzebę zastosowania dwóch nośnych 50 kHz TEDS w każdej stacji bazowej, to absolutnie konieczna szerokość pasma będzie wynosić 2×2 MHz, a obliczona na podstawie uzasadnionych potrzeb będzie rzędu 2×3 MHz.

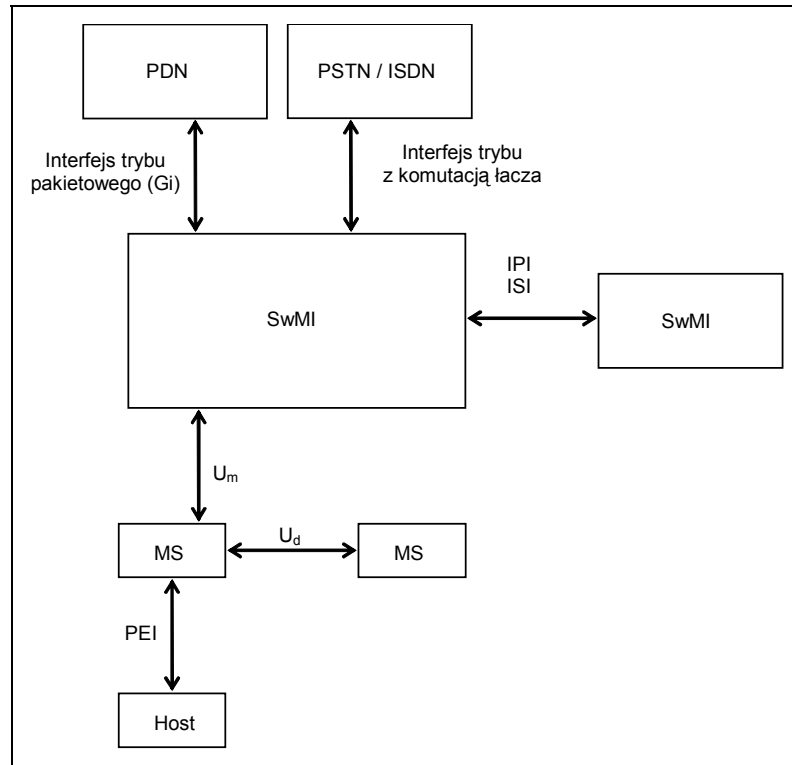
Ponieważ zakresy częstotliwości 380 ÷ 385 / 390 ÷ 395 MHz są praktycznie we wszystkich krajach UE zarezerwowane dla publicznych służb bezpieczeństwa i ratownictwa (w skutek implementacji Decyzji ERC DEC (96)01)), to mając na względzie potrzebę wprowadzenia TEDS czynione są starania o pozyskanie dodatkowych częstotliwości w zakresie 380 ÷ 400 MHz. Innym rozwiązaniem mogłoby być równoległe wykorzystanie kanałów w zakresie 410 ÷ 430 MHz, ale wiąże się to ze znacznymi trudnościami z wykorzystaniem tych samych anten, sumatorów, filtrów itd. Wybór tej koncepcji oznaczałby konieczność wymiany przy wprowadzeniu TEDS nie tylko oprogramowania, ale także urządzeń. Zatem z technicznego punktu widzenia najlepszym rozwiązaniem jest uzyskanie dodatkowego pasma w zakresie 380 ÷ 400 MHz.

1.3.5. Inne interfejsy TEDS

Głównym elementem schematu blokowego standardowego modelu systemu TETRA V+D jest infrastruktura komutacyjno-zarządzająca (SwMI), która realizuje usługi telekomunikacyjne dla stacji ruchomych w trybie komutacji obwodów i/lub pakietowym. W standardzie TETRA V+D zdefiniowano tylko interfejsy pomiędzy SwMI a innymi jednostkami, nie definiując architektury wewnątrz SwMI. Standardowymi interfejsami sieci TETRA są (rys. 1.2):

- interfejs radiowy w trybie trunkingowym (*Trunked Mode Air Interface, U_m*), którego specyfikację zawiera norma ETSI EN 300 392-2;
- interfejs radiowy w trybie bezpośrednim (*Direct Mode Air Interface, U_d*), którego specyfikację zawiera norma ETSI EN 300 396;
- interfejs IP (IPI);

- d. interfejs międzysystemowy (*Intersystem Interface, ISI*), którego specyfikację zawiera norma ETSI EN 300 392-3;
- e. interfejs urządzeń zewnętrznych (*Peripheral Equipment Interface, PEI*), którego specyfikację zawiera norma ETSI EN 300 392-5;
- f. interfejs sieci PSTN / ISDN (*PSTN / ISDN Network Interface*), którego specyfikację zawiera norma ETSI ETS 300 392-4.



Rys. 1.2: Interfejsy konwencjonalnej sieci TETRA V+D

Legenda:

- Gi – interfejs zewnętrznej sieci pakietowej (między domeną pakietową i zewnętrzną siecią pakietową),
- IPI – interfejs IP,
- ISI – interfejs międzysystemowy
- PEI – interfejs urządzeń zewnętrznych,
- SwMI – infrastruktura sieci TETRA V+D,
- U_d – interfejs radiowy TETRA DMO,
- U_m – interfejs radiowy TETRA TMO (trybu trunkingowego).

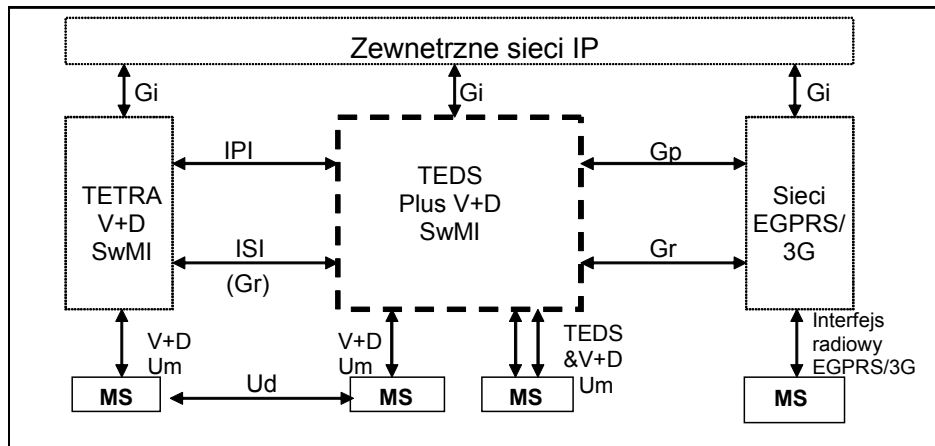
Na kolejnym rysunku, rys. 1.3, przedstawiono ogólną strukturę zintegrowanej sieci TEDS oraz TETRA V+D dołączonej do:

- sieci TETRA V+D,
- sieci EGPRS,
- zewnętrznej sieci pakietowej.

Oprócz interfejsu radiowego U_m w sieci TEDS występują interfejsy:

- Gi, sieci pakietowej,
- Gp oraz Gr, sieci 3G (np. TETRA – EGPRS)^{/*}.

^{/*} System EGPRS jest znany także pod nazwą EDGE.



Rys. 1.3: Interfejsy sieci TEDS zintegrowanej z TETRA V+D

Legenda:

- Gi – interfejs zewnętrznej sieci pakietowej (między domeną pakietową i zewnętrzną siecią pakietową),
- Gp – interfejs między GSN (*GPRS Support Nodes*), węzłami obsługi GPRS w różnych sieciach publicznych),
- Gr – interfejs pomiędzy węzłem obsługi GPRS (*Serving GPRS Support Node*), a rejestrem abonentów sieci 3G (*Home Location Register*),
- SwMI – infrastruktura sieci TETRA V+D lub TEDS oraz TETRA V+D,
- U_d – interfejs radiowy w trybie bezpośrednim,
- U_m – interfejs radiowy w trybie trunkingowym.

1.3.6. Usługi TEDS

TEDS umożliwia efektywne wykorzystanie zasobów sieci dla aplikacji pakietowej transmisji danych o zróżnicowanych charakterystykach, takich jak:

- nieciągłe przerywane transmisje, podczas których czas pomiędzy kolejnymi transmisjami jest znacznie dłuższy niż średni czas opóźnienia przekazu;
- częste transmisje małych ilości danych, np. transakcje składające się z mniej niż 500 bajtów danych zdarzające się kilka razy w ciągu minuty;
- nieczęste transmisje dużych ilości danych np. transakcje składające się z kilku kilobajtów danych zdarzające się kilka razy w ciągu godziny.

Usługa transmisji pakietowej TEDS jest usprawnioną wersją usługi IP w obecnym systemie TETRA, umożliwiającą przesyłanie danych w relacjach punkt do punktu i punkt do wielu punktów. Zachowano kompatybilność wstecz z rozwiązaniami TETRA IP stosowanymi dotychczas. Oferowane są trzy klasy QoS usług realizowanych za pośrednictwem interfejsu radiowego TEDS, skojarzone z szybkością i priorytetami:

- klasa usług czasu rzeczywistego (*real-time*),
- klasa usług telemetrii (*telemetry*),
- klasa usług drugoplanowych (*background*).

Maksymalne opóźnienie pakietów odnosi się do opóźnienia w obrębie sieci TETRA, nie ma zastosowania do opóźnienia transmisji end-to-end. Maksymalne opóźnienie jest negocjowane po wynegocjowaniu minimalnej przepływności przez warstwę SND CP (por. rys. 1.1). Aplikacje zawsze żądają określenia maksymalnego opóźnienia pakietów, które sieć może gwarantować. Przy tym powinien być określony rozmiar pakietów, których dotyczy opóźnienie. Np. jeżeli aplikacją jest wideokonferencja, to zależnie od stosowanej kompresji i przepływności kodeka ilość danych przesyłanych w jednostce czasu może być różna dla

różnych implementacji tej usługi. Zatem w celu zdefiniowania maksymalnego opóźnienia należy określić dwa parametry:

- normalny rozmiar ramki Nreg (oktetów),
- maksymalne opóźnienie pomiędzy dwoma kolejnymi normalnymi ramkami Treg.

Wymagania dotyczące maksymalnego opóźnienia pakietów transmisji TEDS podano w tab. 1.8.

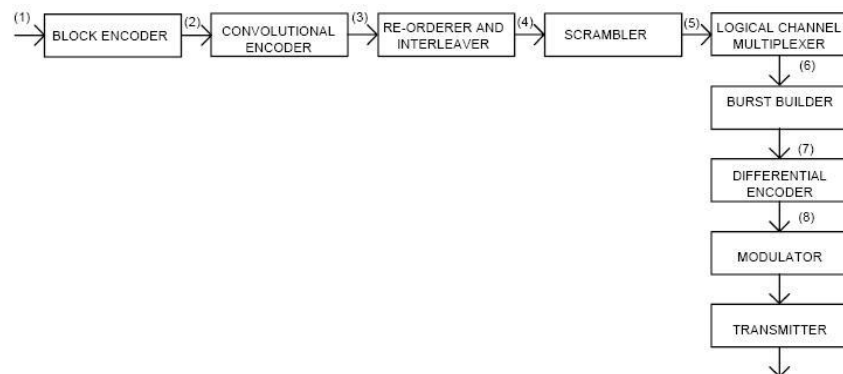
Tab. 1.8: Osiągalne maksymalne opóźnienia pakietów TEDS

Opóźnienie	Nreg = 128 oktetów		Nreg = 1024 oktetów	
	Średnie opóźnienie transferu [sek]	Percentyl 95 % opóźnienia [sek]	Średnie opóźnienie transferu [sek]	Percentyl 95 % opóźnienia [sek]
Małe	Treg < 0,5	Treg < 1,5	Treg < 2,0	Treg < 7,0
Umiarkowane	Treg < 5,0	Treg < 25,0	Treg < 15,0	Treg < 75,0
Duże	Treg < 50,0	Treg < 250,0	Treg < 75,0	Treg < 375,0
Nieprzewidywalne	Best effort	Best effort	Best effort	Best effort

Uwaga. Określenie "Best effort" definiuje usługi sieciowe, dla których sieć nie daje żadnej gwarancji, że dane będą dostarczone, albo że użytkownik uzyska gwarantowany poziom QoS lub jakiś priorytet. Wszyscy użytkownicy usług zaliczanych do klasy "Best effort" uzyskają zmienną szybkość transmisji i zmienne opóźnienie.

1.3.7. Rekonfiguracja urządzeń w związku z wprowadzeniem TEDS

Konfigurację nadajnika systemu TETRA pracującego z modulacją fazową ($\pi/4$ DQPSK lub $\pi/8$ D8PSK) przedstawiono na rys. 1.4.

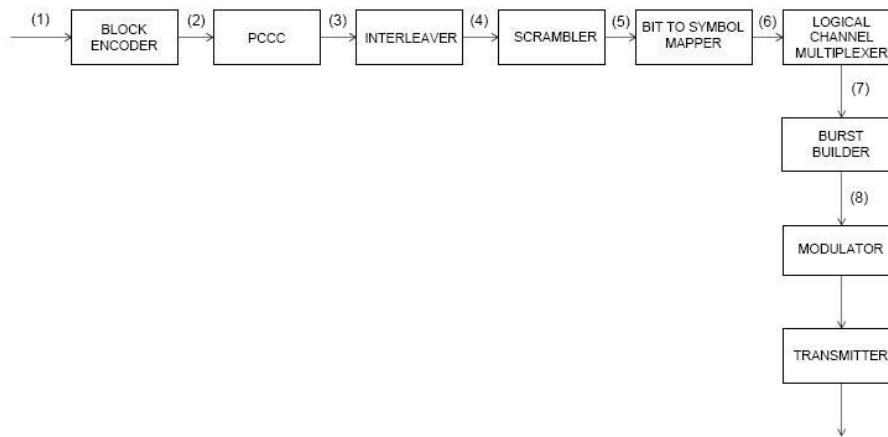


Rys. 1.4: Konfiguracja odniesienia nadajnika dla modulacji fazowej

Legenda:

- (1) bity informacji (do nadawania)
- (2) bity kodowane blokowo
- (3) bity kodowane splotowo
- (4) bity z przeplotem
- (5) bity ze skramblera
- (6) bity z multiplexera kanałów logicznych
- (7) bity modulatora
- (8) symbole modulacji

Konfigurację nadajnika systemu pracującego z modulacjami QAM przedstawiono na rys. 1.5.



Rys. 1.5: Konfiguracja odniesienia nadajnika dla modulacji QAM

Legenda:

- (1) bity informacji (do nadawania)
- (2) bity kodowane blokowo
- (3) bity po kodowaniu turbo
- (4) bity z przeplotem
- (5) bity ze skramblera
- (6) symbole modulacji
- (7) symbole multipleksowane
- (8) sygnał modulacji

Jak wspomniano TEDS zintegrowano z systemem TETRA V+D. W niektórych wariantach TEDS jest możliwa modernizacja istniejącej infrastruktury sieci TETRA V+D. Inne wersje TEDS wymagają dodatkowej infrastruktury.

Zakłada się, że pierwsze zastosowanie TEDS przez służby bezpieczeństwa i ratownictwa mogą mieć miejsce już w 2007 r. W najbliższym czasie ECC powinna podjąć zadania mające na celu badania koegzystencji TEDS z innymi systemami oraz przygotowanie decyzji o rezerwacji dodatkowych kanałów dla potrzeb TEDS.

1.3.8. Zasięg użyteczny TEDS

Dla określonego rodzaju modulacji i kodowania transmisji dopuszczalne tłumienie trasy L_p [dB] propagacji fali radiowej między stacją bazową (BS) a stacją ruchomą (MS) wynika z różnicy między mocą promieniowaną stacji bazowej P_t [dBm] i czułością odbiornika stacji ruchomej P_r [dBm]: $L_p \leq P_t - P_r$ (łącze w dół – down link) i/lub analogicznie różnicy między mocą promieniowaną stacji ruchomej P_t [dBm] i czułością odbiornika stacji bazowej P_r [dBm] (łącze w górę – up link).

Jeżeli zmiennym parametrem łącza radiowego jest czułość odbiornika zależna od rodzaju modulacji i kodowania, to wyznaczając dopuszczalne tłumienie trasy L_p [dB] można określić związek między rodzajem modulacji i zasięgiem łączności.

W tab. 1.9 oraz na rys. 1.6 przedstawiono zależność pomiędzy długością trasy propagacji fali o częstotliwości 400 MHz, a tłumieniem tej trasy obliczonym przy zastosowaniu siedmiu różnych modeli propagacyjnych. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano ogólnodostępne oprogramowanie.

Porównując dane dotyczące dynamicznej czułości odniesienia odbiornika (tab. 1.4 ÷ 1.6) z danymi dla wybranego modelu w tab. 1.9 można udowodnić, że zmiana czułości odbiornika o ok. 14 dB powoduje znaczącą zmianę zasięgu.

Tab. 1.9: Tłumienie trasy o długości "d" wg różnych modeli empirycznych [8]

d [km]	CCIR	Hata-l. city	Hata-s. city	Hata- suburban	Hata- otwarta przestrzeń	WI- LOS	WI- NLOS
0,1	77,0	82,0	82,0	73,9	56,4	68,7	100,2
0,2	87,6	92,6	92,6	84,5	67,0	76,5	114,4
0,3	93,8	98,8	98,8	90,7	73,2	81,1	123,3
0,5	101,6	106,6	106,6	98,6	81,0	86,9	135,8
1	112,2	117,2	117,2	109,2	91,6	94,7	148,4
2	122,8	127,8	127,8	119,8	102,2	102,5	160,9
3	129,0	134,0	134,0	126,0	108,4	107,1	168,3
5	136,8	141,8	141,8	133,8	116,2	112,9	177,5
10	147,4	152,4	152,4	144,4	126,8	120,7	190,1
20	158,1	163,0	163,1	155,0	137,4	128,5	202,7
30	164,3	169,2	169,3	161,2	143,6	133,1	210,0

Parametry wejściowe do obliczeń

Częstotliwość [MHz]	f [MHz]	400
Fizyczna wysokość anteny BS [m]	h_b	30
Fizyczna wysokość anteny MS [m]	h_m	1,5
Procent budynków	%	10
WIM – wysokość budynków	h_B	40
WIM – odległość pomiędzy budynkami	b	40
WIM – szerokość ulicy	w	20
WIM – kąt	ϕ	28
WIM – środowisko NLOS		

gdzie:

- CCIR – model ITU-R;
- Hata-l. city – model Hata, duże miasto (budynki wyższe niż 15 m);
- Hata-s. city – model Hata, małe miasto;
- Hata-suburban – model Hata, obszar podmiejski;
- WIM – model Walfisch-Ikegami;
- LOS – bezpośrednia widoczność anten;
- NLOS – brak bezpośredniej widoczności anten.

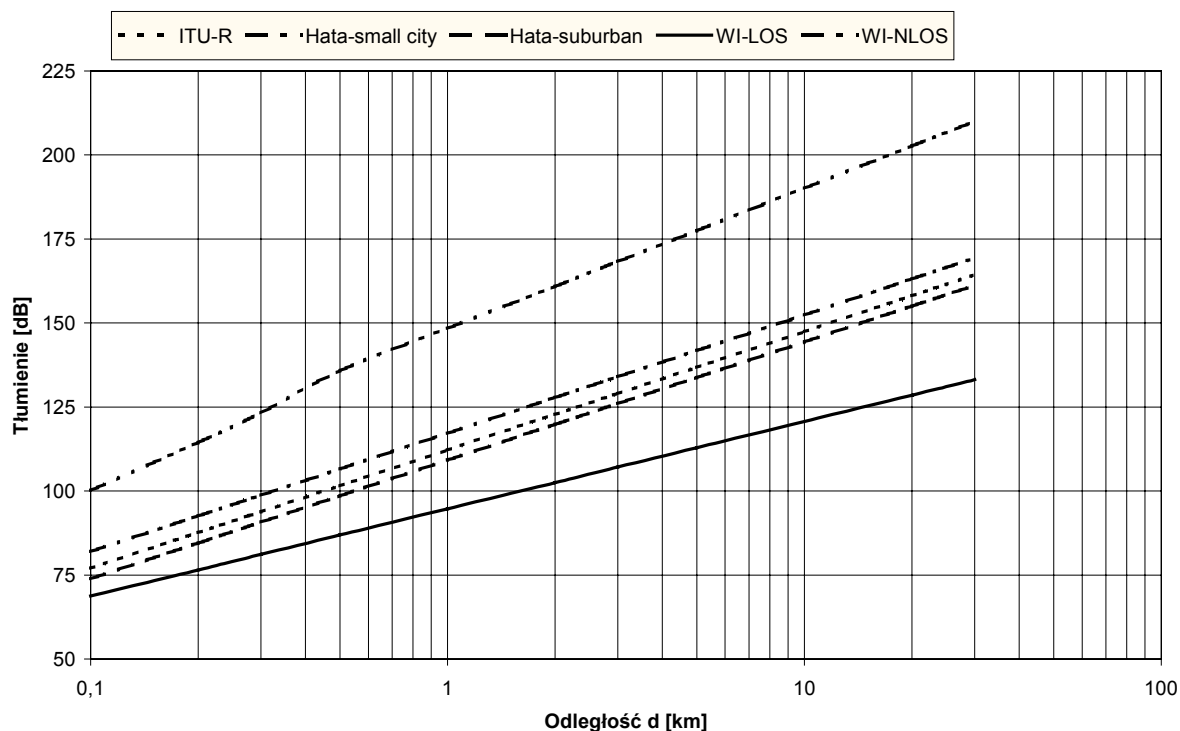
Jeżeli dla potrzeb dalszych rozważań należy przyjąć prosty model propagacji fali w otwartej przestrzeni, opisany zależnością:

$$L_f[\text{dB}] = 32,44 + 20 \log d [\text{km}] + 20 \log f [\text{MHz}],$$

gdzie: odległość między antenami d jest wyrażona w km, a częstotliwość sygnału radiowego f w MHz, to przyjmując $f = 400$ MHz uzyskuje się formułę określającą dopuszczalne tłumienie trasy na tej częstotliwości: $L [\text{dB}] = 84,5 + 20 \log d [\text{km}]$, na podstawie której można

wyznaczyć zasięg w otwartej przestrzeni: $d = 10^{\frac{L-84,5}{20}}$.

Posługując się tą zależnością wykonano obliczenia dla kanału RF o szerokości 25 kHz i 50 kHz, których wyniki przedstawiono w tab. 1.10 i tab. 1.11.



Rys. 1.6: Tłumienie trasy o długości "d" wg różnych modeli empirycznych

Tab. 1.10: Zasięg w otwartej przestrzeni dla kanału 25 kHz

Rodzaj modulacji	$\pi/4$ DQPSK	$\pi/8$ D8PSK	4-QAM $r = 1/2$	16-QAM $r = 1/2$	64-QAM $r = 1/2$
Dynamiczna czułość BS [dBm]	-106	-100	-111	-106	-101
Zakładane tłumienie trasy [dB]	109	103	114	109	104
Maksymalny zasięg [km]	16,8	8,4	29,9	16,8	9,4

Tab. 1.11: Zasięg w otwartej przestrzeni dla kanału 50 kHz

Rodzaj modulacji	4-QAM $r = 1/2$	16-QAM $r = 1/2$	64-QAM $r = 1/2$
Dynamiczna czułość BS [dBm]	-108	-102	-98
Zakładane tłumienie trasy [dB]	111	105	101
Maksymalny zasięg [km]	21,1	10,6	6,7

1.4. Podsumowanie

W 2006 r. ETSI publikując projekt normy EN 300 392-2 [2] zakończono prace dotyczące pierwszej edycji specyfikacji TEDS. Proponowany system spełnia wszystkie podstawowe założenia polegające na ewolucyjnym rozwoju od obecnie stosowanego TETRA V+D do systemu umożliwiającego przesyłanie strumieni danych rzędu 50 kbit/s netto (por. tab. 1.7). Jednakże, jak wskazano w p. 1.3.8 zasięg transmisji $\pi/8$ D8PSK oraz 64-QAM jest znacznie mniejszy niż zasięg transmisji TETRA V+D.

W tym miejscu trzeba przypomnieć, że w odróżnieniu od publicznych sieci komórkowych, takich jak GSM, które zwłaszcza w rejonach zurbanizowanych są projektowane w celu uzyskania maksymalnej pojemności, tzn. z dużą liczbą gęsto rozmieszczonych komórek o małym zasięgu, sieci PMR są zwykle projektowane w sposób gwarantujący największy zasięg (względnie mała liczba użytkowników i korzystanie głównie z połączeń grupowych nie wymagają dużej pojemności sieci). W przypadku wdrażania systemu TEDS jako nakładki na istniejącą sieć TETRA, co jest możliwe ze względu na kompatybilność systemów, pojawią się problemy zasięgu dla transmisji $\pi/8$ D8PSK oraz 64-QAM. Będzie to oznaczać albo konieczność pogodzenia się z faktem, że szybka transmisja danych jest możliwa tylko w pobliżu stacji bazowych, albo konieczność zagęszczenia siatki stacji bazowych, a więc konieczność pozyskiwania nowych obiektów do budowy tych stacji i znaczne koszty, przy niewielkim wykorzystaniu zasobów zbudowanej sieci.

W tym kontekście inicjatywy zmierzające do wykorzystania jako alternatywnych środków komunikacji dla służb bezpieczeństwa i ratownictwa zasobów sieci publicznych, np. w ramach projektu EMTEL, należy śledzić z dużą uwagą [7].

Wykaz akronimów użytych w rozdz. 1

3G	Third generation (system)
AGA	Air Ground Air
BS	Base Station
CEPT	Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications (European Conference of Postal and Telecommunication Administrations)
D8PSK	Differential 8PSK, Differential 8-state Phase Shift Keying
DMO	Direct Mode Operation
DQPSK	Differential Quaternary Phase Shift Keying
ECC	Electronic Communications Committee
EDGE	Enhanced Data for GSM Evolution, zob. EGPRS
EGPRS	Enhanced General Packet Radio Service
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
GPRS	General Packet Radio Service
HSD	High Speed Data Service
IP	Internet Protocol
JPEG	Join Picture Expert Group
LLC	Logical Link Control (sub)layer
MAC	Medium Access Control (sub)layer
MS	Mobile Station
PAMR	Public Access Mobile Radio
PD	Packet Data
PMR	Public Mobile Radio, Professional Mobile Radio

PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
SwMI	Switching and Management Infrastructure
TCH	Traffic Channel
TDMA	Time Division Multiple Access
TEDS	TETRA Enhanced Data Service
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
V+D	Voice + Data
WAP	Wireless Application Protocol

Bibliografia do rozdz. 1

- [1] ETSI TR 102 491 V1.2.1 (2006-05). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); TETRA Enhanced Data Service (TEDS); System reference document.
- [2] Draft ETSI EN 300 392-2 V3.1.1 (2006-09). Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI).
- [3] CEPT/ERC Recommendation 74-01E. Unwanted emissions in the spurious domain.
- [4] ETSI TR 102 512 V1.1.1 (2006-08). Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Security; Security requirements analysis for modulation enhancements to TETRA.
- [5] ETSI TR 102 513 V1.1.1 (2006-12). Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Feasibility Study into the Implications of Operating Public Safety Sector (PSS) TEDS using the proposed "Tuning Range" concept in the 410 MHz to 430 MHz and 450 MHz to 470 MHz frequency bands.
- [6] Informacje TETRA Association MoU oraz z publikacji firm EADS i Motorola.
- [7] Instytut Łączności. Warszawa 2005. Sprawozdanie z pracy 01300025 pt. Prace dotyczące specyfikacji szerokopasmowego, globalnego standardu radiokomunikacji ruchomej dla potrzeb publicznych służb bezpieczeństwa i ratownictwa.

KONIEC

Zakład Systemów Radiowych (Z-1)

Rozdział 2

Badania szerokopasmowych, radiowych systemów
telekomunikacyjnych trzeciej i kolejnych generacji dotyczące użycia
nowych systemów szybkiej transmisji danych

Praca nr 01300016

Warszawa 2006

Spis treści rozdz. 2

ZADANIE 2	3
2.1. Radiowe sieci lokalne o strukturze kratowej	3
2.1.1. Wprowadzenie	3
2.1.2. Problemy dostępu w sieci kratowej	6
2.1.3. Problemy adresowania i wyboru trasy	8
2.1.4. Standardy sieci kratowych WLAN	10
2.1.5. Algorytmy routingu	12
2.1.6. Aspekty bezpieczeństwa	13
2.1.7. Wybrane przykłady zastosowań sieci kratowych	13
2.1.8. Podsumowanie	15
Wykaz akronimów użytych w rozdz. 2.1	16
Bibliografia do rozdz. 2.1	17
2.2. Badania sieci kratowej	18
2.2.1. Wybór urządzeń	18
2.2.2. Oprogramowanie	18
2.2.3. Lokalizacja sieci	22
2.2.4. Opis przeprowadzonych badań	23
2.2.5. Wyniki i wnioski	24
Wykaz akronimów użytych w rozdz. 2.2	36
Bibliografia do rozdz. 2.2	37
2.3. Techniki UWB	38
2.3.1. Definicje sygnału UWB	38
2.3.2. Pojemność systemu UWB	38
2.3.3. Przesłanki rozwoju technik UWB	39
2.3.4. Przepisy FCC USA	41
2.3.5. Regulacje w Europie	44
2.3.6. Zalecenia ITU-R	46
2.3.7. Prace ETSI	47
2.3.8. Impulsowe systemy UWB	50
2.3.9. Modulacje impulsowe UWB	51
2.3.10. Źródła impulsowych sygnałów UWB	53
2.3.11. Anteny do pomiarów UWB	55
2.3.12. Techniki pomiarów UWB	59
2.3.13. Stanowiska pomiarowe UWB	60
2.3.14. Standaryzacja systemów	61
2.3.14.1. Standardy ECMA	61
2.3.14.2. Inne standardy	64
2.3.15. Podsumowanie	65
Wykaz akronimów użytych w rozdz. 2.3	66
Bibliografia do rozdz. 2.3	68

Zadanie 2

Badania szerokopasmowych, radiowych systemów telekomunikacyjnych trzeciej i kolejnych generacji dotyczące użycia nowych systemów szybkiej transmisji danych

2.1. Radiowe sieci lokalne o strukturze kratowej

2.1.1. Wprowadzenie

W radiowych sieciach lokalnych, które w dokumentach organizacji normalizacyjnych są nazywane albo *Radio Local Area Networks (RLAN)*, albo *Wireless Local Area Networks (WLAN)* a przez "zwykłych" użytkowników są utożsamiane z nazwą *Wi-Fi*, są stosowane urządzenia zgodne ze specyfikacjami technicznymi zdefiniowanymi w dokumentach IEEE z serii 802.11. Przegląd podstawowych zagadnień dotyczących właściwości radiowych sieciach lokalnych zawiera opracowanie przygotowane w ramach pracy statutowej IŁ nr 01300015 wykonanej Zakładzie Systemów Radiowych w 2005 r.

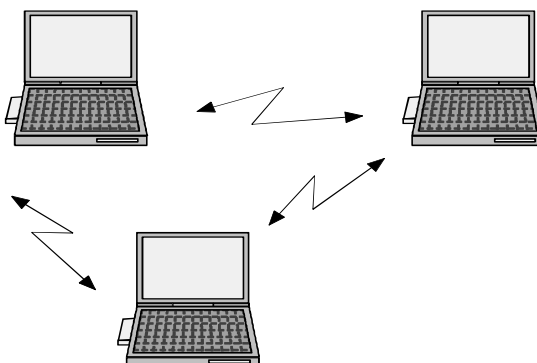
W podstawowej normie IEEE 802.11:1999 i jej uzupełnieniach 802.11a/b/g [1 ÷ 4] zdefiniowano wersje interfejsu radiowego WLAN, różniące się parametrami warstwy fizycznej *Physical layer (PHY)*, takimi jak zakres częstotliwości i rodzaj modulacji, wyposażone we wspólną warstwę dostępu do medium *Medium Access Control (MAC)* opartą na stosowaniu protokołu CSMA/CA *Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance*, w którym stacje radiowe monitorują przydzielony kanał radiowy (medium) i podejmują próbę nadawania tylko wtedy, gdy kanał ten wydaje się wolny. Wspomniane wyżej specyfikacje z serii 802.11 opisują dwie podstawowe konfiguracje radiowej sieci lokalnej:

- sieć organizowaną ad-hoc,
- sieć z infrastrukturą.

Sieć ad hoc (*ad hoc network*), rys. 2.1, jest definiowana jako zbiór stacji ruchomych (węzłów), komunikujących się bezpośrednio pomiędzy sobą (peer-to-peer), tworzących dynamicznie tymczasową sieć, działającą bez wykorzystywania jakiegokolwiek istniejącej infrastruktury sieciowej lub scentralizowanego sterowania. Każde z radiowych urządzeń transmisji danych może automatycznie stać się węzłem sieci radiowej i komunikować się bezpośrednio z innymi kompatybilnymi urządzeniami (węzłami), które są w jego zasięgu. Definicja ta zakłada możliwość dynamicznych zmian struktury sieci i jednocześnie ograniczenie przestrzenne użytecznego obszaru sieci do zasięgu łącza radiowego pomiędzy parą komunikujących się stacji roboczych. Sieć ad-hoc powstaje spontanicznie w celu tymczasowego objęcia zasięgiem ograniczonego obszaru. Zwykle ze względów praktycznych wymaga się także, aby uruchomienie sieci wymagało niewielkiego czasu i było na tyle proste, aby mogły tę sieć uruchomić i używać osoby bez wykształcenia technicznego.

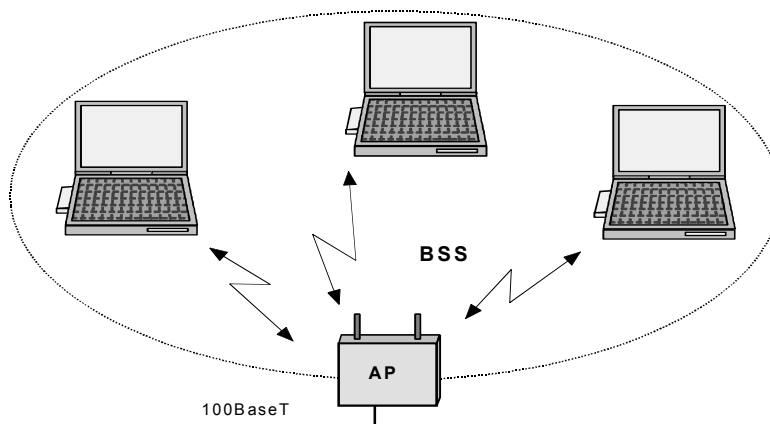
W sieci z infrastrukturą, rys. 2.2, nazywanej w specyfikacji 802.11 *Basic Service Set (BSS)*, jest stosowany stacjonarny punkt dostępowy *Access Point (AP)* przyłączony do lokalnej sieci kablowej, pełniący rolę centralnej jednostki koordynują pracę BSS. Wszystkie urządzenia użytkowników takiej sieci (np. stacje robocze) muszą znajdować się w zasięgu co najmniej jednego AP, a komunikują się pomiędzy sobą oraz z urządzeniami poza obrębem tej sieci (np. ze stacjami przyłączonymi bezpośrednio do sieci kablowej) wyłącznie za pośrednictwem AP. AP i wszystkie urządzenia użytkowników skojarzone z nim w obrębie jednego BSS wykorzystują do nadawania i odbioru ten sam kanał radiowy. W przypadku, gdy radiowa sieć lokalna obejmuje więcej niż jeden AP urządzenie użytkownika sieci może komunikować się z każdym AP należącym do sieci, ale w danym momencie tylko z jednym. Zatem sieć składa

się z obszarów BSS pokrywanych przez poszczególne AP. W każdym z tych obszarów komunikacja odbywa się w trybie punkt do wielu punktów. Mobilność stacji klienckich w BSS jest ograniczona do obszaru zasięgu pojedynczego AP lub kilku AP zapewniających obsługę przenoszenia połączeń (*handover*), np. w obrębie tzw. "hotspot".



Rys. 2.1: Struktura prostej radiowej sieci lokalnej organizowanej ad-hoc

BSS tworzy typową sieć o strukturze gwiazdy, w której AP jest jednostką nadrzędną, komunikującą się z wieloma stacjami użytkowników końcowych. W sieci tej wyróżnia dwa kierunki transmisji – z AP do pozostałych stacji, nazywany "łączeniem w dół" (*downlink, DL*) oraz kierunek odwrotny, nazywany "łączeniem w górę" (*uplink, UL*). W celu unikania kolizji pomiędzy transmisjami stacji rywalizujących o dostęp do wspólnego kanału radiowego jest konieczne stosowanie protokołu wielodostępu.

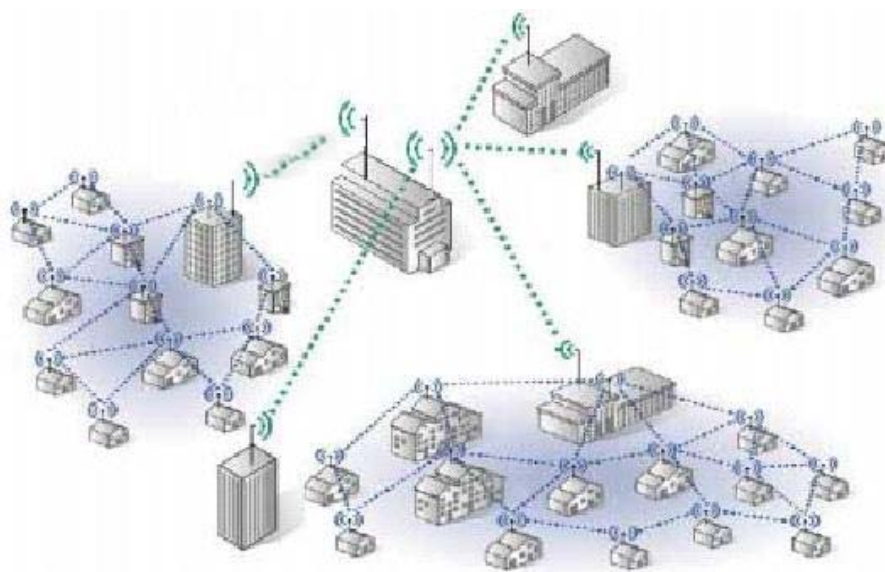


Rys. 2.2: Radiowa sieć lokalna z jednym punktem dostępowym

Istotną cechą tej kategorii sieci radiowych jest konieczność zbudowania infrastruktury, (szkieletu sieci) zwykle kablowej sieci Ethernet opartej na łączach 100BaseT, zapewniającej połączenia pomiędzy AP a siecią światową. Przygotowanie projektu szkieletu sieci, uzyskanie wymaganych aprobat i wykonanie infrastruktury są procesem długotrwałym i kosztownym.

Jeżeli sieć składa się tylko z dwóch współpracujących bezpośrednio urządzeń, to jest zaliczana do sieci typu punkt-punkt (*Point to Point, PP*). Protokół sieci PP może być uproszczony, ponieważ nie musi zawierać elementów obsługi wielodostępu do kanału radiowego. Urządzenia radiowe na obu końcach mają zazwyczaj te same możliwości i podobne funkcje. Łączy PP, nazywane też liniami radiowymi, są stosowane głównie w sieci szkieletowej.

Wielu problemów związanych z użytkowaniem prostych sieci organizowanych ad-hoc (zasięg jednego przęsła komunikacji peer-to-peer, ograniczona pojemność) oraz sieci z infrastrukturą (okablowanie sieciowe i zasilanie AP, procedury administracyjne, czas budowy) można uniknąć wykorzystując radiowe sieci lokalne o strukturze kratowej (*mesh network*), w których poszczególne urządzenia radiowe mogą retransmitować dane przesyłane przez inne urządzenia radiowe sieci, rys. 2.3. W komunikacji z docelowym urządzeniem radiowym (żądaną stacją kliencką – węzłem końcowym) może pośredniczyć wiele urządzeń radiowych (węzłów) nie przyłączonych do sieci kablowej i AP przyłączone do sieci kablowej. Sieć kratowa jest siecią o strukturze wiele punktów do wielu punktów. Teoretycznie w sieci kratowej powinna istnieć możliwość wyboru co najmniej dwóch różnych dróg do węzła przeznaczenia. Technika ta pozwala na szybkie zorganizowanie sieci wewnątrz i na zewnątrz budynków także w przypadku potrzeb doraźnych, takich jak stworzenie sieci dla obsługi imprezy lub na miejscu akcji ratunkowej.



Rys. 2.3: Przykład zastosowania sieci kratowych w radiowej sieci dostępowej

Jako istotne zalety radiowych sieci kratowych wymienia się:

- możliwość dowolnego zwiększenia zasięgu (wykorzystanie wielu przęseł – "skoków" od węzła do węzła),
- istnienie alternatywnych dróg transmisji do wykorzystania w przypadku uszkodzenia lub pogorszenia parametrów drogi podstawowej,
- możliwość uzyskania zasięgu NLOS (zastosowanie dodatkowego węzła dla ominięcia przeszkody).

Natomiast jako wady należy traktować:

- zwiększenie opóźnienia ze względu na wiele skoków, które może osiągać wartości nie tolerowane przez niektóre aplikacje,
- skomplikowanie protokołu (dodatkowe funkcje związane z definiowaniem dostępu do sieci i wyborem trasy),
- złożoność planowania pokrycia.

W sieciach o prostej strukturze punkt do punktu oraz punkt do wielu punktów (PMP) protokoły komunikacji dotyczą jedno przęsła – nie istnieje problem wyboru drogi przesyłania wiadomości. Natomiast protokoły sieci kratowej oprócz podstawowych funkcji związanych

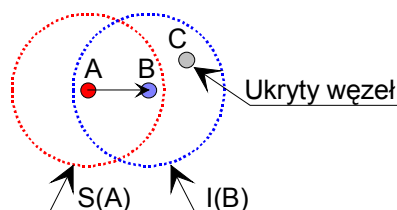
z obsługą łącza radiowego i dostępem do kanału radiowego muszą nadzorować ruting (wybór dróg transmisji), reagować na mobilność i uszkodzenia węzłów lub występowanie zakłóceń, z tego względu są bardziej skomplikowane, niż protokoły sieci PMP.

2.1.2. Problemy dostępu w sieci kratowej

W standardowej sieci 802.11 za kontrolę przepływu danych odpowiada funkcja DCF (*Distributed Coordination Function*) wykorzystująca mechanizm wielodostępu znany jako CSMA/CA, który powinien być implementowany we wszystkich radiowych stacjach sieci (STA). Każda STA przed nadawaniem powinna sprawdzić kanał, aby określić, czy inna STA nadaje. Jeżeli badanie kanału przez określony przedział czasu nie wykaże zajętości stacja może przystąpić do nadawania. Jeżeli kanał jest zajęty stacja powinna odczekać do zakończenia trwającej transmisji. Po jej zakończeniu ponownie sprawdza zajętość kanału [IEEE 802.11 rozdz. 9.2]. Udoskonaleniem tej metody jest wymiana krótkich ramek sterujących RTS / CTS (*Request to Send / Clear to Send*) po każdym ustaleniu, że kanał jest wolny lub po każdym okresie oczekiwania na zakończenie innej transmisji, a przed transmisją danych.

Sprawność transmisji przez poszczególne węzły sieci kratowej jest związana z efektywnym rozwiązaniem problemów dotyczących bezkolizyjnego dostępu do kanałów radiowych. W przypadku protokołu MAC opartego tylko na obserwacji zajętości kanału mogą wystąpić dwa efekty powodujące obniżenie wydajności sieci:

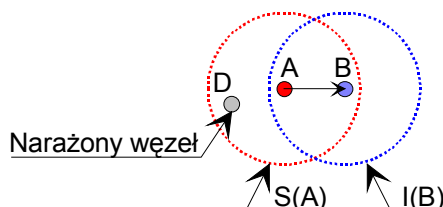
- tzw. problem ukrytego węzła (*hidden node, hidden terminal*),
- tzw. problem narażonego węzła (*exposed node, exposed terminal*).



Rys. 2.4: Problem ukrytego węzła

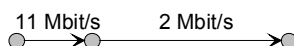
Problem ukrytego węzła zilustrowano na rys. 2.4 na przykładzie trzech węzłów sieci A, B i C. Jako $S(A)$ zaznaczono obszar, na którym jest wykrywana aktywność nadajnika A, a jako $I(B)$ obszar, na którym odbiornik B wykrywa transmisje nadajników. Ukrytymi węzłami dla transmisji z węzła A do B są te, które są wewnątrz obszaru $I(B)$, ale poza obszarem $S(A)$. Np. jeżeli istnieje transmisja pomiędzy nadajnikiem A i odbiornikiem B, to węzłem ukrytym C jest taki, w którego zasięgu zakłóceńowym znajduje się odbiornik B, ale którego transmisja nie jest wykrywana przez A. W tej sytuacji nadajnik A nie może wykryć istnienia C, ale transmisja nadajnika C może zakłócać odbiornik B i przerwać komunikację między A i B. Problem ten występuje również w sieciach konwencjonalnych (BSS) zarządzanych przez punkt dostępowy, zgodnych ze specyfikacjami serii 802.11, gdzie w celu unikania takich kolizji zaprojektowano protokół do wymiany sygnałów RTS/CTS. Protokół ten jest przydatny do zmniejszenia zakłóceń w sieciach z jednym przęsłem ($A \leftrightarrow B$), gdzie w sąsiedztwie (odległość dwóch przęseł $A \leftrightarrow B \leftrightarrow C$) może wystąpić węzeł zakłócający. W sieci kratowej, gdzie ukryty węzeł może być w odległości większej niż dwa przęsła, protokół RTS/CTS nie będzie użyteczny. Jednocześnie prawdopodobieństwo pojawienia się ukrytego węzła w sieci kratowej jest duże, a skutki zakłócenia pracy węzła, który jest jednym z ogniw łańcucha węzłów pośredniczących w przesyłaniu strumieni danych, mogą dotyczyć transmisji z wielu źródeł i do wielu adresatów.

Problem narażonego węzła zilustrowano na rys. 2.5 na przykładzie trzech węzłów sieci A, B, i D. Oznaczenia obszarów $S(A)$ i $I(B)$ są takie jak na rys. 2.4. Narażonymi węzłami przy transmisji z węzła A do B są te, które są wewnątrz obszaru $S(A)$, ale poza obszarem $I(B)$. W tym przypadku węzeł D mógłby nadawać do dowolnego węzła poza strefą $S(A)$ nie zakłócając komunikacji z A do B, ale protokół MAC zdefiniowany w specyfikacji IEEE 802.11 w tej sytuacji zabrania transmisji z D, gdy A nadaje do B. Wskutek tego zasoby sieci nie są efektywnie wykorzystane.



Rys. 2.5: Problem narażonego węzła

Innym problemem, który należy odnotować w związku z projektowaniem sieci kratowych jest wymagana przepływność^{/*} łączy i węzłów pośredniczących. W przypadku zilustrowanym na rys. 2.6 o maksymalnej przepływności transmisji pomiędzy węzłami końcowymi decyduje łącznie, w którym jest uzyskiwana najmniejsza szybkość.



Rys. 2.6: Ograniczenie przepływności łączy z wieloma przesłami

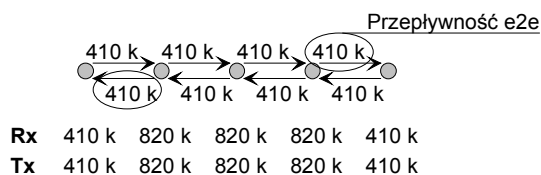
Należy zauważyć, że funkcje DCF (*Distributed Coordination Function*) zdefiniowana w standardzie IEEE 802.11 [1] oraz EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*) zdefiniowana w standardzie IEEE 802.11e [5] odnoszą się tylko do transmisji między zakończeniami jednego przesła^{/*}. Zatem funkcje DCF i EDCA mogą być użyte do w dostępie do kanału na zasadzie od węzła do węzła, ale nie są przeznaczone do organizowania transmisji strumienia danych pomiędzy źródłem a węzłem końcowym w sieci kratowej. W tej sytuacji nadajnik może posyłać więcej informacji niż odbiornik może przyjąć (i posłać dalej) i wykorzystanie zasobów sieci nie jest optymalne.

Ponieważ funkcje DCF i EDCA zaprojektowano dla sieci składającej się z pojedynczej komórki, gdzie kolizje występują w otoczeniu (odległości) jednego przesła od punktu dostępowego, to w przypadku zastosowania tych protokołów w sieci kratowej każdy węzeł biorący udział w transmisji rozwiązuje problem indywidualnie i lokalnie, bez uwzględnienia informacji o drodze od końca do końca. Zatem transmisja informacji od końca do końca na ogół mogłaby być bardziej efektywna.

W tym miejscu należy podkreślić, rys. 2.7, że węzły pośredniczące muszą nadawać (Tx) i odbierać (Rx) z szybkością co najmniej dwukrotnie większą niż przepływność wymagana pomiędzy węzłami końcowymi (*end-to-end*, *e2e*). Zatem natłok w węzłach pośredniczących może ograniczać przepływność pomiędzy węzłami końcowymi.

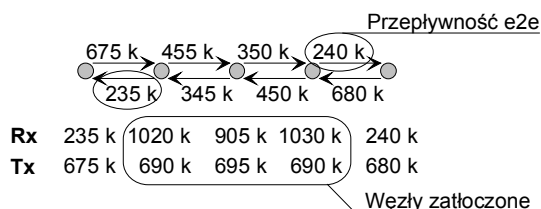
^{/*} Przepływność (*throughput*) – średnia ilość danych przenoszonych przez urządzenie (punkt dostępu lub terminal) lub łącznie w ciągu sekundy. Uśrednienie dotyczy długiego czasu.

^{/*} DCF jest funkcją sieci, której elementy logiczne są aktywne w każdej stacji WLAN wchodzącej w skład BSS. EDCA jest funkcją implementowaną w stacjach i punktach dostępowych obsługujących mechanizmy QoS, która określa kiedy ramka w kolejce do nadawania, skojarzona z określoną kategorią priorytetu, zostanie dopuszczona do nadawania.



Rys. 2.7: Przepływność węzłów pośredniczących łączy z wieloma przesłami

W specyfikacji IEEE 802.11e definiującej QoS pomiędzy AP i stacją kliencką wprowadzono mechanizmy kontroli przyjmowania danych (*admission control*). Podobne mechanizmy powinny być zastosowane w sieci kratowej w celu zapewnienia, że wszystkie węzły wzdłuż drogi składającej się z wielu przesł mogą przyjąć przesyłany strumień danych. Ponieważ w sieci z wieloma przesłami, jak pokazano na rys. 2.8, na skutek braku scentralizowanego sterowania przepływem i w wyniku nieuniknionych kolizji, przepływność pomiędzy punktami końcowymi łączy, może zależeć od kierunku transmisji i może być znacznie mniejsza niż szybkość nadawania poszczególnych węzłów (np. ok. 235 kbit/s dla transmisji e2e w porównaniu z szybkością nadawania rzędu 700 kbit/s).



Rys. 2.8: Przepływność węzłów realizujących łączy z wieloma przesłami

W sieci kratowej powinno być możliwe rozróżnianie dwóch rodzajów ruchu:

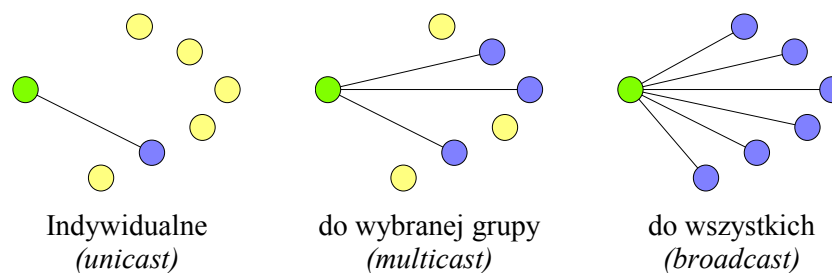
- ruchu, którego źródłem jest aplikacja skojarzona z danym węzłem (np. transmisja wideo z kamery cyfrowej dołączonej do danej stacji końcowej),
 - ruchu retransmitowanego pochodzącego od i kierowanego do innych węzłów sieci,
- i osobne definiowanie QoS dla tych rodzajów ruchu. W związku z tym korzystne może być stosowanie urządzeń wyposażonych w kilka zespołów nadawczo-odbiorczych, osobnych dla tych rodzajów ruchu.

Wymagania określające minimalną akceptowalną przepływność i maksymalne dopuszczalne opóźnienia w praktyce będą wyznaczać maksymalna liczba przesł, przy której system może gwarantować spełnienia wymagań.

2.1.3. Problemy adresowania i wyboru trasy

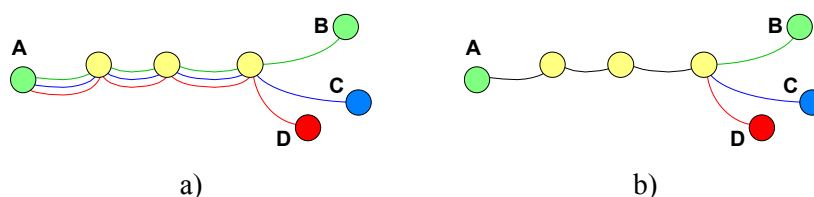
W sieci można wyróżnić trzy podstawowe sposoby adresowania wiadomości, rys. 2.9:

- adresowanie indywidualne do pojedynczej stacji (*unicast* w odróżnieniu od *broadcast* lub *multicast*), tryb pracy typowy dla przesyłania strumieniowego (*streaming*).
- adresowanie do wybranej grupy stacji (*multicast*),
- adresowanie do wszystkich stacji (*broadcast*) – użycie szczególnego adresu grupowego.



Rys. 2.9: Sposoby adresowania wiadomości

Prosty przykład wskazujący potrzebę optymalizacji transportu pakietów w sieci z wieloma węzłami ilustruje rys. 2.10. Tę samą wiadomość z węzła A adresowaną do trzech węzłów końcowych (B, C i D) można posłać trasą przez trzy węzły pośrednie trzy razy – jak na rys. 2.10 a), albo tylko raz – jak na rys. 2.10 b), uzyskując przy tym mniejsze obciążenie sieci i mniejsze średnie opóźnienie. Zatem dostarczanie wiadomości do grupy węzłów przeznaczenia wymaga poszukiwania najbardziej efektywnej strategii dostarczenia wiadomości przez każde łącze sieci tylko raz i tworzenie kopii, gdy łącza do miejsc przeznaczenia się rozgałęziają. W sieci IP adresowanie grupowe (*IP multicast*) polega na funkcjach ruterów, które tworzą optymalne drzewo dróg dystrybucji dla pakietów przesyłanych na dany adres.



Rys. 2.10: Optymalizacja transportu wiadomości

Tylko węzły kraty, które są w zasięgu bezpośredniej łączności mogą zestawiać bezpośrednie łącze pomiędzy sobą. Natomiast węzły, które są poza wzajemnym zasięgiem do komunikacji muszą korzystać z funkcji routingu, które powinny:

- pozwalać na dynamiczne tworzenie i utrzymanie tablic routingu w węzłach obsługujących retransmisję wiadomości,
- stosować algorytm eliminujący pętle,
- umożliwiać tworzenie drogi na żądanie,
- umożliwiać tworzenie różnych scenariuszy routingu dla różnych scenariuszy wykorzystania sieci.

Ze względu na specyfikę radiowych sieci kratowych związaną z następującymi cechami:

- węzły mogą przemieszczać się dowolnie,
- zmiany konfiguracji są szybkie i nieprzewidywalne,
- węzły mogą być okresowo nieaktywne (uśpione) realizując procedury oszczędnego zasilania,
- przewidywany czas pracy węzła może być ograniczony np. ze względu na zasilanie bateryjne,

routing w tych sieciach powinien polegać na zdecentralizowanych algorytmach adaptacyjnych.

Rozpoznawanie struktury (topologii) sieci może być:

- aktywne, oparte na wysyłaniu sondujących wiadomości (szybka identyfikacja aktywnych węzłów i dołączenie do sieci),
- pasywne, oparte na skanowaniu kanału (oszczędne użycie energii, przydatne dla sieci stacjonarnych lub z małą mobilnością).

Utrzymanie komunikacji z siecią może być:

- pasywne, polegające na odbiorze sygnałów rozpoznawczych (*beacon messages*) poszczególnych węzłów;
- aktywne, konieczne w przypadku mobilności, polegające na wysłaniu sondującej wiadomości do nowego węzła obsługującego (AP lub MP).

2.1.4. Standardy sieci kratowych WLAN

Kilka przedstawionych tu problemów dowodzi, że mechanizmy zdefiniowane w opublikowanych dotychczas specyfikacjach IEEE z serii 802.11 [1 ÷ 5] dla zastosowań w sieciach sterowanych centralnie przez punkty dostępowe, nie wystarczają do rozwiązania problemów transmisji w sieciach kratowych. Konieczne jest opracowanie nowych standardów uwzględniających specyfikę sieci kratowych. Zaplanowana jako dokument o symbolu 802.11s [6] specyfikacja IEEE dotycząca WLAN o strukturze kratowej jest we wstępnej, koncepcyjnej fazie opracowania – podstawowe założenia tego projektu przyjęto dopiero w marcu 2006 r. Oprócz zapewnienia interoperacyjności urządzeń i bezpieczeństwa transmisji radiowej pomiędzy węzłami kraty, zaplanowano mobilność punktów dostępowych WLAN, aby umożliwić tworzenie aplikacji wymagających mobilnej infrastruktury.

Na rys. 2.11 przedstawiono model warstwowy protokołów węzła sieci kratowej proponowany w projekcie IEEE 802.11s. Warstwa fizyczna (PHY) pozostaje zgodna z odpowiednią specyfikacją IEEE 802.11 a/b/g/n. Zmodyfikowana warstwa dostępu do medium IEEE 802.11 MAC powinna zostać wyposażona w funkcje koordynacji dostępu do medium w sieci kratowej (*Mesh Media Access Coordination Function*) oraz protokoły odpowiedzialne za:

- monitorowanie zajętości kanałów radiowych (*Mesh Network Measurement*),
- ruting i wysyłanie pakietów na poziomie warstwy 2 (*Layer 2 Mesh Routing and Forwarding*),
- bezpieczeństwo sieci kratowej (*Mesh Security*).

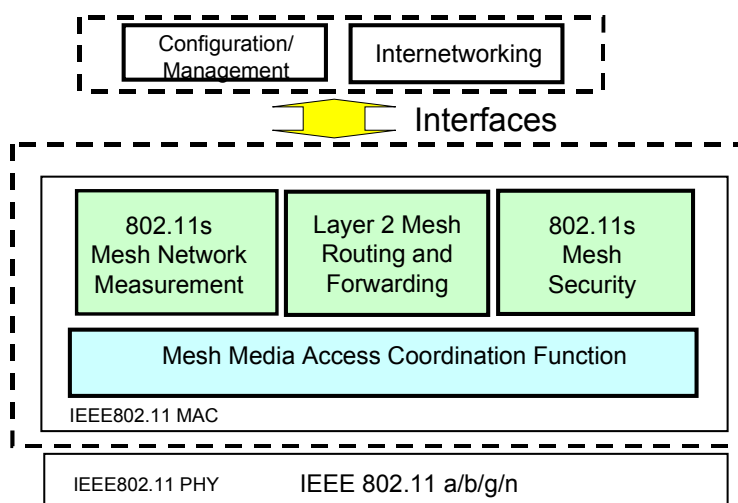
W proponowanym modelu założono, że za zarządzanie konfiguracją sieci i współpracę odpowiedzialne są wyższe warstwy sieci

Rozważa się pięć podstawowych przypadków (scenariuszy) stosowania kratowych sieci WLAN dla potrzeb:

- środowiska mieszkalnego (residential),
- środowiska biurowego,
- bezpieczeństwa publicznego,
- wojska,
- kampusów, zbiorowego lub publicznego dostępu.

Zatem zakłada się, że w standardzie IEEE 802.11s znajdą się rozwiązania odpowiednie do stosowania w domowych sieciach dystrybucji wideo i w sieciach na polu walki.

Należy podkreślić, że aktualna oferta przemysłu zakresie urządzeń do budowy sieci kratowych wyprzedza prace standaryzacyjne IEEE. W IV kwartale 2005 r. i w 2006 r. w ofercie wielu firm pojawiły się urządzenia WLAN zgodne ze specyfikacjami IEEE 802.11a/b/g umożliwiające budowę sieci kratowych dla potrzeb cywilnych, tym samym umożliwiające obsługę komputerów wyposażonych w karty Wi-Fi.



Rys. 2.11: Model warstwowy protokółów węzła kraty

Przykłady wykorzystania urządzeń WLAN w sieciach kratowych opisano w punkcie 2.1.7. Wyniki badań wybranych produktów przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy statutowej przedstawiono w rozdz. 2.2.

Skutkiem braku uzgodnionych dokumentów normalizacyjnych jest przede wszystkim brak kompatybilności pomiędzy systemami oferowanymi przez różnych producentów urządzeń sieciowych [7]. Konsekwencją jest również nieznormalizowane, środowiskowe słownictwo używane w publikacjach dotyczących radiowych sieci kratowych. Poniżej zaproponowano kilka podstawowych określeń, ale należy mieć świadomość, że te same określenia używane przez różnych autorów mogą mieć odmienne znaczenie.

- ♦ Stacja (STA) WLAN – każde urządzenie, które jest wyposażone w interfejs radiowy zgodny ze specyfikacją warstwy fizycznej (*Physical Layer, PHY*) oraz warstwy dostępu do medium (*Medium Access Control, MAC*) zdefiniowaną w normach z serii IEEE 802.11.
- ♦ Węzeł (*mesh node, mesh point, MP*) sieci kratowej – urządzenie, wyposażone w interfejs radiowy zgodny ze specyfikacją zdefiniowaną w normach z serii IEEE 802.11, retransmitujące (pośredniczące) odebrane dane do innych węzłów sieci.

Węzeł sieci kratowej może jednocześnie obsługiwać dwa rodzaje ruchu:

- ruch lokalny do/od stacji klienckich skojarzonych z tym węzłem;
- ruch przekazywany od innych węzłów sieci kratowej.

- ♦ Punkt dostępowy sieci kratowej (*mesh access point, AP*) – urządzenie, wyposażone w interfejs radiowy zgodny ze specyfikacją zdefiniowaną w normach z serii IEEE 802.11, mające dostęp do sieci kablowej, które pośredniczy w przesyłaniu danych pomiędzy stacjami końcowymi (użytkowników sieci). Czyli każda stacja radiowej sieci lokalnej, która ma dostęp do sieci kablowej, np. Ethernetu, która za pośrednictwem komunikacji radiowej zapewnia dołączonym stacjom wzajemną komunikację.
- ♦ Klaster sieci kratowej (*mesh cluster*) – fragment radiowej sieci lokalnej składający się z punktu dostępowego i wszystkich węzłów kierujących ruch za jego pośrednictwem do sieci kablowej.

- ◆ Przeszło sieci kratowej (*mesh link*) – bezpośrednie łącze radiowe pomiędzy dwoma punktami kraty.
- ◆ Trasa lub droga (*mesh path*) – zbiór przesył w sieci kratowej od węzła, który jest źródłem do węzła przeznaczenia.
- ◆ Ruter WLAN jest urządzeniem, lub oprogramowaniem, które w oparciu o informacje o stanie sieci określa następny węzeł sieci, do którego powinny być przesłane pakiety w drodze do miejsca przeznaczenia. W warstwowym modelu OSI ruting jest funkcją skojarzoną z warstwą sieciową (trzecią). Ruter może występować w sieci ad-hoc i w sieci z infrastrukturą.

Ruter może tworzyć i utrzymywać tablicę dostępnych tras oraz ich stanu i algorytm wyboru najlepszej trasy dla danego pakietu. Pakiet zanim dotrze do węzła przeznaczenia może być przesyłany przez wiele węzłów spełniających funkcje ruterów. W każdym momencie status łącza pomiędzy ruterami jest funkcją ich położenia, mocy nadajników, charakterystyk anten, parametrów odbiorników, zakłóceń wspólnokanałowych i in. Funkcje ruterów są ściśle związane ze zdefiniowanym protokołem. Jednym z podstawowych problemów jest sposób adresowania pakietów dla potrzeb transmisji, w której może uczestniczyć wiele węzłów pośredniczących.

2.1.5. Algorytmy routingu

Istnieje obszerna bibliografia prac teoretycznych nt. algorytmów routingu w radiowych sieciach ad hoc z wieloma przesłami. Wiele z nich dotyczy działania sieci w warunkach quasi-statycznych i/lub ustala tylko jedną drogę dla każdej pary węzłów (źródło / miejsce przeznaczenia) a to wiąże się m.in. z problemem przeciążania łącza. Algorytmy wytyczające drogi alternatywne, polegające na analizie stanu wszystkich łączy, wymagają aktualnej wiedzy o stanie każdego ruterów, a narzut potrzebny do przesyłania tych informacji i czas wymagany do ich przesyłania powodują, że są mało przydatne do zastosowań praktycznych.

Przykładem protokołu routingu z adresowaniem indywidualnym (*unicast*) opracowanego do stosowania w radiowych sieciach ad-hoc obejmujących do ok. 200 ruchomych węzłów jest protokół DSR (*Dynamic Source Routing Protocol*), zdefiniowany w zaleceniu RFC 4728 [8]. Sieć, w której jest stosowany protokół DSR sama się konfiguruje i organizuje. Protokół składa się z dwóch podstawowych mechanizmów: znajdowania trasy (*route discovery*) i utrzymania trasy (*route maintenance*), które umożliwiają węzłom sieci ad-hoc ustalenie tras transmisji do dowolnego miejsca przeznaczenia.

Mechanizm znajdowania trasy jest wykorzystywany przez węzeł nadawcy (S), który zamierza przesłać pakiet do węzła przeznaczenia (D), ale nie znał poprzednio trasy do D. Mechanizm utrzymania trasy pozwala, aby węzeł S wykorzystujący trasę do D mógł wykryć, że nie może jej dłużej wykorzystywać, gdyż łącze zostało przerwane. Gdy używane łącze nie działa, S może próbować wykorzystać inną znaną mu trasę prowadzącą do D, albo wywołać znajdowanie trasy dla kolejnych pakietów kierowanych do D. Mechanizm utrzymania trasy z S do D jest aktywny tylko wtedy, gdy S przesyła pakiety do D.

Protokół DSR dopuszcza wykorzystywanie wielu tras do określonego węzła przeznaczenia i pozwala, aby każdy nadawca wybierał i kontrolował trasy swoich pakietów np. ze względu na równomierne obciążenie sieci lub zwiększenie odporności. Inne możliwości DSR, to:

- ruting bez pętli,
- praca w sieci z łączami jednokierunkowymi,
- szybkie przywracanie działania, jeżeli trasy w sieci uległy zmianie.

Protokół DSR zdefiniowany w dokumencie RFC 4728, w odróżnieniu od wielu innych protokółów sieci ad-hoc, nie wykorzystuje okresowego ogłaszania tras, monitorowania statusu łącza lub detekcji sąsiedztwa.

W protokole TORA (*Temporally-Ordered Routing Algorithm*) [9] można wyodrębnić trzy funkcje:

- Query (QRY), służącą do wyznaczania tras (ustalenia sekwencji transmisji pomiędzy kolejnymi węzłami prowadzącej od źródła do miejsca przeznaczenia);
- Update (UPD), służącą do zachowania dróg (aktualizacja i ponowne ustalanie dróg);
- Clear (CLR), zdefiniowaną do kasowania dróg (na skutek detekcji podziału sieci wszystkie łącza należy przeanalizować w celu kasowania dróg nieistniejących).

W przypadku algorytmu TORA zmiana struktury sieci jest lokalizowana, a reakcja na zmianę ma charakter lokalny, obejmuje tylko węzły z najbliższego sąsiedztwa. W sieci z wykorzystaniem protokołu niezależnego od struktury sieci są okresowo są rozsyłane wiadomości o aktualnej strukturze.

2.1.6. Aspekty bezpieczeństwa

Przypadek sieci kratowej, której węzły mogą obsługiwać stacje klienckie i retransmitować ruch pochodzący z lub kierowany do innych węzłów komplikuje koncepcje bezpieczeństwa sieci. Proponuje się na przykład, że uwierzytelnienie stacji klienckiej (STA) może być realizowane przez węzeł sieci (MP), z którym jest skojarzona, a uwierzytelnienie węzła sieci (MP), przez inny węzeł sieci lub punkt dostępowy (AP), z którym przystępujący do sieci MP ma być skojarzony.

Wymagane atrybuty bezpieczeństwa powinny być zachowane podczas połączenia obejmującego wiele przęseł. W związku z tym możliwe są różne scenariusze szyfrowania transmisji:

- szyfrowanie w każdym przęśle,
- szyfrowanie w segmentach sieci,
- szyfrowanie end-to-end.

Można rozważać, czy węzły pośrednie powinny sprawdzać integralność danych, jeśli tak to należy przewidywać duże obciążenie każdego węzła koniecznymi obliczeniami.

Kolejnym problemem jest dystrybucja kluczy szyfrowania, zwłaszcza w sieci, w której dopuszcza się ruchome MP.

2.1.7. Wybrane przykłady zastosowań sieci kratowych

Informacje o praktycznym wykorzystaniu radiowych sieci kratowych dotyczą głównie zastosowań militarnych i specjalnych, takich jak systemy dla służb bezpieczeństwa i ratownictwa. Poniżej omówiono trzy rozwiązania charakteryzujące kierunki prac prowadzonych na świecie.

MeshNetworks Enabled Architecture (MEA) jest opracowanym przez firmę Motorola systemem dla łączności na polu walki, który obecnie jest również oferowany w wersji dla potrzeb służb ratowniczych. W systemie MEA do tworzenia skalowalnej, szerokopasmowej sieci radiowej są wykorzystywane dwa rodzaje łączy radiowych:

- infrastruktura sieci kratowej (*infrastructure meshing*), która tworzy radiową sieć szkieletową pomiędzy punktami dostępu do sieci kablowej (*Wired Access Point*) i radiowymi ruterami (*Wireless Routers*). Infrastruktura ta w porównaniu z infrastrukturą

konwencjonalną obsługującą ten sam obszar umożliwia zwiększenie zasięgu i niezawodności sieci przy zredukowaniu kosztów.

- kratowa sieć kliencka (*client meshing*), tworzona przez urządzenia użytkowników końcowych (klienckie) na zasadzie sieci peer-to-peer, która do działania nie wymaga obecności infrastruktury sieciowej. W sieci tego rodzaju informacja adresowana do danego klienta może być przesłana za pośrednictwem innych klientów.

W sieci MEA stacje klienckie mogą tworzyć sieci peer-to-peer w dowolnym miejscu i w dowolnym czasie. Mogą się przemieszczać pomiędzy sieciami korzystając z infrastruktury lub innych urządzeń klienckich. Inteligencja sieci umożliwia automatyczną rekonfigurację i samonaprawianie oraz równomierny rozkład ruchu pomiędzy poszczególnymi punktami dostępowymi. Wymiana danych w tym trybie zmniejsza zapotrzebowanie na usługi punktów dostępowych uwalniając ich pojemność dla innych użytkowników. Ta technika pozwala na budowę radiowych LAN i WAN niskim kosztem. Mechanizm nazwany "Motorola Multi-Hopping" zastosowany w opisywanym rozwiązaniu pozwala wykorzystywać każde urządzenie klienckie jako ruter/repeater. Na skutek tego, gdy użytkownik dołącza się do sieci pojemność i zasięg sieci rosną.

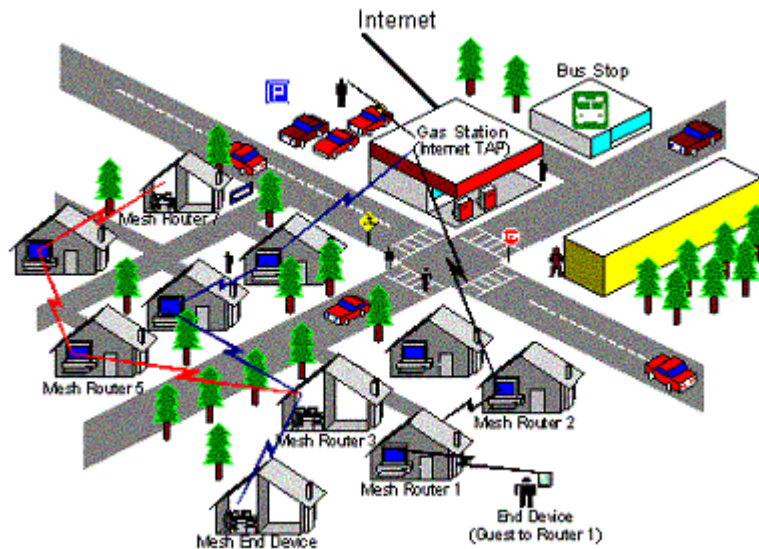
Innym przykładem zastosowań sieci kratowych są produkty firmy Proxim przeznaczone do stosowania przede wszystkim w miejskich sieciach dla potrzeb bezpieczeństwa. Np. ORINOCO Mesh Creation Protocol (OMCP) umożliwia tworzenie samokonfigurujących się sieci kratowych bez bezpośredniej widoczności (NLOS). W systemie zastosowano urządzenia wyposażone w dwa radiowe zespoły nadawczo-odbiorcze, jeden jest przeznaczony dla realizacji dostępu Wi-Fi, a drugi tworzy sieć szkieletową. Zarządzanie jakością QoS umożliwia transmisję głosu i wideo. Zastosowany protokół realizuje dynamicznie zmianę tras ruchu w przypadku uszkodzenia węzła sieci.

Firma Microsoft pracuje nad projektem, nazwanym "self-organizing neighborhood wireless mesh networks" [10], którego celem jest stworzenie systemu, który umożliwiałaby połączenie sąsiadom ich domowych radiowych sieci lokalnych w jedną wspólną sieć o strukturze kratowej. Wskazuje się na korzyści wynikających z tworzenia tego rodzaju zbiorowych sieci. Np. jeżeli dostatecznie duża liczba sąsiadów zdecyduje się na to rozwiązanie, to aby wszystkim oferować szybki dostęp do Internetu wystarczą pojedyncze łącza T1 (lub E1) doprowadzone do jednego punktu osiedla, por. rys. 2.12, co jest rozwiązaniem tańszym i prostszym niż tradycyjny sposób polegający na doprowadzaniu do wszystkich posesji indywidualnych kablowych łączy internetowych. Jednakże stosowanie tego rodzaju zbiorowych sieci konkurujących z indywidualnymi łączami DSL, napotyka wiele problemów związanych z uzyskaniem zasięgu transmisji i wymaganej pojemności, zapewnieniem prywatności i bezpieczeństwa, sprawną autokonfiguracją sieci, rutingiem, przydziałem pasma itd. Oprócz tych zasadniczych problemów technicznych istotne są także aspekty ekonomiczne i socjalne.

W pilotowej sieci Microsoft dla potrzeb pomiaru jakości i routingu pakietów zastosowano moduł Mesh Connectivity Layer (MCL). MCL jest sterownikiem (driver) uzupełniającym system operacyjny Microsoft Windows, spełniającym funkcje adaptera sieci wirtualnej, wskutek tego reszta sieci ad-hoc jest traktowana jak dodatkowe łącze sieciowe. MCL określa trasy pakietów używając protokołu dla komunikacji komputerów w sieciach kratowych nazwanego Link Quality Source Routing (LQSR). LQSR jest zmodyfikowaną wersją protokołu DSR, por. p. 2.1.5.

LQSR identyfikuje wszystkie węzły w radiowej sieci kratowej, a do łączy pomiędzy węzłami przydziela współczynniki wagi, a oprócz tego dla każdego łącza określa parametry (numer kanału, pasmo, tłumienie). Te informacje są rozsyłane do wszystkich węzłów. LQSR

wykorzystuje je do obliczenia miary oczekiwanego czasu transmisji nazwanej Weighted Cumulative Expected Transmission Time (WCETT), która umożliwia wskazanie najlepszej trasy dla transmisji danych z danego źródła do danego miejsca przeznaczenia. Trasa ta może składać się z wielu przęseł. Jeżeli optymalna trasa pomiędzy określonymi źródłem i przeznaczeniem ulega zmianie, LSQR automatycznie modyfikuje trasę bez przerywania komunikacji pomiędzy węzłami.



Rys. 2.12: Osiedlowa sieć kratowa realizująca dostęp do Internetu [10]

MCL pośredniczy pomiędzy warstwą 2 (warstwą łącza danych) a warstwą 3 (warstwą sieciową). Przez oprogramowanie wyższych warstw MCL mimo, że jest łączem wirtualnym jest traktowane jako jeszcze jedno łącze Ethernet. Dla warstw niższych MCL jest jeszcze jednym protokołem korzystającym z warstwy fizycznej. Takie rozwiązanie ma następujące zalety:

- aby działało w sieci ad-hoc oprogramowanie wyższych warstw nie wymaga modyfikacji;
- MCL jako wirtualny adapter sieci może multipleksować kilka fizycznych adapterów sieciowych, zatem sieć może wykorzystywać różne łącza fizyczne (np. Wi-Fi, WiMAX);
- może obsługiwać także inne protokoły routingu.

2.1.8. Podsumowanie

Radiową sieć kratową można zobrazować jako zbiór punktów dostępowych, ruterów i urządzeń końcowych (wyposażonych w radiowe urządzenia nadawczo-odbiorcze), które mogą się swobodnie przemieszczać. Droga pomiędzy węzłem wysyłającym a węzłem przeznaczenia może składać się z wielu przęseł (skoków od węzła do węzła). Wszystkie urządzenia muszą obsługiwać ten sam protokół przyłączenia do sieci i opuszczenia sieci radiowej.

Adresowanie IP w sieci kratowej powinno uwzględniać dynamiczne zmiany konfiguracji. Nowe urządzenie zanim zostanie przyłączone do sieci powinno uzyskać unikalny adres w obrębie tej sieci. Dla urządzeń, które rzadko (lub wcale) zmieniają lokalizację adres może być stały (statyczny), np. most (bridge) pomiędzy siecią kablową i radiową.

Sieć kratowa spełnia dwie funkcje:

- tworzy radiową sieć dostępową na stosunkowo dużym obszarze,
- tworzy radiową sieć szkieletową.

Punkty dostępowe sieci kratowej zapewniają obsługę urządzeń klienckich oraz połączenie radiowe z innymi punktami dostępowymi (funkcje sieci szkieletowej).

Zatem w sieci kratowej konieczny jest protokół różniący się od stosowanych w sieciach ze scentralizowanym zarządzaniem. Należy zakładać następujące fazy włączania stacji do pracy w sieci kratowej:

- wykrycie sieci kratowej,
- ustanowienie połączenia (uwierzytelnienie w sieci, asocjacja w sieci),
- normalne działanie (funkcja koordynacji dostępu do medium w sieci kratowej).

Wprowadzenie sieci kratowych wymaga rozwiązania wielu problemów:

- automatycznej konfiguracji (rekonfiguracji),
- routingu (w warstwach wyższych opartego na adresowaniu IP i ewentualnie w warstwie MAC opartego na adresach sprzętowych),
- QoS,
- bezpieczeństwa,
- zagadnień zasilania węzłów.

Wykaz akronimów użytych w rozdz. 2.1

AP	Access Point
BSS	Basic Service Set
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear to Send
DCF	Distributed Coordination Function
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector
DSL	Digital Subscriber Line
DSR	Dynamic Source Routing Protocol
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
IP	Internet Protocol
MAC	Medium Access Control
MCL	Mesh Connectivity Layer (Microsoft)
MEA	MeshNetworks Enabled Architecture (Motorola)
MP	Mesh Point, Mesh Node
NLOS	Non Line Of Sight
PHY	Physical layer
PMP	Point-to-Multipoint
QoS	Quality of Service
RLAN	Radio LAN (WLAN)
RTS	Request to Send
Rx	Receiver
STA	(Work) Station
TORA	Temporally-Ordered Routing Algorithm
Tx	Transmitter
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless LAN (RLAN)

Bibliografia do rozdz. 2.1

- [1] ANSI/IEEE Std 802.11 1999 Edition. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [2] IEEE Std 802.11a-1999. (Supplement to IEEE Std 802.11-1999). Supplement to IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band.
- [3] IEEE Std 802.11b-1999. (Supplement to ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition). Supplement to IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.
- [4] IEEE Std 802.11g-2003. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band.
- [5] IEEE Std 802.11e-2005. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements.
- [6] IEEE 802.11s. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Extended Service Set Mesh Networking.
- [7] R. Wiggins. Myths and Realities of Wi-Fi Mesh Networking. Yankee Group Report, Feb. 2006.
- [8] RFC 4728. The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad-hoc networks for IPV4.
- [9] A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. Vincent D. Park and M. Scott Corson. 1997. *IEEE Trans. Commun.*
- [10] <http://research.microsoft.com/mesh/>
- [11] http://www.antd.nist.gov/wahn_home.shtml
- [12] http://www.antd.nist.gov/wctg/manet/manet_bibliog.html

2.2. Badania sieci kratowej

W niniejszym rozdziale opisano wyposażenie oraz uzyskane parametry eksperymentalnej radiowej sieci lokalnej (WLAN), w której transmisję pomiędzy węzłem początkowym i końcowym realizowano za pośrednictwem kilku radiowych punktów dostępowych. Wyniki badań można traktować jako wskazówki do projektowania realnej przepustowości danych uzyskiwanej w sieci WLAN o strukturze kratowej.

2.2.1. Wybór urządzeń

Do budowy radiowej sieci lokalnej o strukturze kratowej wybrano punkty dostępowe typu MAP-2100 firmy Planet Technology Corporation. Na początku 2006 r. były to jedyne produkty umożliwiające tworzeniu sieci o tej strukturze, których cena ze względu na ograniczenia budżetu pracy statutowej była do zaakceptowania. Obecnie (grudzień 2006 r.) na rynku dostępnych jest kilka podobnych rozwiązań oferowanych między innymi przez firmy Firetide, Proxim, Tropos oraz Nortel. Jednak każda z wymienionych firm stosuje własne rozwiązanie, które nie zapewnia poprawnej współpracy w sieci kratowej z urządzeniami dostarczonymi przez innych producentów (– brak kompatybilności systemowej).

Punkty dostępowe typu MAP-2100 zostały zaprojektowane do pracy w sieciach zgodnych ze standardami IEEE 802.11 a/b/g, por. tab. 2.2.1. Są wyposażone w dwa niezależne dwupasmowe interfejsy radiowe. To pozwala wykorzystać jeden z interfejsów do tworzenia szkieletu sieci kratowej (backhaul link), a drugi do dołączenia do punktu dostępowego lokalnych stacji klientów. Każdy z dwóch interfejsów może być odpowiednio konfigurowany i monitorowany za pomocą dostarczonego oprogramowania. Węzły sieci wykorzystujące te urządzenia mogą pracować w paśmie 2,4 GHz, dzięki czemu jest możliwy większy zasięg systemu, albo w paśmie 5 GHz – w celu uniknięcia interferencji z wieloma urządzeniami i systemami działającymi w paśmie 2,4 GHz, np. innymi sieciami lokalnymi standardu IEEE 802.11 b/g. Dodatkowo wybrane urządzenia obsługują dynamiczny routing pomiędzy wszystkimi węzłami sieci oraz protokół MDOLSR (Modified Dynamic Optimized Link State Routing Protocol), dzięki któremu, w opinii producenta urządzeń, dane zawsze są przesyłane drogą optymalną.

Do komunikacji z punktami dostępowymi jako wyposażenie stacji klienckich wykorzystano trzy rodzaje kart radiowych zainstalowanych w komputerach typu notebook i desktop, por. tab. 2.2.2. Wszystkie użyte karty mogą pracować w radiowych sieciach lokalnych z infrastrukturą i bez infrastruktury – w trybie ad-hoc.

2.2.2. Oprogramowanie

Do zarządzania siecią radiową oraz monitorowania pracy punktów dostępowych wykorzystano program o nazwie Planet Mesh Network Manager v2.6.3, dostarczony przez producenta punktów dostępowych typu MAP-2100. Program ten pozwala m.in. na konfigurację parametrów sieci, monitorowanie stanu urządzeń MAP-2100 oraz graficzną prezentację utworzonej sieci wraz z informacją o zalogowanych stacjach klienckich.

Okno główne programu Planet Mesh Network Manager skonfigurowanego dla potrzeb prowadzonych badań przedstawiono na rys. 2.2.1.

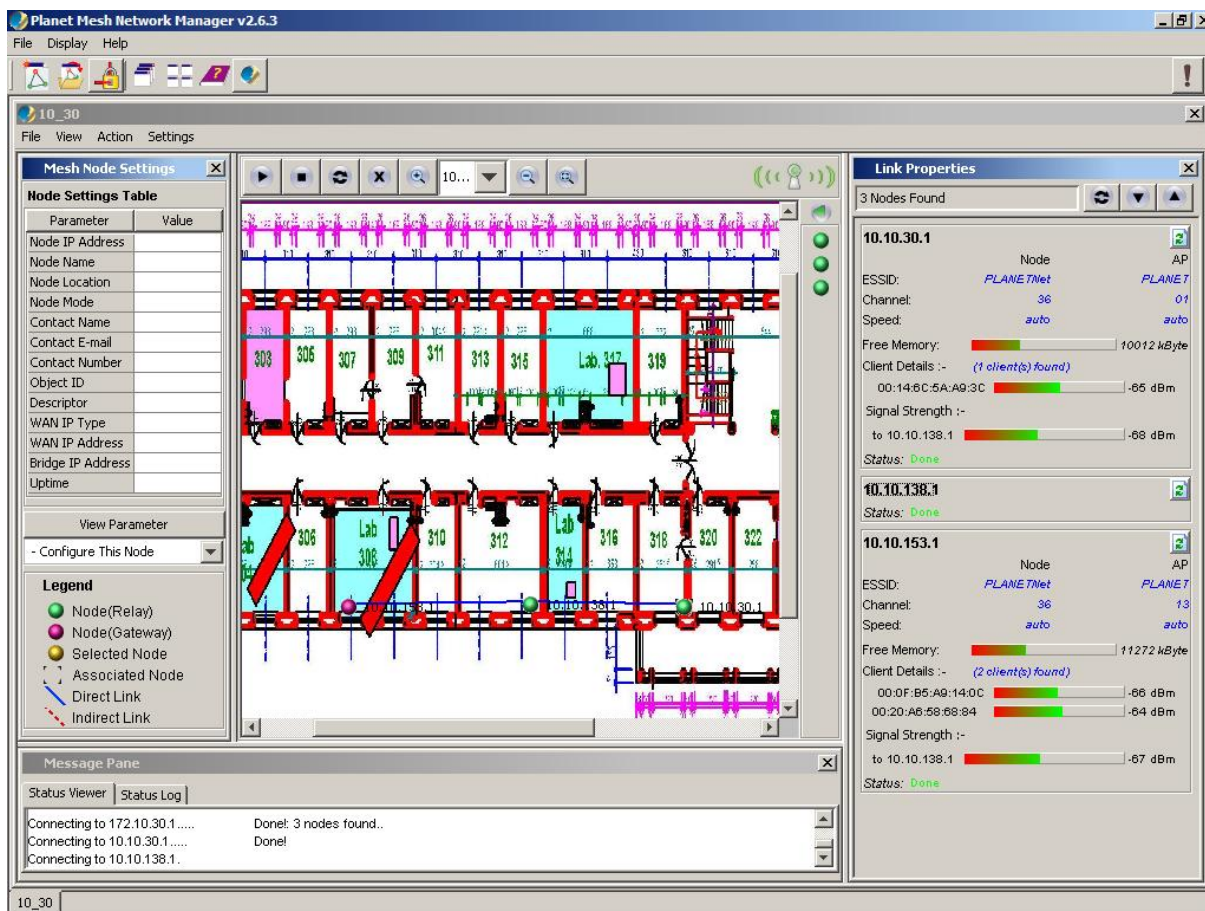
Testowanie parametrów utworzonej sieci przeprowadzono za pomocą darmowego programu Qcheck, pozwalającego m.in. na pomiar: czasu odpowiedzi TCP / UDP (Response Time TCP / UDP), przepustowości łącza TCP / UDP (Throughput TCP / UDP), strumieniowania UDP (Streaming UDP) oraz wskazanie drogi, którą są transmitowane pakiety danych (Traceroute).

Tab. 2.2.1: Podstawowe dane techniczne punktów dostępowych typu MAP-2100

Producent	Planet Technology Corporation		
Obsługiwane standardy i protokoły	IEEE 802.3 Ethernet, IEEE 802.3u Fast Ethernet, IEEE 802.11a 5 GHz WLAN, IEEE 802.11b/g 2,4GHz WLAN, RFC 768 UDP, RFC 791 IP, RFC 792 ICMP, RFC 793 TCP, RFC 826 ARP, RFC 1034, 1035 DNS, RFC 1058 RIP, RFC 1119 SNTPv2, RFC 1541/2131/3046 DHCP klient / serwer, RFC 1631 NAT, RFC 2068/ 2616 HTTP, RFC 2516 PPPoE, RFC 2865, 2866 RADIUS.		
Interfejs radiowy	dwa moduły radiowe mini-PCI z automatycznym wyborem kanału pracy.		
Szybkość transmisji	IEEE 802.11b: 11/5,5/2/1 Mbit/s (auto), IEEE 802.11a/g: 54/48/36/24/18/12/9/6 Mbit/s (auto).		
Moc wyjściowa	+ 17 dBm (z dedykowaną anteną dookólną dołączaną za pośrednictwem złącza SMA-RP); – możliwość redukcji mocy o 3 dB / 6 dB / 9 dB.		
Czułość odbiornika / szybkość transmisji	W trybie 802.11b: –95 dBm / 1 Mbit/s –94 dBm / 2 Mbit/s –92 dBm / 5,5 Mbit/s –90 dBm / 11 Mbit/s	W trybie 802.11g –90 dBm / 6 Mbit/s –89 dBm / 9 Mbit/s –87 dBm / 12 Mbit/s –85 dBm / 18 Mbit/s –82 dBm / 24 Mbit/s –79 dBm / 36 Mbit/s –76 dBm / 48 Mbit/s –74 dBm / 54 Mbit/s	W trybie 802.11a –88 dBm / 6 Mbit/s –87 dBm / 9 Mbit/s –85 dBm / 12 Mbit/s –83 dBm / 18 Mbit/s –80 dBm / 24 Mbit/s –75 dBm / 36 Mbit/s –73 dBm / 48 Mbit/s –71 dBm / 54 Mbit/s
Bezpieczeństwo	WEP-64 /128, WPA, WPA2		
Interfejsy Ethernet	WAN: gniazdo RJ-45 LAN: gniazdo RJ-45.		
Typ połączenia WAN	stały adres IP, PPPoE (Point-to-Point Protocol over Ethernet), klient DHCP.		
Zarządzanie urządzeniem	HTTP / HTTPS, Telnet, program narzędziowy w systemie Windows, SNMP v2/v3, private MIB, Trap, funkcja uaktualniania oprogramowania przez HTTPS oraz z poziomu programu narzędziowego Syslog.		
Funkcje oprogramowania	wykrywanie punktów dostępowych, sprawdzanie statusu, zarządzanie, uaktualnianie, restart, przywrócenie nastaw fabrycznych.		
Autoryzacja AP	logowanie HTTP / HTTPS, 802.1x, aktywność użytkowników w czasie rzeczywistym, sprawdzanie statusu przez przeglądarkę www / syslog / oprogramowanie narzędziowe, obsługa do 250 użytkowników (zalecane 100), autoryzacja w lokalnej bazie i przez serwer RADIUS.		

Tab. 2.2.2: Podstawowe dane techniczne użytych kart radiowych

Typ	Netgear WAG311, WAG511	Proxim 8480-WD
Częstotliwość pracy	2400 – 2483,5 MHz, 5150 – 5350 MHz, 5725 – 5825 MHz.	2400 – 2483,5 MHz, 5150 – 5350 MHz, 5470 – 5725 MHz.
Szybkość transmisji	IEEE 802.11b: 11/5,5/2/1 Mbit/s, auto, IEEE 802.11a/g: 54/48/36/24/18/12/9/6 Mbit/s, auto.	
Moc wyjściowa	+ 15 dBm ± 2dB	+ 18 dBm
Czułość odbiornika / szybkość transmisji	W trybie 802.11b: –94 dBm / 1 Mbit/s –93 dBm / 2 Mbit/s –92 dBm / 5,5 Mbit/s –91 dBm / 11 Mbit/s W trybie 802.11a/g: –91 dBm / 6 Mbit/s –90 dBm / 9 Mbit/s –89 dBm / 12 Mbit/s –88 dBm / 18 Mbit/s –85 dBm / 24 Mbit/s –82 dBm / 36 Mbit/s –76 dBm / 48 Mbit/s –73 dBm / 54 Mbit/s	W trybie 802.11a/b/g: – brak danych
Bezpieczeństwo	WEP-40/60/128/152	WEP-64/128/152



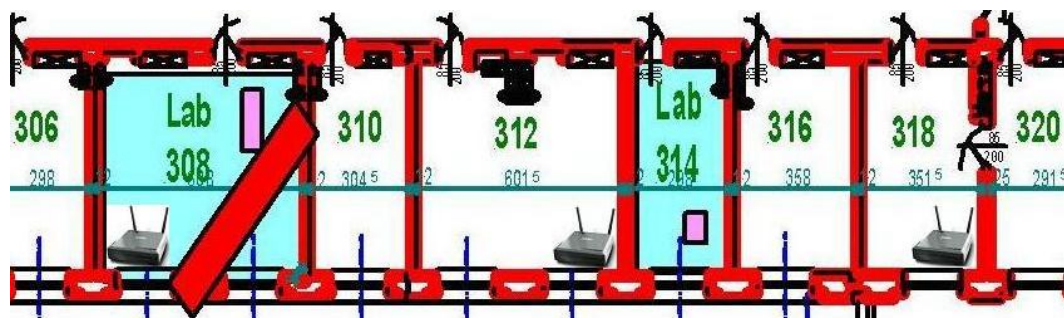
Rys. 2.2.1: Okno główne programu Planet Mesh Network Manager v2.6.3



Rys. 2.2.2: Okno główne programu Qcheck

2.2.3. Lokalizacja sieci

Punkty dostępowe eksperymentalnej sieci kastowej zainstalowano w pomieszczeniach Zakładu Systemów Radiowych, znajdujących się w budynku głównym IŁ, por rys. 2.2.3. Odległości pomiędzy urządzeniami i związane z tym tłumienie poszczególnych tras (przeseł) dobrano w taki sposób, aby transmisja danych między nimi była możliwa z maksymalną możliwą szybkością, tj. 54 Mbit/s. Punkt dostępowy zlokalizowany w pokoju 308 został dołączony do sieci Internet za pośrednictwem interfejsu WAN. Sieć uruchomiono w typowym środowisku biurowym i zgodnie z założeniami powinna pracować poprawnie w obecności sygnałów zakłócających. W tym przypadku źródłami sygnałów zakłócających były punkty dostępowe radiowej sieci IŁ, działające przede wszystkim w kanałach pasma 2,4 GHz.

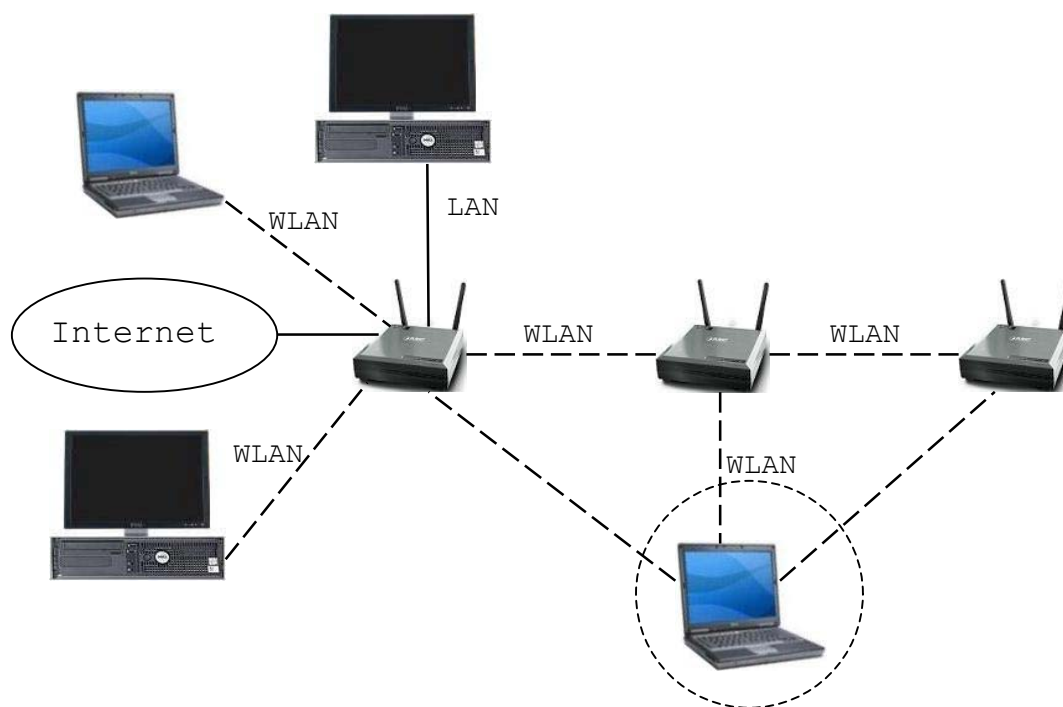


Rys. 2.2.3: Lokalizacja punktów dostępowych

Do punktu dostępowego (AP) zlokalizowanego w pokoju 308 dołączono dwa komputery komunikujące się z AP za pośrednictwem interfejsu radiowego oraz jeden, z którym komunikacja odbywała się przez interfejs przewodowy LAN. Komputer testowy stanowił ruchome zakończenie utworzonej sieci, por rys. 2.2.4, a jego lokalizacja była zmieniana podczas przeprowadzania pomiarów. Testy wykonano dla dwóch przypadków konfiguracji interfejsów radiowych. W pierwszym przypadku interfejs radiowy spełniający funkcję punktu dostępowego pracował w trybie 802.11g, zaś interfejs sieci kratowej (mesh) w trybie 802.11a z automatycznym wyborem kanału pracy. W drugim przypadku interfejs punktu dostępowego pracował w trybie 802.11a, a interfejs sieci kratowej (mesh) w trybie 802.11g z automatycznym wyborem kanału pracy.

Tab. 2.2.3: Wykaz zalogowanych punktów dostępowych

Lokalizacja	308	312	318
Adres IP punktu dostępowego	172.10.153.1	172.10.138.1	172.10.30.1
Kanał radiowy: tryb pracy punkt dostępowy	kanał 13, tryb 802.11g kanał 64, tryb 802.11a	kanał 7, tryb 802.11g kanał 48, tryb 802.11a	kanał 1, tryb 802.11g kanał 36, tryb 802.11a
Adres IP klienta (typ / interfejs sieciowy)	172.10.153.2 (WLAN / WAG311) 172.10.153.3 (WLAN / WAG511) 172.10.153.4 (LAN / Intel(R) PRO/1000 MT) 172.10.153.5 (WLAN / 8480-WD)	172.10.138.2 (WLAN / WAG511)	172.10.30.2 (WLAN / WAG511)
Funkcja	Brama (gateway)	Retransmisja (relay)	Retransmisja (relay)



Rys. 2.2.4: Schemat sieci (określenie ruchomej stacji)

2.2.4. Opis przeprowadzonych badań

Wykorzystując infrastrukturę sieci składającą się z trzech punktów dostępowych, lokalizowanych jak na rys. 2.2.3, której schemat przedstawiono na rys. 2.2.4, wykonano następujące serie testów:

- Pomiar czasu odpowiedzi: wykorzystując transmisję TCP, następnie UDP, przesyłano 10 razy pakiet o rozmiarze 1000 bajtów. Test powtórzono pięciokrotnie. Wynik jest średnią z pięciu pomiarów.

- Pomiar przepustowości: wykorzystując transmisję TCP, następnie UDP, przesyłano plik danych o rozmiarze 1000 kbajt. Test powtórzono pięciokrotnie. Wynik jest średnią z pięciu pomiarów.

- Transmisja strumieniowa UDP (wykorzystywana np. przez aplikacje multimedialne wysyłające dane bez potwierdzenia): w czasie 10 s przeprowadzano transmisję z wymuszoną szybkością 1 Mbit/s. Dokonywano pomiaru rzeczywistej szybkości transmisji oraz procentu utraconych danych. Test powtórzono pięciokrotnie. Wynik jest średnią z pięciu pomiarów.

- Transmisja ciągła (symulacja pobierania plików o dużym rozmiarze np. klipy wideo): przeprowadzono transmisję pliku o rozmiarze 100 Mbajt, rejestrując średnią oraz maksymalną szybkość transmisji.

- Testy funkcjonalne: badano szybkość przenoszenia połączeń przy zmianie lokalizacji klienta radiowego oraz subiektywnie oceniano szybkość otwierania stron www i transmisję strumieniową z sieci Internet.

Pomiary wykonano kolejno dla trzech różnych lokalizacji ruchomej stacji klienta, wybranych w taki sposób, aby transmisja pomiędzy komputerem ruchomym a komputerami docelowymi, będącymi klientami skrajnego punktu dostępowego (stacje w pokoju 308, – po lewej stronie schematu na rys. 2.2.4), odbywała się w dwóch, trzech lub czterech skokach (ang. hop).

2.2.5. Wyniki i wnioski

W sieci radiowej składającej się z kilku (1, 2 lub 3) AP przeprowadzono badania, w których wyniku uzyskano podstawowe parametry, pozwalające na ocenę wydajności różnych konfiguracji sieci.

W pierwszej serii pomiarów badano transmisję dwuskokową, podczas której wszystkie komputery klientów były przydzielone do tego samego punktu dostępowego w pokoju 308. Utworzona w ten sposób sieć miała strukturę typową dla sieci WLAN z jednym punktem dostępowym. W tab. 2.2.4 do tab. 2.2.9 przedstawiono wyniki testów transmisji w paśmie 2,4 GHz, natomiast w tab. 2.2.10 do tab. 2.2.15 – przedstawiono wyniki testów transmisji w paśmie 5 GHz, osobno pomiarów łącza WLAN – WLAN oraz WLAN – LAN.

Tab. 2.2.4: TCP – czas odpowiedzi (Uwaga 1)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [□S]	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	2	2	2	2	2	2
średni	3	2	2	2	2	2,2
maksymalny	5	2	5	2	3	3,4
Czas odpowiedzi [□S]	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	1	1	1	1	1	1
średni	1	1	1	1	1	1
maksymalny	1	2	1	1	1	1,2

Tab. 2.2.5: TCP– przepustowość (Uwaga 1)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	6,39	4,66	3,96	4,54	6,23	5,16
	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	16,23	23,32	16,10	23,19	16,16	19,00

Tab. 2.2.6: UDP – czas odpowiedzi (Uwaga 1)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [□S]	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	2	2	2	2	2	2
średni	2	2	2	2	2	2
maksymalny	3	3	3	3	3	3
Czas odpowiedzi [□S]	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	1	1	1	1	1	1
średni	1	1	1	1	1	1
maksymalny	2	1	1	2	1	1,4

Tab. 2.2.7: UDP – przepustowość (Uwaga 1)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	6,15	6,07	6,07	5,49	5,25	5,81
	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	10,58	10,60	8,39	7,27	10,55	9,48

Tab. 2.2.8: Transmisja strumieniowa UDP (Uwaga 1)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Parametr:	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Utrata danych [%]	5,2	18,1	20,5	6,2	3,2	10,6
Przepustowość [Mbit/s]	0,89	0,66	0,67	0,85	0,79	0,77
Parametr:	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Utrata danych [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Przepustowość [Mbit/s]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tab. 2.2.9: Szybkość transmisji dużych plików (Uwaga 1)

Szybkość maksymalna [kbajt/s]	Szybkość średnia [kbajt/s]
Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)	
1463	952
Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)	
2471	1538

Uwaga 1: Pierwsza seria pomiarów – radiowa sieć dostępowa pracująca w paśmie 2,4 GHz.

Tab. 2.2.10: TCP – czas odpowiedzi (Uwaga 2)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	2	2	2	2	2	2
średni	2	3	2	2	2	2,2
maksymalny	3	3	3	4	3	3,2
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	1	1	1	1	1	1
średni	1	1	1	1	1	1
maksymalny	1	2	2	1	1	1,4

Tab. 2.2.11: TCP– przepustowość (Uwaga 2)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	6,90	6,65	6,01	7,02	6,15	6,54
	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	15,66	15,39	15,36	15,67	15,53	15,52

Tab. 2.2.12: UDP – czas odpowiedzi (Uwaga 2)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	2	2	2	2	2	2
średni	2	2	2	2	2	2
maksymalny	2	4	3	4	5	3,6
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	1	1	1	1	1	1
średni	1	1	1	1	1	1
maksymalny	2	1	1	1	1	1,2

Tab. 2.2.13: UDP – przepustowość (Uwaga 2)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	4,80	4,69	4,85	4,86	4,86	4,81
	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	10,70	10,71	10,58	10,55	10,67	10,64

Tab. 2.2.14: Transmisja strumieniowa UDP (Uwaga 2)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Parametr:	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Utrata danych [%]	12,3	1,8	1,6	3,2	1,5	4,1
Przepustowość [Mbit/s]	0,79	0,89	0,89	0,88	0,89	0,87
Parametr:	Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Utrata danych [%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Przepustowość [Mbit/s]	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00

Tab. 2.2.15: Szybkość transmisji dużych plików (Uwaga 2)

Szybkość maksymalna [kbajt/s]	Szybkość średnia [kbajt/s]
Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)	
1081	769
Połączenie 172.10.153.3 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)	
2160	1176

Uwaga 2: Pierwsza seria pomiarów – radiowa sieć dostępowa pracująca w paśmie 5 GHz.

W drugiej serii pomiarów zmieniono lokalizację ruchomej stacji klienta w ten sposób, że została przydzielona do radiowego punktu dostępowego, znajdującego się w pokoju 312. Inne warunki badań jak podczas pierwszej serii. Komunikacja ze stacjami klienckimi odbywała się w paśmie 2,4 GHz lub 5 GHz, zaś łącze radiowe pomiędzy punktami dostępowymi pracowało odpowiednio w paśmie 5 GHz lub 2,4 GHz. W tab. 2.2.16 do tab. 2.2.21 przedstawiono wyniki testów transmisji w paśmie 2,4 GHz, natomiast w tab. 2.2.22 do tab. 2.2.27 – przedstawiono wyniki testów transmisji w paśmie 5 GHz, osobno pomiarów łącza WLAN – WLAN oraz WLAN – LAN.

Tab. 2.2.16: TCP – czas odpowiedzi (Uwaga 3)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	4	5	5	4	4	4,4
średni	4	6	6	7	6	5,8
maksymalny	6	9	10	11	11	9,4
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	2	2	3	2	3	2,4
średni	4	4	3	4	5	4
maksymalny	7	8	4	8	7	6,8

Tab. 2.2.17: TCP – przepustowość (Uwaga 3)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	4,38	4,51	4,73	5,45	4,46	4,71
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	5,25	6,24	6,42	5,43	5,42	5,75

Tab. 2.2.18: UDP – czas odpowiedzi (Uwaga 3)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	3	3	3	3	4	3,2
średni	5	7	4	7	6	5,8
maksymalny	10	22	8	19	12	14,2
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	2	2	3	3	2	2,4
średni	4	2	6	7	5	4,8
maksymalny	6	3	18	18	19	12,8

Tab. 2.2.19: UDP – przepustowość (Uwaga 3)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	2,38	2,22	1,35	2,13	2,65	2,15
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	2,50	2,16	2,19	2,28	2,35	2,29

Tab. 2.2.20: Transmisja strumieniowa UDP (Uwaga 3)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Parametr:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Utrata danych [%]	20,5	22,9	19,5	18,9	18,3	20,0
Przepustowość [Mbit/s]	0,67	0,62	0,60	0,69	0,66	0,65
Parametr:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Utrata danych [%]	0,0	1,9	0,6	0,0	0,0	0,5
Przepustowość [Mbit/s]	0,85	0,87	0,88	0,96	0,88	0,89

Tab. 2.2.21: Szybkość transmisji dużych plików (Uwaga 3)

Szybkość maksymalna [kbajt/s]	Szybkość średnia [kbajt/s]
Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)	
505	316
Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)	
814	529

Uwaga 3: Druga seria pomiarów – radiowa sieć dostępowa pracująca w paśmie 2,4 GHz.

Tab. 2.2.22: TCP – czas odpowiedzi (Uwaga 4)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	12	12	8	8	8	9,6
średni	13	12	10	8	9	10,4
maksymalny	15	13	14	9	10	12,2
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	3	3	3	3	3	3
średni	6	3	4	5	3	4,2
maksymalny	10	4	6	8	4	6,4

Tab. 2.2.23: TCP – przepustowość (Uwaga 4)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	2,88	2,74	2,32	3,28	2,99	2,84
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	5,79	3,83	5,35	5,68	3,89	4,91

Tab. 2.2.24: UDP – czas odpowiedzi (Uwaga 4)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	5	5	5	5	5	5
średni	8	6	6	7	5	6,4
maksymalny	9	8	8	10	8	8,6
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	3	3	3	3	3	3
średni	4	4	4	4	4	4
maksymalny	7	5	5	5	6	5,6

Tab. 2.2.25: UDP – przepustowość (Uwaga 4)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	2,29	1,76	1,68	2,28	1,60	1,92
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	2,42	2,87	3,01	2,59	2,97	2,77

Tab. 2.2.26: Transmisja strumieniowa UDP (Uwaga 4)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Parametr:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Utrata danych [%]	37,9	28,5	33,9	36,3	29,4	33,2
Przepustowość [Mbit/s]	0,56	0,64	0,61	0,57	0,62	0,60
Parametr:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Utrata danych [%]	11,1	23,9	22,4	28,2	21,4	21,4
Przepustowość [Mbit/s]	0,81	0,68	0,70	0,66	0,71	0,71

Tab. 2.2.27: Szybkość transmisji dużych plików (Uwaga 4)

Szybkość maksymalna [kbajt/s]	Szybkość średnia [kbajt/s]
Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)	
456	324
Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)	
447	312

Uwaga 4: Druga seria pomiarów – radiowa sieć dostępowa pracująca w paśmie 5 GHz.

W trzeciej serii pomiarów zmieniono lokalizację ruchomej stacji klienta w ten sposób, że została przydzielona do radiowego punktu dostępowego, znajdującego się w pokoju 318. Inne warunki badań jak w seriach pierwszej i drugiej. W tab. 2.2.28 do tab. 2.2.33 przedstawiono wyniki testów transmisji w paśmie 2,4 GHz, natomiast w tab. 2.2.34 do tab. 2.2.39 – przedstawiono wyniki testów transmisji w paśmie 5 GHz, osobno pomiarów łącza WLAN – WLAN oraz WLAN – LAN.

Tab. 2.2.28: TCP – czas odpowiedzi (Uwaga 5)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	5	5	5	5	5	5
średni	6	6	6	6	6	6
maksymalny	8	8	8	9	8	8,2
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	4	4	4	4	5	4,2
średni	5	5	5	5	5	5
maksymalny	8	5	8	6	5	6,4

Tab. 2.2.29: TCP – przepustowość (Uwaga 5)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	0,67	0,50	0,46	0,45	0,66	0,55
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	0,43	0,74	0,52	0,71	0,48	0,58

Tab. 2.2.30: UDP – czas odpowiedzi (Uwaga 5)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	5	5	5	5	5	5
średni	6	6	5	5	6	5,6
maksymalny	7	8	6	7	9	7,4
Czas odpowiedzi [ms]	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	5	5	5	5	5	5
średni	5	5	6	5	6	5,4
maksymalny	6	7	9	8	12	8,4

Tab. 2.2.31: UDP – przepustowość (Uwaga 5)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	1,54	1,27	1,22	0,93	1,08	1,21
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	1,48	1,53	1,52	1,30	1,25	1,41

Tab. 2.2.32: Transmisja strumieniowa UDP (Uwaga 5)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Parametr:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Utrata danych [%]	66,5	52,4	40,0	52,5	36,4	49,6
Przepustowość [Mbit/s]	0,39	0,44	0,55	0,43	0,57	0,48
Parametr:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Utrata danych [%]	56,7	58,8	31,1	24,9	36,1	41,5
Przepustowość [Mbit/s]	0,50	0,48	0,63	0,68	0,58	0,57

Tab. 2.2.33: Szybkość transmisji dużych plików (Uwaga 5)

Szybkość maksymalna	Szybkość średnia
Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)	
328	158
Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)	
353	145

Uwaga 5: Trzecia seria pomiarów – radiowa sieć dostępową pracująca w paśmie 2,4 GHz.

Tab. 2.2.34: TCP – czas odpowiedzi (Uwaga 6)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	13	13	13	13	13	13
średni	14	16	18	16	14	15,6
maksymalny	17	25	31	23	15	22,2
Czas odpowiedzi [ms]:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	12	12	11	12	12	11,8
średni	15	13	15	16	14	14,6
maksymalny	17	16	18	18	17	17,2

Tab. 2.2.35: TCP – przepustowość (Uwaga 6)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	0,38	0,70	0,59	0,72	0,62	0,60
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	0,53	0,57	0,48	0,56	0,62	0,55

Tab. 2.2.36: UDP – czas odpowiedzi (Uwaga 6)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Czas odpowiedzi [ms]:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
minimalny	13	13	13	13	13	13
średni	15	16	18	17	15	16,2
maksymalny	26	25	35	30	23	27,8
Czas odpowiedzi [ms]:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
minimalny	12	13	12	13	13	12,6
średni	13	17	18	18	15	16,2
maksymalny	13	25	29	21	19	21,4

Tab. 2.2.37: UDP – przepustowość (Uwaga 6)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	0,54	0,52	0,54	0,59	0,58	0,55
	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Przepustowość [Mbit/s]	0,43	0,48	0,52	0,49	0,50	0,49

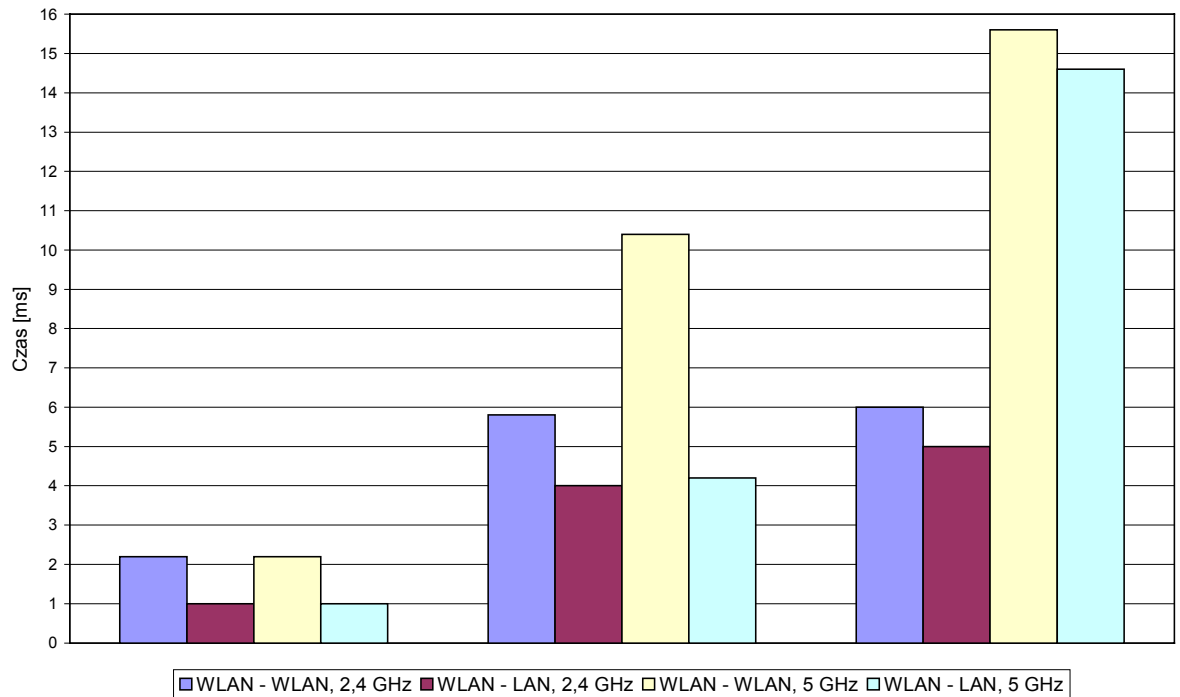
Tab. 2.2.38: Transmisja strumieniowa UDP (Uwaga 6)

Nr pomiaru	1	2	3	4	5	średnia
Parametr:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)					
Utrata danych [%]	78,7	80,5	73,8	80,1	76,6	77,9
Przepustowość [Mbit/s]	0,19	0,18	0,24	0,18	0,21	0,20
Parametr:	Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)					
Utrata danych [%]	75,3	76,1	76,8	80,2	86,2	78,9
Przepustowość [Mbit/s]	0,22	0,22	0,21	0,18	0,12	0,19

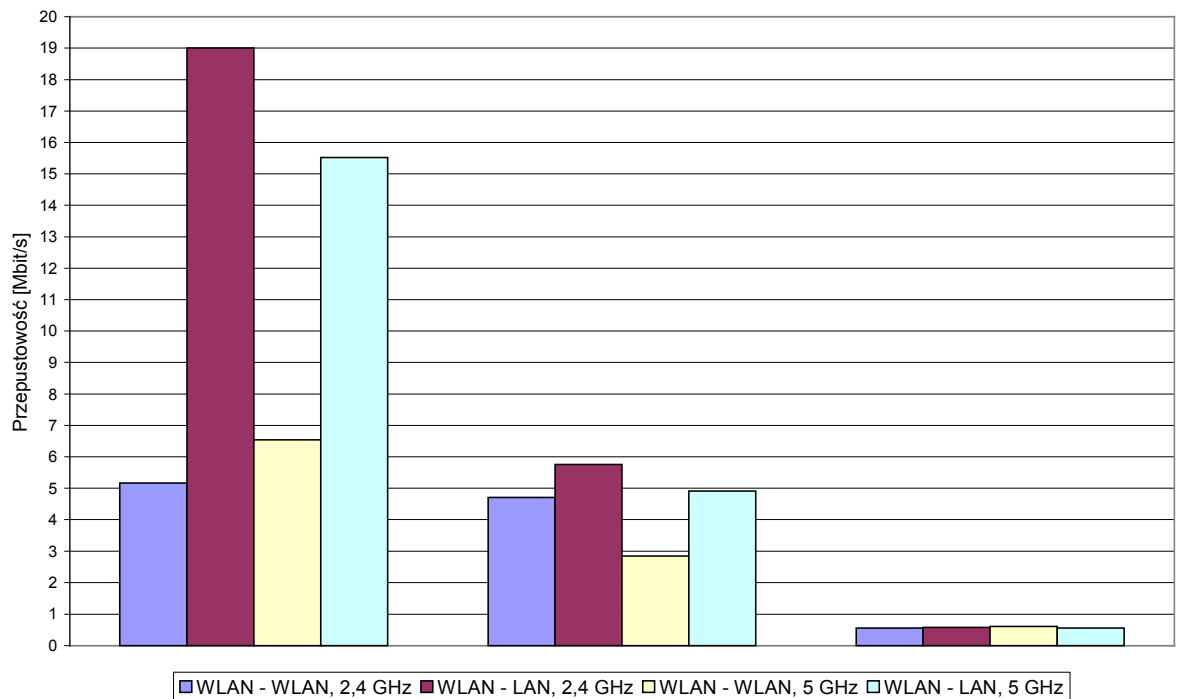
Tab. 2.2.39: Szybkość transmisji dużych plików (Uwaga 6)

Szybkość maksymalna	Szybkość średnia
Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.2 (WLAN)	
69	30
Połączenie 172.10.138.2 (WLAN) – 172.10.153.4 (LAN)	
72	21

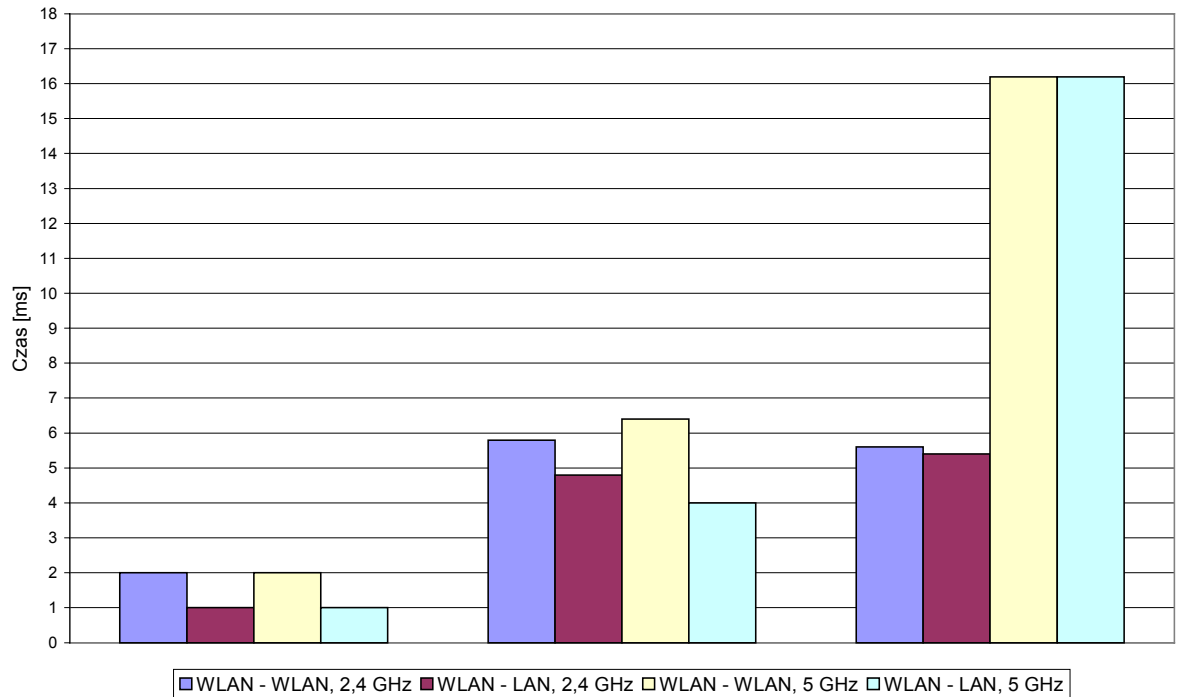
Uwaga 6: Trzecia seria pomiarów – radiowa sieć dostępowa pracująca w paśmie 5 GHz.



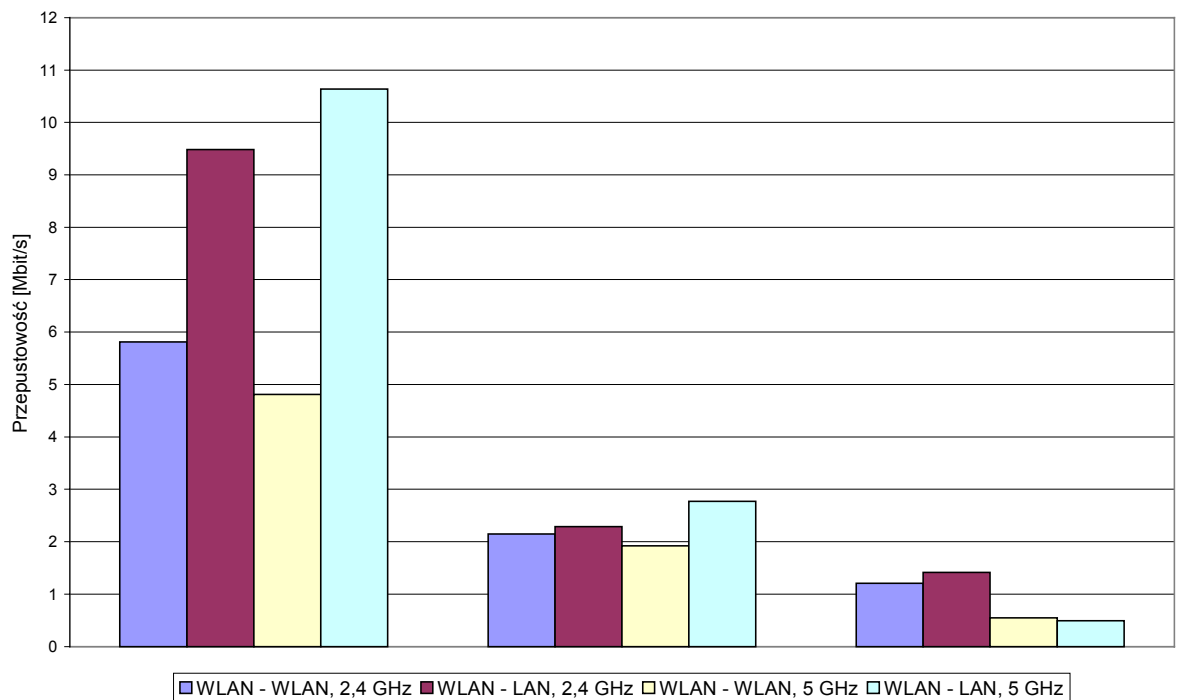
Rys. 2.2.5: TCP – średni czas odpowiedzi przy transmisji 2, 3 i 4-skokowej



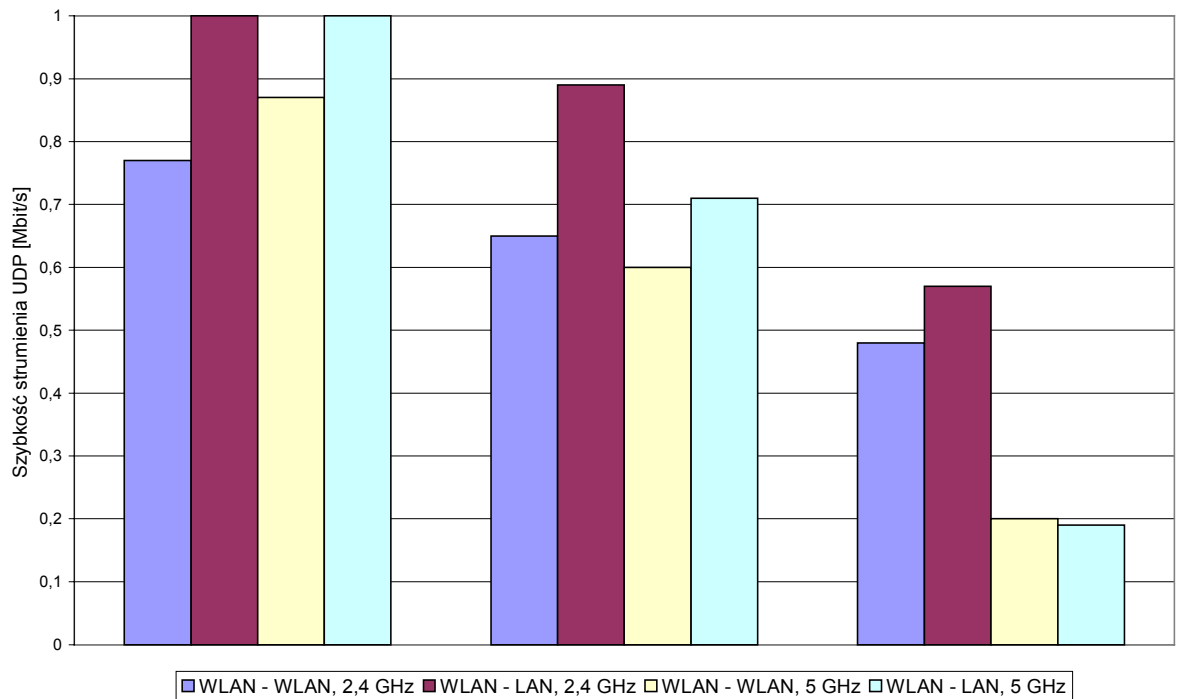
Rys. 2.2.6: TCP – średnia przepustowość przy transmisji 2, 3 i 4-skokowej



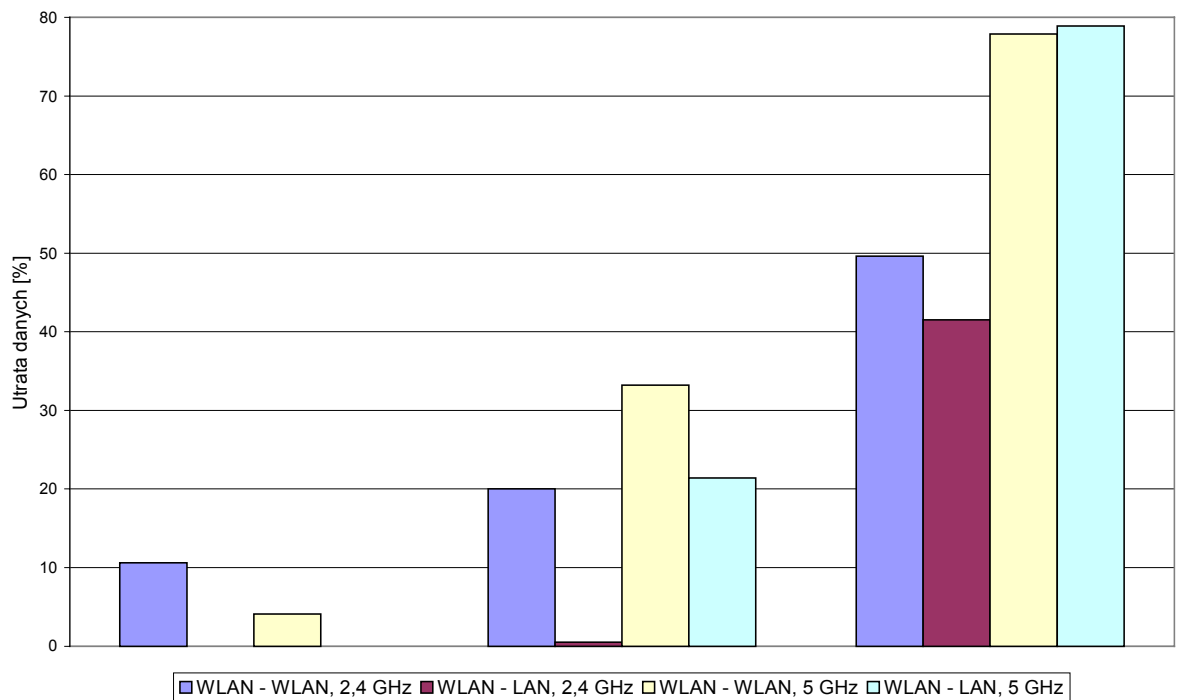
Rys. 2.2.7: UDP – średni czas odpowiedzi przy transmisji 2, 3 i 4-skokowej



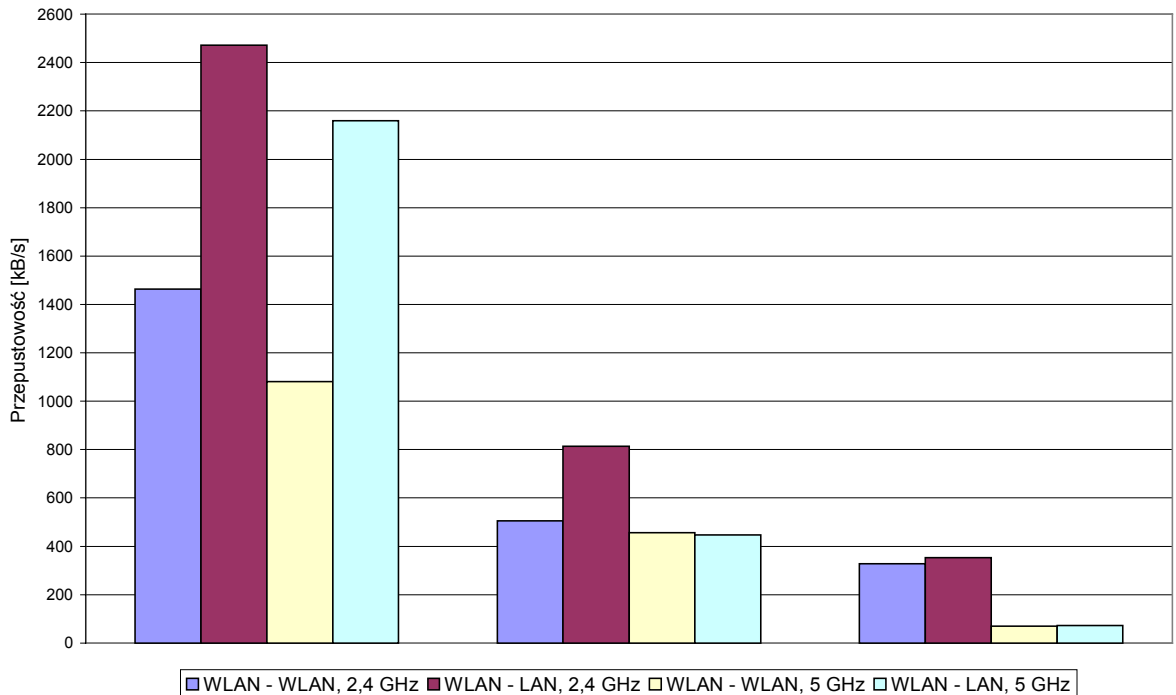
Rys. 2.2.8: UDP – średnia przepustowość, przy transmisji 2, 3 i 4-skokowej



Rys. 2.2.9: UDP – szybkość strumienia przy transmisji 2, 3 i 4-skokowej



Rys. 2.2.10: UDP – utrata danych przy transmisji strumieniowej 2, 3 i 4-skokowej
(brak słupka oznacza transmisję bez utraty przesyłanych danych)



Rys. 2.2.11: Maksymalna przepustowość przy transmisji dużego pliku przy transmisji strumieniowej 2, 3 i 4-skokowej

Wyniki przeprowadzonych badań, zestawione na rys. 2.2.5 do 2.2.11, potwierdzają wydłużenie czasu odpowiedzi i spadek przepływności przy zwiększaniu liczby punktów dostępowych pośredniczących w przesyłaniu danych.

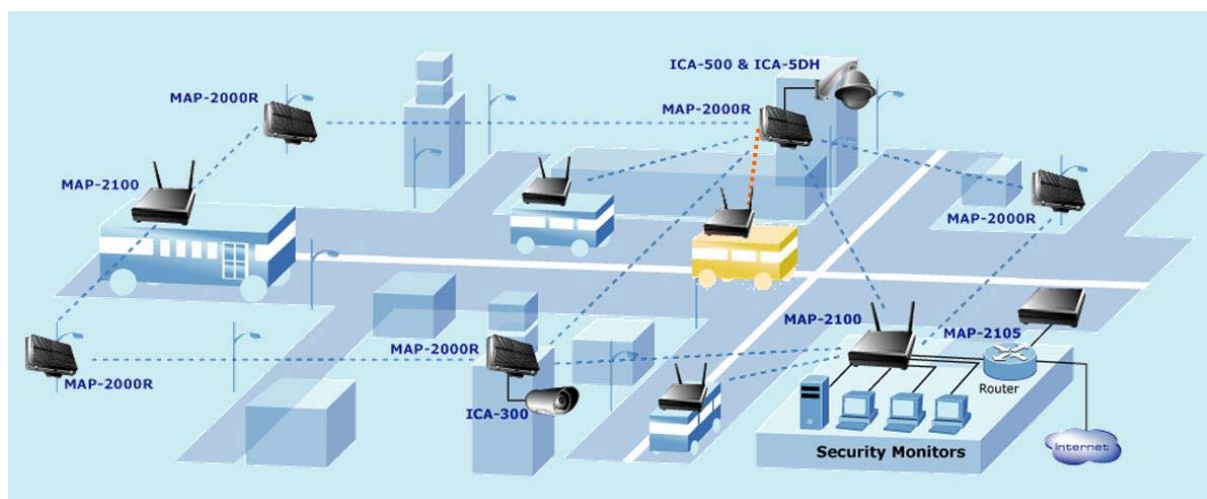
Na uwagę zasługuje fakt, że urządzenia typu MAP-2100 podczas pracy w obecności zakłóceń pochodzących od innych sieci systemów 802.11b/g miały problemy z wyborem optymalnej konfiguracji. Efekt ten obserwowano zwłaszcza podczas transmisji 4-skokowej z łączem pomiędzy punktami dostępowymi sieci szkieletowej pracującym paśmie 2,4 GHz. Dodatkowo na degradację parametrów sieci w tym przypadku wpływa fakt wyboru kanałów zlokalizowanych w dolnej części dostępnego pasma pracy mimo tego, że były one już zajęte przez inne sieci działające w paśmie 2,4 GHz. Ręczne wymuszenie pracy szkieletu sieci w wolnych kanałach pozwoliło wyeliminować ten problem.

Inne niekorzystne zjawisko obserwowano przy wzajemnej widoczności wszystkich punktów dostępowych. Z taką sytuacją nie poradził sobie zaimplementowany w urządzeniach protokół MDOLSR, który (w opinii producenta) zapewnia transmisję danych optymalną i niezawodną drogą. Mając do wyboru łącze 3-skokowe pracujące na granicy czułości odbiornika lub 4-skokowe działające z szybkością 54 Mbit/s protokół wybierał łącze 3-skokowe chociaż było niewydajne.

Podczas zmiany lokalizacji węzłów oraz przy przemieszczaniu się ruchomej stacji klienta nie dostrzeżono spadku wydajności sieci. Zestawianie połączeń pomiędzy nowymi punktami dostępowymi, pojawiającym się w zasięgu działania odbywało się bez problemów. Również przenoszenie zestawionego połączenia komputer ruchomy – punkt dostępowy, odbywało się sprawnie i szybko. Jednak zestawienie nowego połączenia odbywało się po zerwaniu używanego wcześniej. Pełna obsługa ruchomych klientów byłaby możliwa po rozbudowie sieci o bramkę "mobile IP" typu MAP-2105.

Podczas testów użytkowych, symulujących normalne korzystanie z Internetu (czytanie stron www, wysyłanie wiadomości e-mail, oglądanie transmisji internetowych), wydajność sieci w każdym punkcie zasięgu pozwalała na sprawną i wygodną pracę.

Mimo znacznie większej wydajności lokalnych sieci przewodowych niż radiowych (WLAN), rozwiązanie oferowane przez sieci o strukturze kratowej może być jedynym możliwym do zaakceptowania w warunkach miejskich, gdzie koszt okablowania stanowi znaczną część kosztów całego systemu. Nie bez znaczenia jest również fakt, że radiową sieć o strukturze kratowej można uruchomić w czasie znacznie krótszym niż tradycyjną sieć przewodową.



Rys. 2.2.12: Przykład systemu monitoringu opartego na sieci MANET (materiały firmy Planet)

Dodatkowo rozbudowana sieć kratowa oprócz możliwości samokonfiguracji może również sama optymalizować drogi transmisji wyszukując obejścia węzłów uszkodzonych, zakłócanych lub przeciążonych. Wpływa to w znaczący sposób na niezawodność całego systemu. Sieć o strukturze kratowej może znaleźć zastosowanie w systemie monitoringu komunikacji miejskiej lub konkretnego terenu np. obszaru przemarszu manifestacji, a jej struktura może być na bieżąco modyfikowana w zależności od potrzeb.

Wykaz akronimów użytych w rozdz. 2.2

WLAN	Wireless Local Area Network
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
RFC	Request for Comment (Official Internet Protocol Standards)
WEP	Wired Equivalent Privacy
WPA	WiFi Protected Access
WAN	Wide Area Network
LAN	Local Area Network
IŁ	Instytut Łączności
AP	Access Point
IP	Internet Protocol
www	World Wide Web

Bibliografia do rozdz. 2.2

- [1] W. S. Conner i inni. IEEE 802.11s Tutorial. Overview of the Amendment of Wireless Local Area Mesh Networking.
- [2] R. Draves J. Padhye, B. Zill. Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks.
- [3] P. Kyasanur, J. Padhye, P. Bahl. On the efficacy of separating control and data into different frequency bands.
- [4] Nortel Networks. Engineering a WLAN network.
- [5] A. Orłowski, D. Łoniewski. Rozwój sieci telekomunikacyjnych i sieci następnej generacji – aspekty strukturalne, funkcjonalne, techniczne i normalizacyjne. Część II: Wytyczne projektowania bezprzewodowych sieci lokalnych
- [6] RFC 3561. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing.
- [7] RFC 3626. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR).
- [8] strona firmy Planet Technology Corp. www.planet.com.tw
- [9] strona programu Qcheck:
http://www.ixiacom.com/products/performance_applications/pa_display.php?skey=qcheck

2.3. Techniki UWB

W tej części pracy przedstawiono wstępną analizę perspektyw wykorzystania radiowych technik ultra szerokopasmowych (ultra-wideband technologies), nazywanych dalej UWB.

2.3.1 Definicje sygnału UWB

Na ogół przyjmuje się [1], że "ultra szerokopasmowymi" mogą być nazywane urządzenia i systemy radiowe wykorzystujące sygnały o szerokości pasma (B_{-10}) co najmniej 500 MHz, lub względnej szerokości pasma (μ_{-10}) większej niż 0,2, gdzie, por. rys. 2.3.1:

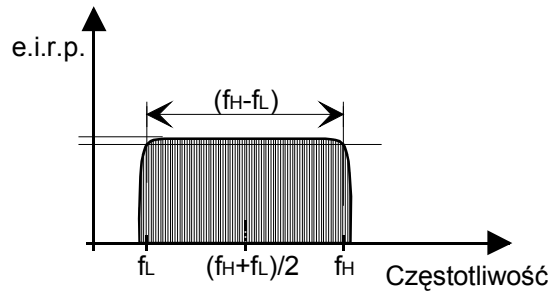
f_H najwyższa częstotliwość sygnału promieniowanego przez antenę urządzenia UWB, przy której gęstość mocy widma emisji osiąga -10 dB względem maksymalnej gęstości mocy tego sygnału;

f_L najniższa częstotliwość sygnału promieniowanego przez antenę urządzenia UWB, przy której gęstość mocy widma emisji osiąga -10 dB względem maksymalnej gęstości mocy tego sygnału;

$B_{-10} = f_H - f_L$ szerokość pasma sygnału promieniowanego przez antenę urządzenia UWB, określona na poziomie -10 dB (wymaga się: $B_{-10} \geq 500$ MHz);

$f_C = (f_H + f_L) / 2$ środkowa częstotliwość pasma sygnału UWB;

$\mu_{-10} = B_{-10} / f_C = 2(f_H - f_L) / (f_H + f_L)$ względna szerokość pasma tego sygnału (wymaga się: $\mu_{-10} \geq 0,2$).



Rys. 2.3.1: Definicja sygnału UWB

Dla urządzeń i systemów UWB wykorzystuje się zakresy częstotliwości, które zgodnie z Regulaminem Radiokomunikacyjnym (RR), regionalnymi i krajowymi tablicami przeznaczeń częstotliwości zostały przydzielone różnym służbom radiowym. Z tego względu wdrażanie technik UWB spotyka się z oporem dotychczasowych użytkowników tych zakresów częstotliwości.

2.3.2 Pojemność systemu UWB

Teoretyczna pojemność każdego systemu komunikacyjnego, także UWB, może być obliczona z zależności Shannona:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{\int_B P_d(f) df}{\int_B N_0 df} \right)$$

gdzie:

C pojemność kanału [bit/s]

B szerokość pasma kanału [Hz]

$P_d(f)$ gęstość mocy sygnału [W/Hz lub odpowiednio dBm/Hz]

N_0 gęstość mocy szumu [W/Hz lub odpowiednio dBm/Hz]

Ze względu na bardzo dużą szerokość pasma kanału pojemność systemu UWB może być bardzo duża, nawet gdy gęstość mocy sygnału jest poniżej gęstości mocy szumu. Cecha ta (tzw. zysk szerokopasmowy) jest jednym z powodów zainteresowania systemami UWB.

2.3.3 Przesłanki rozwoju technik UWB

Badania systemów UWB dla celów wojskowych są prowadzone od wielu lat. W dostępnych publikacjach [2] opisano m.in. założenia realizowanego w ramach Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) programu Networking in the Extreme (NETEX). Celem programu NETEX było zastosowanie technik UWB do szybkiego tworzenia sieci radiowych w złożonym, nieprzyjaznym środowisku elektromagnetycznym, cyt. *"robust and rapid wireless networking in complex, hostile environments using UWB technology"*.

Znaczenie poszczególnych słów użytych w tych założeniach wyjaśniano jak następuje:

- *"robust"* – oznacza wybór koncepcji i implementacji sieciowych, które są odporne na zaniki sygnału i przerwy w pracy urządzeń spowodowane brakiem zasilania;
- *"complex"* – oznacza środowisko pracy trudne dla radiokomunikacji, takie jak zabudowa wielkomiejska, wnętrza budynków lub pokład statku, w którym warunki propagacji i scenariusze łączności są zależne od chwilowej lokalizacji urządzeń;
- *"hostile"* – oznacza środowisko, w którym aby uniknąć zagłuszenia transmisji wymaga się małego prawdopodobieństwa detekcji transmisji;
- *"rapid"* – oznacza możliwość szybkiego tworzenie sieci ad hoc, bez rezerwowania pasma i rywalizacji o zasoby widma;
- *"using UWB technology"* – wskazuje, że dla spełnienia wymagań komunikacyjnych w opisanym scenariuszu miały być zastosowane techniki UWB.

Realizacja tego programu miała doprowadzić do uzyskania odpowiedzi na kilka podstawowych pytań:

- Czy projektowane sieci UWB mogą współistnieć z innymi wojskowymi sieciami radiokomunikacyjnymi, radarami, czujnikami i odbiornikami GPS?
- Czy można jednoznacznie wskazać warunki operacyjne, w których UWB mają wyraźną przewagę nad wąskopasmowymi systemami radiowymi?
- Które rozwiązanie układowe i protokoły oferują maksymalną odporność na trudne warunki środowiska elektromagnetycznego?

Zainteresowanie systemami UWB dla zastosowań cywilnych wzrosło w wyniku decyzji Federalnej Komisji Łączności (FCC) USA z 2002 r. [1] dopuszczającej wykorzystanie tego rodzaju sygnałów do komunikacji danych, radarów bliskiego zasięgu i innych celów, por. p. 2.3.4.

Łączna szerokość pasma w zakresach częstotliwości udostępnionych przez FCC dla UWB przekracza 7,5 GHz, zatem jest znacznie większa niż szerokość pasma w każdym z obecnie używanych systemów komercyjnych. Szerokość pasma decyduje o tym, że szybkość komunikacji danych pomiędzy urządzeniami UWB może osiągać Gbit/s. Jednak ze względu na bardzo małą moc promieniowaną, ściślej widmową gęstość mocy (moc RF przypadającą

na jednostkę pasma częstotliwości), zasięg tego rodzaju komunikacji UWB jest ograniczony do 1-10 m.

Obecnie badania UWB dotyczą dwóch podstawowych technik transmisji:

- systemów komunikacyjnych i radarów wykorzystujących do transmisji bardzo wąskie impulsy, nazywanych często systemami bez fali nośnej RF, których opis, analiza i badania wymagają zastosowania zupełnie nowych narzędzi, por. punkt 2.3.8;
- systemów komunikacyjnych wykorzystujących modulację i kodowanie wieloczęstotliwościowe (MB OFDM), por. punkt 2.3.14, których rozwój stanowi kontynuację technik OFDM zastosowanych w ostatnim dziesięcioleciu w systemach radiowych, takich jak IEEE 802,11a/g (Wi-Fi), IEEE 802.16-2004 (WiMAX) i innych.

Ze względu na szerokie pasmo sygnału UWB możliwe jest rozróżnienie wielodrogowych składowych sygnału pojawiających się z różnym opóźnieniem i w konsekwencji można zaprojektować system odporny na skutki zaniku wielodrogowego.

Sygnały UWB są trudniejsze do wykrycia niż sygnały konwencjonalnych systemów radiokomunikacyjnych. Ponieważ UWB zajmują szerokie pasma ich widmo może być podobne do szumu. Przy wykorzystaniu randomizowanych kodów mogą służyć do przesyłania danych z szybkością wielu Mbit/s. Bit danych jest zwykle reprezentowany przez dużą liczbę impulsów o małej amplitudzie. Te właściwości transmisji UWB powodują małe prawdopodobieństwo detekcji (*low probability of detection, LPD*) i małe prawdopodobieństwo podsłuchu (*low probability of interception, LPI*).

Warto zwrócić również uwagę na to, że urządzenia UWB dla przesłania określonej liczby bitów potrzebują czasu znacznie krótszego niż urządzenia innych systemów radiowych. Zatem czas aktywności nadajnika i odbiornika UWB może być mniejszy niż urządzeń opartych na konwencjonalnych systemach transmisji. Skutkiem tego jest mniejsze zużycie energii zasilania oraz mniejsze prawdopodobieństwo wykrycia transmisji i lokalizacji źródła.

Bardzo wąskie impulsy RF umożliwiają lokalizację obiektów z dokładnością znacznie lepszą niż uzyskiwana przy wykorzystaniu satelitarnych systemów nawigacyjnych (GPS) i innych systemów radiowych. Penetracja fal radiowych w głąb różnych materiałów umożliwia lokalizację przewodów i rur w ścianach i stropach pomieszczeń, analizę struktury gruntu i podobne zastosowania.

Zwłaszcza urządzenia wykorzystujące wąskie impulsy, bez fali nośnej RF, ze względu na brak klasycznych elementów radiowego urządzenia mikrofalowego, mogą mieć bardzo prostą konstrukcję, co decyduje o niskim koszcie produkcji i stwarza szanse dla rozwoju masowych aplikacji rynkowych.

W tab. 2.3.1 zestawiono właściwości sygnałów UWB oraz związane z tymi cechami sygnału zalety, wady i preferencje stosowania.

Tab. 2.3.1

Właściwość	Zalety	Wady	Zastosowania
Bardzo duża szerokość pasma RF: – bezwzględna [MHz] i względna [$> 20\%$]	– komunikacja danych z dużymi szybkościami; – możliwość wykorzystania zysku przetwarzania; – niskie częstotliwości penetrują ściany i grunt	– możliwe zakłócanie istniejących systemów radiowych; – możliwe zakłócenia ze strony istniejących systemów radiowych	– WPAN o dużej szybkości; – komunikacja z małą mocą RF, trudna do wykrycia; – lokalizacja wewnątrz pomieszczeń; – wielodostęp do zasobów RF
Bardzo krótkie impulsy	– bezpośrednie rozdzielanie dyskretnych składowych sygnału wielodrogowego; – zysk odbioru zbiorczego składowych wielodrogowych	– duża liczba składowych wielodrogowych; – długie czasy synchronizacji odbiornika	– komunikacja i lokalizacja z małą mocą RF
Występowanie wielokrotnych odbić	– mały margines na szybki zanik sygnału; – mała moc RF	– rozrzut kąta nadejścia sygnału	– komunikacja NLOS wewnątrz pomieszczeń i na statkach
Transmisja bez fali nośnej	– uproszczenie urządzeń; – miniaturyzacja	– nieprzydatność do stosowania z antenami formującymi wąską wiązkę	– inteligentne sieci sensorowe

2.3.4 Przepisy FCC USA

Federalna Komisja Łączności (FCC) USA [<http://www.fcc.gov>; 1; 25] wyróżniła osiem podgrup aplikacji UWB należących do dwóch kategorii. Pierwszą kategorię stanowią różne radarowe systemy i urządzenia do analizy i zobrazenia otoczenia. Są do niej zaliczane:

- radary do penetracji gruntu (GPR),
- systemy do penetracji i zobrazenia struktury ścian,
- systemy obserwacji przez ściany,
- medyczne systemy obrazujące,
- systemy nadzoru,
- systemy radarowe w pojazdach.

Drugą kategorię urządzeń UWB stanowią systemy bliskiego zasięgu do komunikacji w pomieszczeniach oraz systemy komunikacji na otwartym powietrzu.

Należy tu zauważyć, że zgodnie z przepisami FCC techniki UWB nie powinny być wykorzystywane w zabawkach, na pokładzie samolotu, statku lub satelity.

Urządzenia zobrazenia radarowego (*Radar imaging device*), nazywane również radarami w paśmie podstawowym lub radarami impulsowymi, są urządzeniami przeznaczonymi do uzyskania obrazu obiektów, które znajdują się na drodze promieniowanej fali radiowej, np. pod powierzchnią gruntu, wewnątrz ściany lub za ścianą. Tę samą zasadę działania można zastosować do badania innych stratnych materiałów dielektrycznych, stąd przewidywane

zastosowania tego rodzaju radarów w wielu dziedzinach gospodarki, w budownictwie i pracach remontowych, w kopalniach, a ponadto do uzyskania obrazów w zastosowaniach medycznych, oraz w urządzeniach dozoru i antykolizyjnych.

Najczęściej wymieniane są następujące możliwe zastosowania radarów impulsowych:

- Radary do penetracji gruntu (*Ground penetrating radar, GPR*) są to urządzenia zobrazowania radarowego, które pracując stykają się lub znajdują się bardzo blisko powierzchni gruntu. Są stosowane w celu odwzorowania struktury pod powierzchnią gruntu. Mogą znaleźć zastosowanie do wykrywania metalowych lub niemetalowych rur, kabli elektrycznych, plastikowych min, warstw skalnych i obiektów archeologicznych, a także poszukiwania usterek w mostach, wiaduktach, czy pomiaru grubości warstwy lodu.

Antena nadawcza GPR promieniuje krótki impuls spolaryzowanej fali wielkiej częstotliwości [22]. Antena odbiorcza wraz z odpowiednim odbiornikiem rejestruje zmiany sygnału odbitego od obiektów podziemnych. Głębokość penetracji jest zależna od elektrycznej przewodności gruntu. Optymalne warunki penetracji występują w piaszczystym, suchym gruncie, w suchych skałach lub suchym betonie, gdzie uzyskiwano głębokość penetracji do 15 m. W mokrych gliniastych glebach głębokość penetracji może wynosić tylko kilka centymetrów. Ze względu na mniejsze tłumienie fali w gruncie korzystne jest wykorzystywanie częstotliwości poniżej 1 GHz. Wyższe częstotliwości są silniej tłumione, ale umożliwiają uzyskanie większej rozdzielczości.

- Radary do detekcji w ścianach (*Wall radar imaging device*) są to urządzenia do badania i odwzorowania wnętrza ścian budynków, mostów i innych konstrukcji, a także skał.
- Radary do detekcji przez ścianę (*Through-wall radar imaging device*) są to urządzenia transmitujące energię przez materiały nieprzezroczyste dla światła widzialnego, takie jak ściany lub stropy. Mogą znaleźć zastosowanie do wykrywania ruchu i lokalizowania osób i przedmiotów ukrytych za ścianą, przeszukiwania rumowisk powstałych w wyniku zawalenia się budynków lub przeszukiwania lawin.
- Urządzenia obrazujące dla zastosowań medycznych (*Medical imaging device*) są to czujniki do wykrywania położenia lub ruchu obiektu wewnątrz ciała człowieka lub zwierzęcia.

W istocie GPR i inne radary impulsowe stosowane do zobrazowania struktury materiałów analizują przenikalność elektryczną, przewodność (konduktywność), przenikalność magnetyczną materiałów znajdujących się na drodze fali radiowej. Niejednorodności wewnątrz materiału / ośrodka, na który pada fala nadawana powodują zmiany fali odbitej. Analiza parametrów fali odbitej uzyskiwanej podczas przemieszczania radaru wzdłuż określonej drogi umożliwia zobrazowanie zmian struktury materiału, na który skierowano falę radiową. Urządzenia te wytwarzają energię RF tylko wtedy, gdy są używane, a wiązka anteny nadawczej jest skierowana w głąb materiału pochłaniającego fale. Zatem są urządzeniami stwarzającymi małe prawdopodobieństwo zakłócania służb radiowych.

- Urządzenia do lokalizowania i śledzenia (*Location sensing and tracking*) mogą być siecią czujników (odbiorników) zainstalowanych w ściśle ustalonych miejscach w celu ustalenia położenia poruszających się nadajników UWB. Nadajniki te mogą być noszone przez monitorowane osoby lub umocowane do śledzonych przedmiotów.

Do tej grupy zaliczane są również systemy dozoru radiowego tworzące "elektroniczny parkan", mające za zadanie wykrywanie osób lub przedmiotów na dozorowanym obszarze. Są instalacjami stacjonarnymi, mogą być budowane w pomieszczeniach i na otwartym powietrzu. Zwykle wytwarzają pole tylko na granicy chronionego obszaru.

Urządzenia do lokalizowania i śledzenia mogą być stale aktywne. Zatem w określonych miejscach stwarzają duże prawdopodobieństwo zakłócania służb radiowych.

- Urządzenia radarowe montowane w pojazdach lądowych (*Vehicular radar device*) służą do detekcji obecności lub ruchu osób lub obiektów w pobliżu pojazdu, np. w celu ostrzegania przed kolizją na drodze. Radary te są używane tylko podczas ruchu pojazdów lądowych. Generowana wiązka jest skierowana poziomo na wysokości ok. 0,5 m. Pracują w paśmie 24,125 GHz zajmując pasmo (–20 dB) o szerokości ± 2 GHz. Duża liczba urządzeń może pojawić się na głównych drogach i autostradach.

Uwaga. Ze względu na wybrany zakres częstotliwości radary te stwarzają zagrożenie dla służby radioastronomicznej [10].

Urządzenia komunikacyjne (*UWB communication device*) są urządzeniami bliskiego zasięgu do nadawania i/lub odbioru informacji. Urządzenia UWB mogą pracować z bardzo małym poziomem mocy i obsługiwać wielu użytkowników WPAN z szybkością znacznie większą niż 100 Mbit/s. W niektórych lokalizacjach wewnątrz budynków mogą być używane bardzo intensywnie. Nadajniki urządzeń mogą być aktywne tylko przez niewielki procent czasu (np. mysz komputerowa) lub okresowo przez bardzo duży procent czasu (np. domowe łącze wideo).

Systemy UWB umożliwiające przesyłanie danych ze względu na zasadę działania można podzielić na wielopasmowe OFDM (MB OFDM) oraz impulsowe (impuls radio, IR).

Systemy wielopasmowe w środowisku wielu użytkowników pracujących asynchronicznie charakteryzują się lepszym wykorzystaniem widma, natomiast impulsowe mogą mieć znacznie prostszą konstrukcję, a zatem również ich koszt jest znacznie mniejszy.

Biorąc pod uwagę typowe zastosowania wymagania FCC dotyczące ograniczenia poziomu mocy promieniowanej zróżnicowano uwzględniając przewidywaną liczbę urządzeń, ich aktywność i środowisko pracy [1, 2]. Dopuszczono moce urządzeń UWB podane w tab. 2.3.2.a i tab. 2.3.2.b.

Uwaga. Dla potrzeb niniejszego opracowania zamieszczony tu opis wymagań FCC uproszczono. W oryginale FCC podano osobno wymagania dla ośmiu różnych zastosowań urządzeń UWB.

Tab. 2.3.2.a: Dopuszczalna moc promieniowana urządzeń UWB do zobrazowania wg wymagań FCC

Zakres częstotliwości [MHz]	e.i.r.p. / 1 MHz [dBm]
960 – 1610	–65,3
1610 – 1990	–53,3
1990 – 3100	–51,3
3100 – 10600	–41,3
powyżej 10600	–51,3

Przy pomiarze z RBW nie mniej niż 1 kHz powinny być spełnione dodatkowe warunki:

Zakres częstotliwości [MHz]	e.i.r.p. / 1kHz [dBm]
1164 – 1240	–75,3
1559 – 1610	–75,3

Tab. 2.3.2.b: Dopuszczalna moc promieniowana komunikacyjnych urządzeń UWB wg wymagań FCC

Zakres częstotliwości [MHz]	e.i.r.p. / 1 MHz w pomieszczeniach [dBm]	e.i.r.p. / 1 MHz na zewnątrz pomieszczeń [dBm]
960 – 1610	–75,3	–75,3
1610 – 1990	–53,3	–63,3
1990 – 3100	–51,3	–61,3
3100 – 10600	–41,3	–41,3
powyżej 10600	–51,3	–61,3

Przy pomiarze z RBW nie mniej niż 1 kHz powinny być spełnione dodatkowe warunki:

Zakres częstotliwości [MHz]	e.i.r.p. / 1kHz [dBm]
1164 – 1240	–85,3
1559 – 1610	–85,3

Ponadto, jeżeli częstotliwość f_M , na której występuje maksimum promieniowania jest większa niż 960 MHz, to moc e.i.r.p. w paśmie o szerokości 50 MHz, którego środek przypada na f_M , powinna być ograniczona do 0 dBm.

W odniesieniu do urządzeń obrazowania za ścianą zastosowano następujące ograniczenia:

- albo muszą pracować poniżej 960 MHz (lecz w tym przypadku jest wymagana licencja),
- albo środkowa częstotliwość f_C pasma i częstotliwość, na której występuje maksimum emisji f_M muszą być pomiędzy 1990 MHz a 10600 MHz.

2.3.5 Regulacje w Europie

Wstępna analiza oddziaływania urządzeń UWB wykonana przez ECC CEPT, której wyniki opublikowano w raporcie [11] wykazała, że zdaniem specjalistów europejskich dla ochrony większości służb radiokomunikacyjnych należy przyjąć wymagania ostrzejsze o 20 dB do 30 dB, niż wartości dopuszczalne gęstości mocy sygnałów UWB zdefiniowane przez FCC. W przypadku sieci, do których dostęp jest wymagany na zewnątrz (służby stałe, radiowe sieci dostępowe, łącza satelitarne, radary lotnicze, meteorologiczne i in.) należy brać pod uwagę łączną wartość zakłóceń wytwarzanych przez urządzenia UWB w pobliżu narażonego odbiornika. W przypadku systemów funkcjonujących wewnątrz pomieszczeń (UMTS, RLAN) czynnikiem dominującym są zakłócenia powodowane tylko przez najbliższe urządzenia UWB.

Potencjalne zagrożenie stwarzane przez urządzenia UWB jest związane ze sposobem ich wykorzystania. GPR i inne urządzenia radarowe do badania konstrukcji lub osób i zwierząt będą używane sporadycznie, w określonych miejscach, przez przeszkolony personel, a generowana wiązka będzie skierowana w głąb gruntu lub w ścianę, gdzie będzie tłumiona. Liczba użytkowanych urządzeń będzie niewielka. Natomiast aktywność nadajników wielu urządzeń komunikacyjnych, np. domowego łącza wideo, może rozciągać się na wiele godzin i wszystko wskazuje na to, że w najbliższych latach liczba tego rodzaju urządzeń będzie gwałtownie rosła.

Wartości graniczne przyjęte ostatecznie przez ECC, określone w Decyzji ECC/DEC/(06)04 [12], wypracowano w drodze konsensusu po długich dyskusjach. Maksymalną wartość e.i.r.p., taką jak w wymaganiach FCC dla całego zakresu 3,1 – 10,6 GHz, dopuszczono tylko w podzakresie 6 – 8,5 GHz, tab. 2.3.2.3.

Tab. 2.3.3: Wartości graniczne e.i.r.p. urządzeń UWB w zakresach poniżej 10,6 GHz wg ECC CEPT [12]

Zakres częstotliwości [GHz]	Maksymalna średnia gęstość e.i.r.p. [dBm/MHz]	Maksymalna szczytowa gęstość e.i.r.p. [dBm/50 MHz] (Uwaga 2)
poniżej 1,6	–90	–50
1,6 – 3,8 (Uwaga 1)	–85	–45
3,8 – 4,8 (Uwaga 1)	–70	–30
4,8 – 6	–70	–30
6 – 8,5	–41,3	0
8,5 to 10,6	–65	–25
powyżej 10,6	–85	–45

Uwaga 1. ECC nadal rozważa, czy wydać osobną decyzję obejmującą zakres 3,1 – 4,8 GHz [13]. Ze względu na konieczność unikania zakłóceń służb radiokomunikacyjnych wykorzystujących lokalnie częstotliwości w tym podzakresie, aby dopuścić poziom emisji –41,3 dBm/MHz, taki jak w wymaganiach FCC, proponuje się takie środki, jak wprowadzenie "Detect and Avoid (DAA)".

Uwaga 2. Szczytowa gęstość e.i.r.p. może być mierzona w paśmie o szerokości 3 MHz. W tym przypadku wartość graniczną maksymalnej szczytowej gęstości e.i.r.p. należy obniżyć o $20 \log(50/3) = 24,4$ dB.

Dodatkowe objaśnienia:

- Średnia gęstość e.i.r.p. (mean e.i.r.p. density) oznacza moc mierzoną za pomocą detektora wartości średniokwadratowej (RMS) przy szerokości pasma analizatora widma (resolution bandwidth, RBW) równej 1 MHz i uśrednioną w czasie 1 ms lub krótszym.
- Szczytowa gęstość e.i.r.p. (peak e.i.r.p. density) oznacza moc maksymalną zawartą w paśmie o szerokości 50 MHz, którego środek ustala się na częstotliwości, na której występuje największa średnia gęstość e.i.r.p. Jeżeli moc jest mierzona w paśmie o szerokości B [MHz], to poziom dopuszczalny powinien być skalowany w proporcji $20 \log(50/B)$ [dB].
- Maksymalna gęstość e.i.r.p. (maximum e.i.r.p. density) oznacza największą moc sygnału mierzoną w dowolnym kierunku na dowolnej częstotliwości w zdefiniowanym zakresie częstotliwości.

Ograniczenia ustanowione przez ECC zwłaszcza dotyczące poziomu emisji w zakresach od 3,1 GHz do 6 GHz, obejmujących pierwsze grupy częstotliwości standardu ECMA-368 [16], por. punkt 2.3.14, który zostanie prawdopodobnie przyjęty [www.wimedia.org] przez ISO/IEC jako światowy standard UWB, stwarzają sytuację, w której na rynku europejskim będą pojawiać się urządzenia UWB zgodne z regulacjami FCC i normą ISO, ale nie spełniające wymagań określonych w decyzji ECC. Zdaniem reprezentantów przemysłu europejskiego jest to ograniczenie, które odbije się niekorzystnie na rozwoju ekonomicznym Europy i stwarza miejsce dla handlu urządzeniami UWB w szarej strefie.

23 listopada 2006 Komisja Europejska opublikowała dokument [14] zawierający projekt decyzji Komisji odnośnie zharmonizowanego wprowadzania UWB we wspólnocie. Za UWB uznano wszystkie urządzenia, których pasmo emisji jest szersze niż 50 MHz.

Komisja jest zdania, że używanie urządzeń UWB powinno być dopuszczone na zasadzie "non-interference and non-protected basis", co oznacza że te urządzenia UWB nie mogą powodować szkodliwych zakłóceń żadnej służby radiokomunikacyjnej i nie mogą żądać ochrony przed szkodliwymi zakłóceniami powodowanymi przez służby radiokomunikacyjne.

W projekcie decyzji Komisji Europejskiej zobowiązuje się państwa członkowskie do zezwolenia na stosowanie na zasadzie "non-interference and non-protected" urządzeń UWB, których parametry określono w aneksie do decyzji, pod warunkiem że są używane tylko

wewnątrz pomieszczeń i nie są dołączone do stacjonarnej instalacji, stacjonarnej infrastruktury lub anteny znajdującej się na zewnątrz.

Wartości graniczne postulowane w decyzji Komisji podano w tab. 2.3.4. Wartości, które wyróżniono szarym tłem różnią się od zdefiniowanych w decyzji ECC, por. tab. 2.3.3 [15].

Tab. 2.3.4: Wartości graniczne e.i.r.p. urządzeń UWB w zakresach poniżej 10,6 GHz wg projektu decyzji Komisji Europejskiej [15]

Zakres częstotliwości [GHz]	Maksymalna średnia gęstość e.i.r.p. [dBm/MHz]	Maksymalna szczytowa gęstość e.i.r.p. [dBm/50 MHz]
poniżej 1,6	–90	–50
1,6 – 2,7	–85	–45
2,7 – 3,4	–70	–30
3,4 – 3,8	–85	–45
3,8 – 4,2	–70	–30
4,2 – 4,8	–41,3	0
4,8 – 6	–70	–30
6 – 8,5	–41,3	0
8,5 to 10,6	–65	–25
powyżej 10,6	–85	–45

Zatem w Europie polityka regulacyjna zmierza do zaliczenia urządzeń UWB, spełniających określone wymagania, do kategorii urządzeń, których używanie nie wymaga jakiejkolwiek procedury administracyjnej (pozwolenia na używanie urządzenia radiowego, licencji na używanie pasma lub obu). Jednakże dopuszczalne poziomy emisji w poszczególnych podzakresach różnią się od przyjętych przez FCC.

2.3.6 Zalecenia ITU-R

Wytyczne dla administracji odnośnie wdrażania systemów i urządzeń UWB zawiera Zalecenie ITU-R SM.1756 [24]. W zaleceniu tym zawarto kilka postanowień istotnych dla wypracowania krajowej polityki odnośnie technik UWB:

- Zgodnie z ITU-R Resolution 952 (WRC-03) UWB nie należy traktować jako aplikacji ISM ^{*/}.
- ITU-R reprezentuje opinię, że aplikacje wykorzystujące techniki UWB, które nie są obecnie uznawane za pracujące zgodnie z przydziałami częstotliwości dla służb radiokomunikacyjnych, nie mogą powodować zakłóceń w pracy tych służb i nie mogą wymagać ochrony przed zakłóceniami ze strony tych służb.
- UWB nie są zaliczane przez ITU-R do służb radiokomunikacyjnych. Uważa się je za urządzenia bliskiego zasięgu (*short-range devices, SRD*), które nie mogą wymagać ochrony od zakłóceń. Jednakże ITU dopuszcza, aby krajowe administracje wydawały licencje na specyficzne aplikacje UWB i zapewniały im ochronę na swoim terytorium.
- Szczególnej ochrony przed niekontrolowanym wzrostem poziomu zakłóceń ze strony UWB wymagają pasma częstotliwości wykorzystywane przez służby radionawigacyjne, ponieważ z ich funkcjonowaniem wiąże się ochrona życia ludzkiego i własności, oraz służby pasywne.
- Ze względu na pasywne służby mierzące naturalne promieniowanie elektromagnetyczne o bardzo niskich poziomach, do których zalicza się: satelitarne badania Ziemi (*Earth*

^{*/} ISM – przemysłowe, naukowe i medyczne. Służby radiokomunikacyjne pracujące w zakresach ISM muszą akceptować szkodliwe zakłócenia jakich mogą doznać podczas pracy urządzeń ISM.

exploration-satellite service, EESS), radioastronomię (*radio astronomy service, RAS*) oraz badania kosmosu (*Space Research Service, SRS*), istnieją zakresy częstotliwości, w których zabrania się wszelkich emisji [zob. Uwaga nr 5.340 do Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości, Rozp. RM z dn. 25 czerwca 2005 r.]. Do zakresów tych należą m.in.:

- 1400 – 1427 MHz,
 - 2690 – 2700 MHz, z wyjątkiem określonych w uwadze nr 5.422 RR,
 - 10,68 – 10,7 GHz, z wyjątkiem określonych w uwadze nr 5.483 RR,
 - 15.35 – 15.4 GHz, z wyjątkiem określonych w uwadze nr 5.511 RR,
- i inne.

Zgodnie z definicją w Zaleceniu ITU-R P.372 szum radiowy (*radio noise*) jest sumą emisji z różnych źródeł, które nie są nadajnikami radiowymi. Charakterystyka amplitudowa obserwowanego szumu radiowego ma rozkład normalny, dlatego może być traktowany jako szum biały (Gaussa). Zatem w tradycyjnym ujęciu w danym punkcie pomiarowym nie ma pojedynczego dominującego źródła szumu. Wprowadzenie systemów radiowych UWB stwarza zagrożenie polegające na lokalnym wzroście poziomu szumu w pasmach wykorzystywanych przez służby radiokomunikacyjne w porównaniu z poziomami określonymi w Zaleceniu P.372. W związku z tym ITU-R analizuje konieczność opracowania nowych technik pomiaru szumu radiowego [27].

2.3.7 Prace ETSI

W ETSI w latach 2004-2006 prace dotyczące systemów i urządzeń UWB prowadzono w ramach komitetu technicznego ERM. Z wyjątkiem normy EN 302 435-1 [33] opublikowano wyłącznie dokumenty mające charakter informacyjny, nazywane raportami technicznymi ETSI (ETSI Technical Report) [28-32], które do publikacji zatwierdza właściwy komitet techniczny (nie są opiniowane przez krajowe komitety normalizacyjne). Opracowanie dokumentów o charakterze norm określających wymagane parametry urządzeń jest planowane na rok 2007 r. i lata późniejsze.

W raportach ETSI opisano przykłady zastosowań i wstępne założenia dotyczące wymagań widmowych dla typowych zastosowań.

Urządzenia UWB do śledzenia lokalizacji

Wykorzystanie technik UWB do śledzenia lokalizacji osób lub przedmiotów (*UWB location tracking*), por. ETSI TR 102 495-3 [32], polega na lokalizacji aktywnych radiowych znaczników (ang. "tag"), noszonych przez monitorowane osoby lub zamocowanych do śledzonego obiektu. Znaczniki te mogą pracować tylko w trybie nadawania lub w trybie nadawania i odbioru. Znaczniki UWB powinny znajdować się na obszarze objętym zasięgiem sieci stacjonarnych stacji referencyjnych. Stacje referencyjne komunikują się ze znacznikami – w najprostszym rozwiązaniu tylko odbierają sygnały nadawane przez znaczniki. Lokalizacja znacznika w dwóch lub trzech wymiarach jest możliwa w wyniku analizy czasu i/lub kąta nadejścia sygnału radiowego śledzonego znacznika do poszczególnych stacji referencyjnych. Tego rodzaju urządzenia mogą znaleźć szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach gospodarki i przynieść korzyści społeczne i ekonomiczne, np. w celu zwiększenia bezpieczeństwa osób, które powinny być monitorowane (zagrożenia w miejscu pracy, chorzy przemieszczający się w szpitalu), do potwierdzania obecności osób lub śledzenie miejsca składowania wartościowych przedmiotów.

Wąskie impulsy stosowane do lokalizacji UWB umożliwiają uzyskanie dokładności w określeniu położenia rzędu kilkunastu centymetrów, nawet w środowisku z wieloma przeszkodami zaburzającymi propagację fal radiowych (ściany, meble, drzwi). Inną zaletą

emisji pakietu wąskich impulsów jest mała średnia aktywność nadajnika ($< 1\%$) i w konsekwencji mały średni pobór prądu z baterii, co wydłuża okres bezobsługowej pracy znacznika. Zatem zastosowanie technik UWB umożliwi stworzenie nowej generacji urządzeń śledzących położenie, szczególnie przydatnych do stosowania wewnątrz pomieszczeń.

Ze względu na konieczność budowy kosztownej sieci odbiorczych stacji referencyjnych, mimo znacznie większej dokładności niż oferowana przez istniejące konkurencyjne rozwiązania (np. GPS), systemy lokalizacji UWB raczej nie będą stosowane na zewnątrz budynków. Poza tym systemy UWB do śledzenia lokalizacji osób lub przedmiotów ze względu na koszt infrastruktury będą rozwijane przede wszystkim dla zastosowań profesjonalnych, a nie jako urządzenia powszechnie dostępne.

Elementy typowego systemu UWB przeznaczonego do lokalizacji obiektów przedstawiono na rys. 2.3.2. Z przemieszczającymi się obiektami, których położenie powinno być określone, są związane znaczniki wyposażone w nadajniki radiowe UWB. Sygnały emitowane przez te nadajniki są odbierane przez sieć stacjonarnych odbiorników o znanych lokalizacjach. Analiza sygnałów uzyskiwanych przez odbiorniki umożliwia ustalenie położenia znacznika w przestrzeni trójwymiarowej. Odległości pomiędzy odbiornikami powinny być takie, by znacznik znajdował się zawsze w zasięgu co najmniej trzech (lokalizacja w dwóch wymiarach) lub co najmniej czterech (lokalizacja przestrzenna) odbiorników. Zakłada się, że zasięg nadajnika nie będzie większy niż 100 m.

Jeżeli wymagana dokładność określania odległości ma wynosić ΔR [m], to konieczna szerokość pasma emisji [Hz] wynosi:

$$BW = \frac{c}{\Delta R}$$

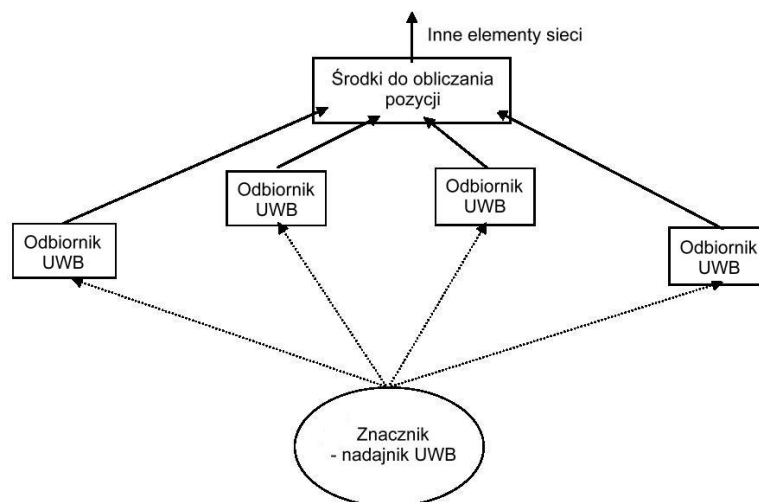
gdzie: c jest szybkością fali radiowej (3×10^8 m/s).

Zatem, aby uzyskać rozdzielczość lokalizacji rzędu 10 cm należy dysponować pasmem BW o szerokości 3 GHz. Tej szerokości pasma emisji odpowiada szerokość impulsów rzędu 0,3 ns. Ze względów praktycznych system o wymaganej szerokości pasma może pracować w zakresie częstotliwości od 6 GHz do 9 GHz.

Inne parametry dopuszczalne w aspekcie kompatybilności ze służbami radiokomunikacyjnymi:

- maksymalna średnia widmowa gęstość mocy (e.i.r.p.): -41,3 dBm/MHz;
- częstotliwość powtarzania impulsów nie mniejsza niż 1 MHz.

Zastosowanie powinno być ograniczone do pomieszczeń.



Rys. 2.3.2: Elementy typowego systemu UWB do lokalizacji obiektu w pomieszczeniach

Rozróżnianie i charakterystyki obiektów

Sensory UWB umożliwiają wykrywanie z niewielkiej odległości obecności lub położenia obiektów oraz identyfikację i klasyfikację obiektów, por. ETSI TR 102 495-1, TR 102 495-2 [30, 31], nawet gdy obiekt jest ukryty (niewidoczny).

Jako zastosowania można wskazać:

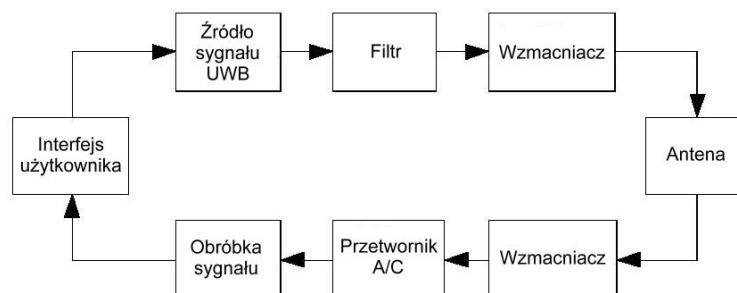
- aplikacje odnoszące się do bezpieczeństwa użytkowników;
- wykrywanie położenia ciała ludzkiego, np. zbliżenie ręki do ostrego narzędzia;
- pomiar grubości materiału i penetracja materiału, np. w celu ochrony przed zniszczeniem instalacji wskutek wywiercenia otworu w ścianie, lub wykrycia niejednorodności, takich jak szczeliny;
- aplikacje medyczne (czujniki oddechu, rytmu serca);
- analizy i klasyfikacja materiałów w przemyśle;
- detekcja broni i środków wybuchowych.

W systemach tego rodzaju w stanie spoczynkowym nadajnik jest nieczynny, uaktywniany zostaje tylko w razie korzystania z urządzenia. Zakłada się, że większość takich urządzeń będzie wykonana jako urządzenia przenośne, podczas pracy trzymane w ręku, albo będzie częścią maszyny.

Do wymienionych zastosowań przydatne są zakresy częstotliwości, w których fale elektromagnetyczne przenikają przez materiały takie jak ubrania, ciało ludzkie, materiały budowlane, wilgotny grunt.

Schemat blokowy typowego urządzenia UWB do analizy materiałów przedstawiono na rys. 2.3.2.3.

Impulsowe czujniki wymagają generacji impulsów o szerokości 0,1 ns do 1 ns z częstotliwością powtarzania > 5 MHz. Jeżeli impulsy są nadawane bez fali nośnej mogą być wytwarzane przez źródła napięcia wykorzystujące zjawisko szybkiego rozładowania zgromadzonej energii w krótkiej linii transmisyjnej. Do szybkiego rozładowania energii mogą być użyte elementy półprzewodnikowe pracujące w trybie lawinowym. Do innych zastosowań mogą być potrzebne czujniki wytwarzające ciągłą falę UWB.



Rys. 2.3.3: Elementy typowego urządzenia UWB do analizy materiałów

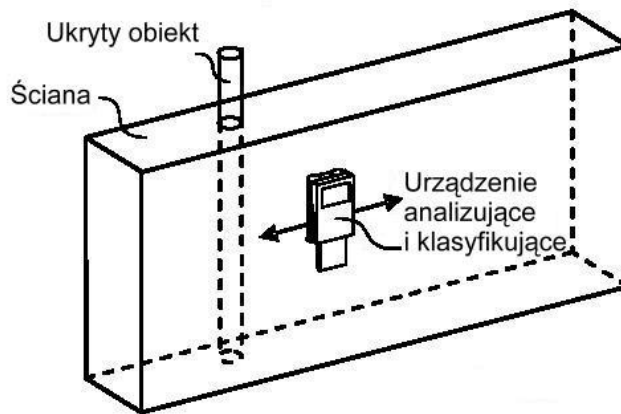
Parametry dopuszczalne w aspekcie kompatybilności ze służbami radiokomunikacyjnymi:

- zakres częstotliwości od 2,2 GHz do 8 GHz;
- maksymalna średnia widmowa gęstość mocy (e.i.r.p.): -50 dBm/MHz;
- częstotliwość powtarzania impulsów: > 5 MHz.

Sygnały UWB mogą być wykorzystywane w urządzeniach do wykrywania instalacji ukrytych w ścianie, takich jak metalowe rury i kable, elementy metalowe w betonie zbrojonym, rury

z plastiku lub niewypełnione przestrzenie, bez niszczenia ścian. Detektory UWB mogą być także wykorzystane do badania niejednorodności konstrukcji, takich jak mosty, balkony, podłogi.

Przykład zastosowania UWB do wykrywania instalacji ukrytych w ścianie przedstawiono na rys. 2.3.4.



Rys. 2.3.4: Zastosowanie urządzenia UWB do penetracji konstrukcji ściany

Urządzenie powinno promieniować szerokopasmowy sygnał i przechwytywać sygnał odbity. Pojedynczy pomiar nie odwzorowuje struktury obiektu. Dlatego urządzenie powinno być przesuwane po powierzchni ściany w celu zarejestrowania sekwencji sygnałów odbitych, której obróbka pozwala na stworzenie przestrzennego obrazu na wyświetlaczu urządzenia.

W zastosowaniach do analizy obiektów podziemnych urządzenie powinno być przesuwane lub przewożone po powierzchni gruntu. W tym przypadku moc RF jest promieniowana w kierunku gruntu.

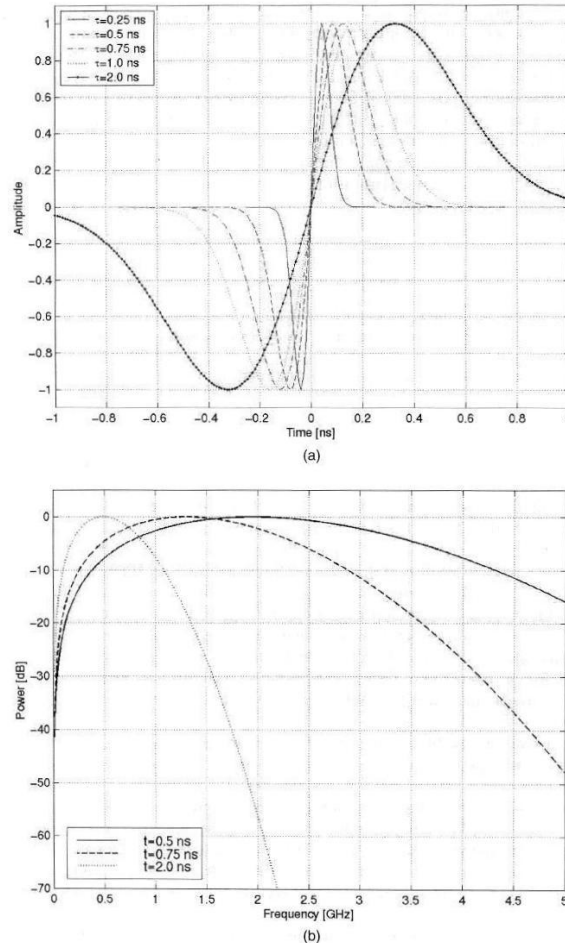
2.3.8 Impulsowe systemy UWB

Ze względu na bardzo dużą szerokość pasma sygnału impulsowego UWB właściwości propagacyjne dla składowych sygnału wewnątrz zajmowanego pasma częstotliwości wyraźnie różnią się. Np. strefa Fresnela, której rozmiary są związane z długością fali, jest większa na niższych częstotliwościach, co skutkuje zróżnicowaniem podatności składowych widma impulsu na zaburzenia powodowane przez przeszkody. Także poziom zakłóceń naturalnych oraz wytwarzanych przez pracujące urządzenia radiowe jest różny w różnych podzakresach częstotliwościach.

Właściwości kanału radiowego dla potrzeb transmisji impulsów UWB można badać w dziedzinie częstotliwości lub czasu [26]. W pierwszym przypadku wąskopasmowy sygnał pomiarowy jest przestrajany w analizowanym zakresie częstotliwości. Do tego rodzaju badań może być wykorzystany wektorowy analizator sieci (pomiar parametru S_{21}). W drugim przypadku jest nadawany wąski impuls i analizowana jest odpowiedź impulsowa kanału. Do tego celu może być wykorzystany oscyloskop.

Ze względu na pracę impulsową współczynnik aktywności (stosunek czasu emisji do sumy czasu emisji i czasu przerwy) tego rodzaju nadajnika UWB jest bardzo mały. Względnie duży odstęp między nadawanymi impulsami powoduje małe prawdopodobieństwo interferencji między impulsami odbieranymi z różnych źródeł. Odbiornik może być również okresowo uaktywniany przebywając większość czasu w uśpieniu. Takie urządzenia efektywnie wykorzystują energię zasilania, skutkiem tego przez długi czas mogą być zasilane z baterii i stosowane w sieciach autonomicznych sensorów.

W zasadzie impuls nadawany w systemie UWB może mieć dowolny kształt, pod warunkiem spełnienia administracyjnych ograniczeń odnośnie poziomu widmowej gęstości mocy, por. punkt 2.3.5. Najczęściej rozważanym modelem impulsu UWB jest pojedynczy okres impulsu Gaussa – monocykl Gaussa (*Gaussian monocycle*). Przykłady kształtu nanosekundowych impulsów tego rodzaju (we współrzędnych czas-amplituda) i ich charakterystyk widmowych (we współrzędnych częstotliwość-amplituda), zaczerpnięte z pracy [20] podano na rys. 2.3.5.



Rys. 2.3.5: Charakterystyki monocyklu Gaussa [20]

Środkowa częstotliwość zajmowanego pasma (f_c) jest związana z szerokością impulsu (T_p) zależnością: $f_c = 1/T_p$. Widmo monocyklu Gaussa nie jest symetryczne. Szerokość pasma na poziomie -3 dB wynosi ok. 116% f_0 . Np. przy długości impulsu $T_p = 0,75$ ns uzyskuje się częstotliwość środkową 1,33 GHz i szerokość pasma 1,55 GHz.

2.3.9 Modulacje impulsowe UWB

W systemie impulsowym informacja może być kodowana metodą modulacji: położenia impulsów (PPM), fazy/polaryzacji bipulsu (ujemny impuls poprzedzający impuls dodatni, lub vice versa), amplitudy impulsów (PAM), kluczowania amplitudy (OOK) lub ich kombinacji.

Teoretycznie w przypadku PPM i PAM mogą być stosowane modulacje wielowartościowe, w których do każdego z M stanów znamienych (odpowiednio położenia impulsu lub amplitudy impulsu) jest przypisana kombinacja N bitów przesyłanych danych, gdzie $M = 2^N$.

W technice PPM położenie impulsu względem wartości odniesienia jest uzależnione od przesyłanych danych. Prowadzone prace dotyczą na ogół binarnej UWB PPM.

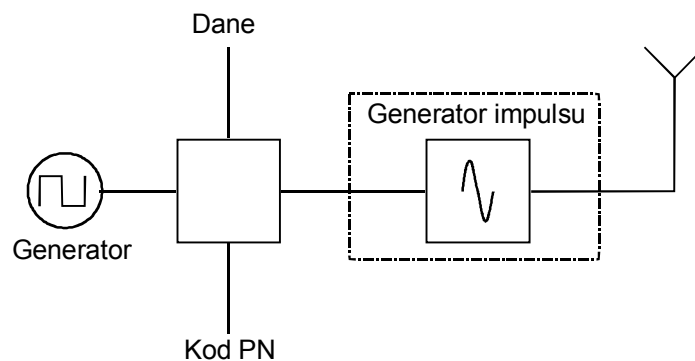
Ponieważ sygnał PPM może mieć dyskretne składowe widma, które nie przenoszą informacji a mogą powodować zakłócenia, aby uzyskać widmo o charakterze szumowym stosuje się kodowanie randomizujące położenie impulsów (z zastosowaniem ciągów pseudolosowych).

W przypadku modulacji bifazowej do reprezentowania zera i jedynki jest wykorzystywany impuls o specyficznym kształcie i jego negacja. W warunkach propagacji wielodrogowej modulacja bifazowa zapewnia zysk od 3 dB do 6 dB względem PPM. Stosunek szczytowej wartości mocy do wartości średniej jest mniejszy od 3 (w porównaniu do równego 2 dla przebiegu sinusoidalnego).

W technice PAM amplituda impulsu jest uzależniona od przesyłanych danych. Przy modulacji binarnej (przebiegiem ± 1) stosuje się różne kształty impulsów o wartości średniej równej zero. Sygnał PAM może być demodulowany technikami niekoherentnymi.

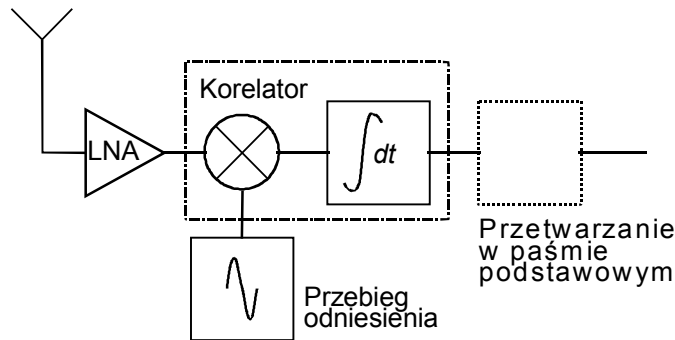
Kluczowanie amplitudy (OOK) jest specyficznym przypadkiem PAM, w którym jedynkę i zero reprezentuje obecność lub brak impulsu w wyznaczonej szczelinie czasowej.

Uproszczony schemat blokowy impulsowego nadajnika UWB przedstawia rys. 2.3.6. Nadajnik ten składa się z dołączonego do anteny generatora impulsów radiowych oraz układu sterującego. Układ sterujący wytwarza przebieg cyfrowy, który jest kombinacją kodu pseudolosowego (PN) i danych użytkownika. Przebieg ten pobudza lub wyzwala generator impulsów. Nadajnik UWB, w odróżnieniu od konwencjonalnych nadajników radiowych z falą ciągłą, nie zawiera układów takich jak wzmacniacz mocy RF, syntezer częstotliwości, mieszacze itp.



Rys. 2.3.6: Zasada działania impulsowego nadajnika UWB

Uproszczony schemat blokowy odbiornika komplementarnego z opisanym wyżej nadajnikiem przedstawia rys. 2.3.7. Odbiornik składa się z dołączonego do anteny wzmacniacza o małym poziomie szumu (LNA) oraz układu korelatora z generatorem przebiegów odniesienia. Korelator decyduje o wartości bitu (0 lub 1). Blok przetwarzania sygnału w paśmie podstawowym pozwala na wydzielenie strumienia danych użytkownika, korekcję błędów itp. Największy stosunek sygnału do szumu na wejściu korelatora występuje, gdy przebieg odniesienia jest taki sam, jak sygnał odbierany.



Rys. 2.3.7: Zasada działania impulsowego odbiornika

Należy podkreślić, że wyżej wymienione przykłady nie wyczerpują listy technik modulacji, które bada się dla potrzeb komunikacji danych i innych zastosowań UWB. Więcej opisów układów generacji i odbioru impulsowych sygnałów UWB można znaleźć w kilku publikacjach akademickich [np. 20, 21].

2.3.10 Źródła impulsowych sygnałów UWB

Rozkład widmowej gęstości mocy promieniowanej przez urządzenie UWB zależy przede wszystkim od kształtu generowanych impulsów, metody modulacji i kodowania randomizującego, a ponadto od rodzaju anteny nadawczej. W celu dostosowania charakterystyki widmowej do wymagań wynikających z potrzeby ochrony systemów radiokomunikacyjnych i potrzeb samego systemu UWB konieczne jest kształtowanie impulsów.

Teoretycznie do pobudzenia anteny nadajnika UWB mogą być stosowane są różne elementarne sygnały: skok, pojedynczy impuls, pojedynczy okres fali RF (mono-cycle). Spełnienie wymagań administracyjnych ograniczających gęstość mocy promieniowanej przez urządzenia UWB wymaga szczegółowej analizy. W pracach wielu autorów rozważane są cechy różnych źródeł impulsowych sygnałów UWB.^{*/}

Impuls w postaci skoku napięcia charakteryzuje się dużą energią w zakresie niskich częstotliwości, która maleje zgodnie z zależnością $1/f$. Wąski impuls o czasie T_d ma równomierną gęstość mocy w szerokim paśmie częstotliwości. Maksymalna częstotliwość widma skoku lub pojedynczego impulsu jest ograniczona przez czas narastania T_r impulsu generowanego w danym układzie. W idealnym przypadku częstotliwość pierwszego zera f_0 gęstości mocy widma występuje przy $1/T_r$ (dla skoku) lub $1/T_d$ (dla impulsu). Powyżej f_0 składowe widma tych sygnałów zanikają wg funkcji: $(\sin x/x)^n$. Zatem generacja przebiegów w zakresie częstotliwości powyżej 1 GHz wymaga impulsów o czasie mierzonym w ułamkach nanosekundy.

Widmo pojedynczego okresu lub wąskiego impulsu RF ma po obu stronach fali nośnej f_c kształt funkcji $\sin x/x$, której pierwsze zera występują przy częstotliwościach $f_c + 1/T_d$ oraz $f_c - 1/T_d$.

Wąski impuls jest zwykle generowany jako pierwsza pochodna skoku napięcia o krótkim czasie narastania. Pojedynczy okres jest generowany jako pierwsza pochodna impulsu lub druga skoku. Wąski impuls RF, składający się z kilku okresów fali, można uzyskać pobudzając skokiem napięcia lub impulsem filtr pasmowo-przepustowy. Funkcje tego filtru

^{*/} Należy zauważyć, że impulsy generowane dla potrzeb UWB nie mogą zawierać składowej stałej, ponieważ antena nie może wypromieniować sygnału o częstotliwości zero.

często spełnia antena nadawcza. Pojedynczy okres RF (mono-cycle) ma najwyższe pasmo spośród wymienionych wyżej i nie ma składowej stałej.

W przypadku urządzeń UWB krytycznym elementem konstrukcji nadajnika i odbiornika staje się antena. Jeżeli górna częstotliwość jest kilka razy większa od dolnej, pojawiają się problemy z zapewnieniem dopasowania impedancji i sprawności promieniowania energii RF w wymaganym zakresie częstotliwości. Zastosowana antena może różniczkować lub całkować impulsowy przebieg wejściowy (w przypadku anteny nadawczej pobudzającego ją napięcia, a w przypadku anteny odbiorczej pobudzającego ją natężenia pola) powodując odkształcenia wytwarzanych impulsów. Wiele anten stosowanych z powodzeniem w wąskopasmowych systemach radiowych ma charakter rezonansowy – są dostrajane do częstotliwości roboczej. Jeżeli antena tego rodzaju jest dołączona do urządzenia UWB i pobudzona wąskim impulsem RF, jej odpowiedź zamiast pojedynczego impulsu może mieć kształt gasnących oscylacji, nazywany efektem "dzwonienia" (ringing). Aby uniknąć tego rodzaju zniekształceń impulsu można zwiększyć szerokość pasma ($f_H - f_L$) zmniejszając dobroć anteny (Q), ale ujemnym skutkiem zmniejszenia dobroci jest zmniejszenie sprawności anteny.

$$Q = \frac{f_c}{f_H - f_L}$$

gdzie: Q – dobroć anteny, f_c , f_H , f_L – środkowa, górna i dolna częstotliwość pasma anteny.

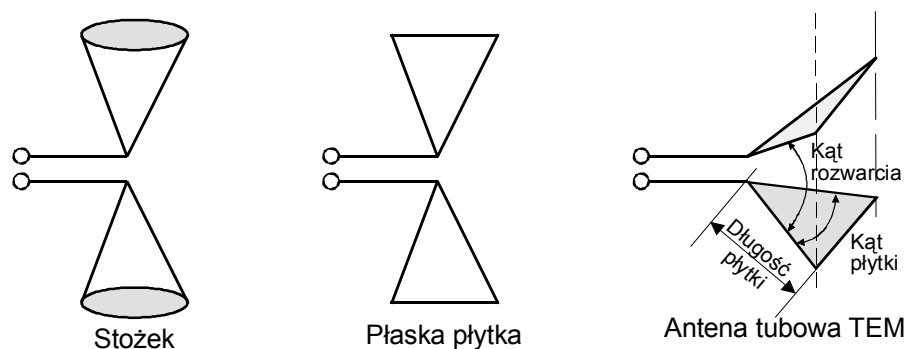
Typowe wymagania dla "uniwersalnej" anteny UWB:

- zakres częstotliwości: 3 – 10 GHz,
- VSWR: < 2 ,
- jak największa sprawność promieniowania.

Inną istotną cechą, w specyficznych zastosowaniach pożądaną, a w innych niepożądaną, może być kierunkowość anteny. W przypadku urządzeń, które mają być powszechnie stosowane ważne są także rozmiary anteny i koszty produkcji.

Teoretyczne modele anten ultraszerokopasmowych opisano w wielu publikacjach. Przykłady często rozważanych konstrukcji przedstawiono na rys. 2.3.8. Szerokopasmowa antena może być dipolem złożonym z dwóch stożków lub monopolem w postaci stożka, którego wierzchołek jest umieszczony nad płaszczyzną ziemi. Innym często analizowanym modelem jest tubowa antena TEM (*TEM horn antenna*) utworzona z dwóch trójkątnych płyt o odpowiednio dobranym kształcie i kącie rozwarcia.

Mimo że prace teoretyczne na temat tego rodzaju anten publikowano już w latach siedemdziesiątych XX wieku, anteny UWB w wersjach komercyjnych oferuje niewiele firm.



Rys. 2.3.8: Przykłady modeli anten UWB [20]

W przypadku anteny tubowej TEM na kształt charakterystyki amplitudowej mają wpływ straty (tłumienie) oraz jednorodność wytwarzanego pola TEM. Przebieg charakterystyki fazowej jest związany z szerokością (w) i długością (l) trójkątnych elementów.

Dolna i górna częstotliwość odcięcia oraz impedancja anteny tubowej są określone przez wymiary trójkątnych elementów oraz kąt pomiędzy ich płaszczyznami. Na dopasowanie impedancji ma wpływ stosunek szerokości (w) podstawy trójkątnych elementów do odległości między ich krawędziami (h). W celu szerokopasmowego dopasowania (zmniejszenia dobroci) stosuje się rezystory pomiędzy bocznymi krawędziami trójkątów.

Symulacje i pomiary pokazują [2, 3, 4], że mała odbiorcza antena TEM ma powyżej częstotliwości odcięcia prawie równomierną charakterystykę amplitudową oraz linearną charakterystykę fazową. Zatem może wiernie przekształcać impuls pola elektromagnetycznego na napięcie na wejściu odbiornika.

2.3.11 Anteny do pomiarów UWB

Znane i przewidywalne parametry są szczególnie ważne w przypadku anten, które mają być wykorzystywanych przez laboratoria badawcze do badań i ocen urządzeń UWB pod względem spełnienia ograniczeń odnośnie mocy promieniowanej.

Podstawowe wymagania odnośnie pomiarowych anten UWB [3, 4] są następujące:

- antena powinna w minimalnym stopniu zniekształcać przebiegi – przebieg (impuls) na wyjściu anteny powinien odwzorowywać przebieg (impuls) na jej wejściu, stąd dwa konieczne warunki:
 - antena powinna mieć płaską charakterystykę amplitudową (tj. natężenie pola wytwarzanego przez antenę nadawczą nie powinno zależeć od częstotliwości napięcia pobudzającego antenę, albo napięcie na zaciskach anteny odbiorczej nie powinno zależeć od częstotliwości natężenie pola, w którym znajduje się ta antena),
 - antena w wymaganym zakresie częstotliwości powinna mieć linearną charakterystykę fazową.
- antena powinna zapewniać dopasowanie impedancji.

Antena odbiorcza powinna przekształcić impuls pola elektromagnetycznego na impuls napięcia, którego kształt jest identyczny z kształtem przebiegu pola elektromagnetycznego pobudzającego antenę. Najczęściej stosowanym rodzajem pomiarowej anteny odbiorczej jest antena tubowa TEM (*TEM horn antenna*) [3, 4]. Antena tubowa TEM jest tworzona z dwóch trójkątnych płyt metalowych ustawionych w kształcie klina tworzących otwartą na końcu dwuprzewodową linię transmisyjną. Wierzchołki trójkątów zbiegają się w punkcie dołączenia złącza współosiowego. Częstotliwości graniczne anteny tubowej wynikają z rozmiarów jej apertury. Jeżeli apertura jest zbyt duża antena staje się falowodem dla wyższych modów fal TE lub TM, które ograniczają użyteczne pasmo. Stosunek odległości między metalowymi płaszczyznami do szerokości jest stały i decyduje o impedancji anteny. Dobierając długość i kąt rozwarcia anteny można uzyskać dopasowanie oraz wpływać na charakterystykę kierunkową i charakterystykę przejściową. Zysk anteny tubowej TEM wynosi zwykle od 5 dB do 15 dB. W celu wytłumienia odbić antena powinna być dopasowana do 50 Ω . Jednakże często aby uzyskać większą czułość odbiornika projektowane są anteny o impedancji 100 Ω .

Opisano wiele konstrukcji anten wykonanych w celu optymalizacji parametrów (szerokości pasma, dopasowania, rozmiarów), które są modyfikacjami podstawowej konstrukcji anteny tubowej, polegającymi na wstawieniu przegród, częściowym wypełnieniu dielektrykiem i in.

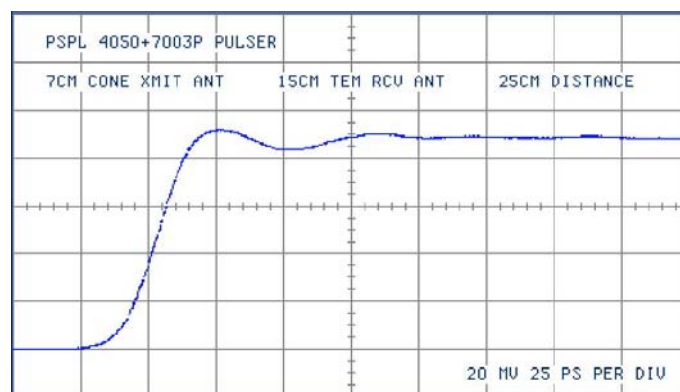
Anteny tubowe TEM mają linearną charakterystykę fazy. Zaprojektowane w odpowiednim zakresie częstotliwości wytwarzają napięcie, którego kształt jest identyczny z przebiegiem składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego.

Jednakże jeżeli antena TEM jest zastosowana jako nadawcza, to pole promieniowane jest pierwszą pochodną przebiegu napięcia pobudzającego antenę – następuje różniczkowanie impulsu pobudzającego.

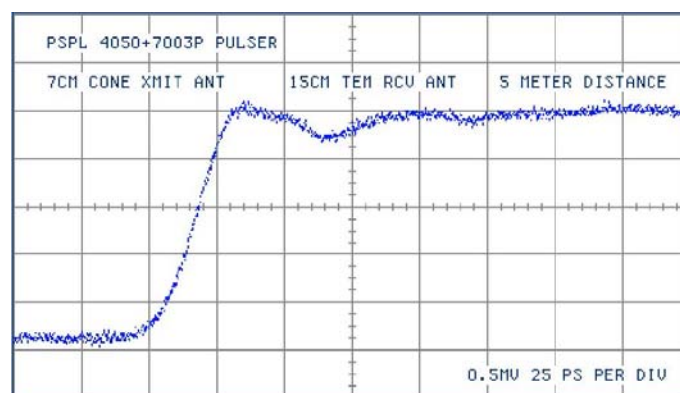
Antena nadawcza powinna promieniować pole elektromagnetyczne, którego przebieg jest identyczny z kształtem przebiegu napięcia pobudzającego antenę. Pomiarową anteną nadawczą zalecaną [3, 4] do wytwarzania pola UWB jest zwykle antena stożkowa (*conical antenna*). Jest wykonywana jako metalowy stożek umieszczony pionowo nad metalową płaszczyzną, pobudzany w wierzchołku. Aby uzyskać impedancję $50\ \Omega$ należy wykonać stożek o kącie wierzchołkowym 47° .

Jeżeli antena stożkowa jest zastosowana jako odbiorcza, to na jej wyjściu następuje całkowanie przebiegu pola E.

Na rys. 2.3.9 i rys. 2.3.10 [22] pokazano wierne przenoszenie kształtu pobudzenia (tzw. skoku jednostkowego) uzyskane w przypadku, gdy anteną nadawczą była antena stożkowa, a anteną odbiorczą antena tubowa TEM umieszczona odpowiednio w odległości 25 cm i 5 m od anteny nadawczej.



Rys. 2.3.9: Transmisja impulsu z anteny stożkowej do tubowej TEM na drodze 25 cm



Rys. 2.3.10: Transmisja impulsu z anteny stożkowej do tubowej TEM na drodze 5 m

Porównanie kształtu impulsów na rysunkach uzyskanych przy odległości między anteną nadawczą i odbiorczą równej 25 cm i 5 m wskazuje, że kształt nie zmienia się z odległością,

zatem tłumienie badanego kanału radiowego nie zależy od częstotliwości (lub długości fali). W tym miejscu należy przypomnieć i wyjaśnić, że tłumienie fali radiowej w otwartej przestrzeni jest związane tylko z rozpraszaniem energii wraz oddalaniem się od anteny nadawczej, na skutek tego gęstość mocy $S [W/m^2]$ zmienia się zgodnie z zależnością:

$$S(d) = \frac{I}{4\pi d^2} \dots\dots\dots (1)$$

gdzie: d jest odległością anteny odbiorczej od anteny nadawczej.

Gęstość mocy maleje odwrotnie proporcjonalnie do d^2 , zatem tłumienie mocy fali radiowej nie ma związku z długością fali λ (lub jej częstotliwością).

Podawana w wielu publikacjach zależność opisująca tłumienie trasy pomiędzy dwoma antenami izotropowymi w postaci:

$$\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

albo w postaci odpowiednio zmodyfikowanej dla łącza radiowego z anteną nadawczą o zysku G_{Tx} i anteną odbiorczą o zysku G_{Rx} :

$$\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \frac{I}{G_{Tx} G_{Rx}} \dots\dots\dots (3)$$

wskazująca zależność tłumienia od długości fali wymaga właściwej interpretacji zjawisk.

W istocie, jeżeli odbiorczą jest antena izotropowa, to jej apertura jest wyrażana zależnością:

$$\frac{\lambda^2}{4\pi} \dots\dots\dots (4)$$

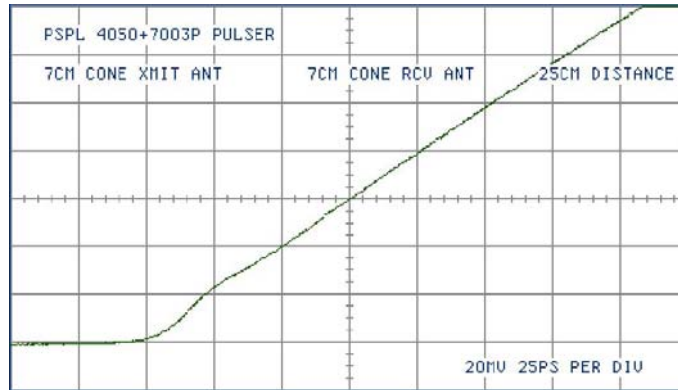
czyli zmniejsza się proporcjonalnie do kwadratu długości fali. W tym przypadku po skojarzeniu zależności (1) i (4) dla anten izotropowych można uzyskać wzór (2), a dla innych anten o zysku G_{Tx} i G_{Rx} wzór (3). Jednakże faktycznie nie są to wzory opisujące tłumienie fali radiowej na drodze o długości d , lecz wzory opisujące tłumienie łącza radiowego, w którym są stosowane określone rodzaje anten znajdujące się w odległości d i fale o długości λ . A więc należy pamiętać, że zależność tłumienia łącza radiowego od częstotliwości jest związana z charakterystykami stosowanych anten.

Wyjaśnienie tego zjawiska można przedstawić na przykładzie dipola półfalowego. Wraz ze wzrostem częstotliwości zmniejsza się fizyczna długość dipola, zatem zmniejsza się napięcie indukowane w antenie odbiorczej przez pole o określonym natężeniu.

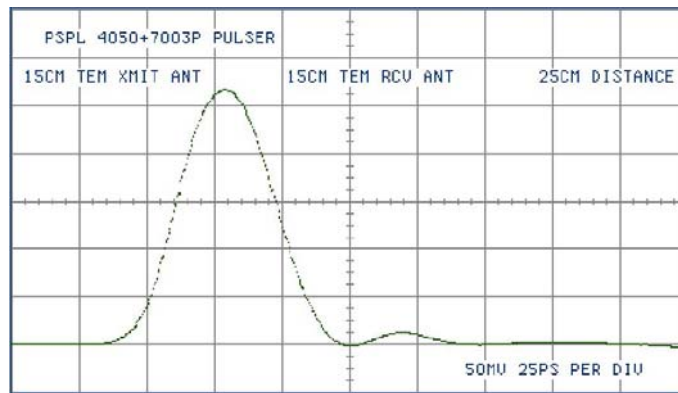
W przypadku sygnałów UWB należy rozważać zmniejszenie się gęstości mocy wraz z oddaleniem się od punkтового źródła zgodnie z zależnością (1), co oznacza, że gęstość mocy maleje z kwadratem odległości, tj. natężenie pola odwrotnie proporcjonalnie do odległości, ale nie zależy od częstotliwości.

Na rys. 2.3.11 pokazano przebieg uzyskany na wyjściu anteny odbiorczej, gdy do transmisji przebiegu jak na rys. 2.3.9 na odległość 25 cm była użyta para identycznych anten stożkowych (nastąpiło całkowanie impulsu odbieranego).

Natomiast na rys. 2.3.12 pokazano przebieg uzyskany na wyjściu anteny odbiorczej, gdy do transmisji przebiegu jak na rys. 2.3.9 na odległość 25 cm była użyta para identycznych anten tubowych TEM (nastąpiło różniczkowanie impulsu nadawanego).



Rys. 2.3.11: Transmisja impulsu pomiędzy dwoma identycznymi antenami stożkowymi



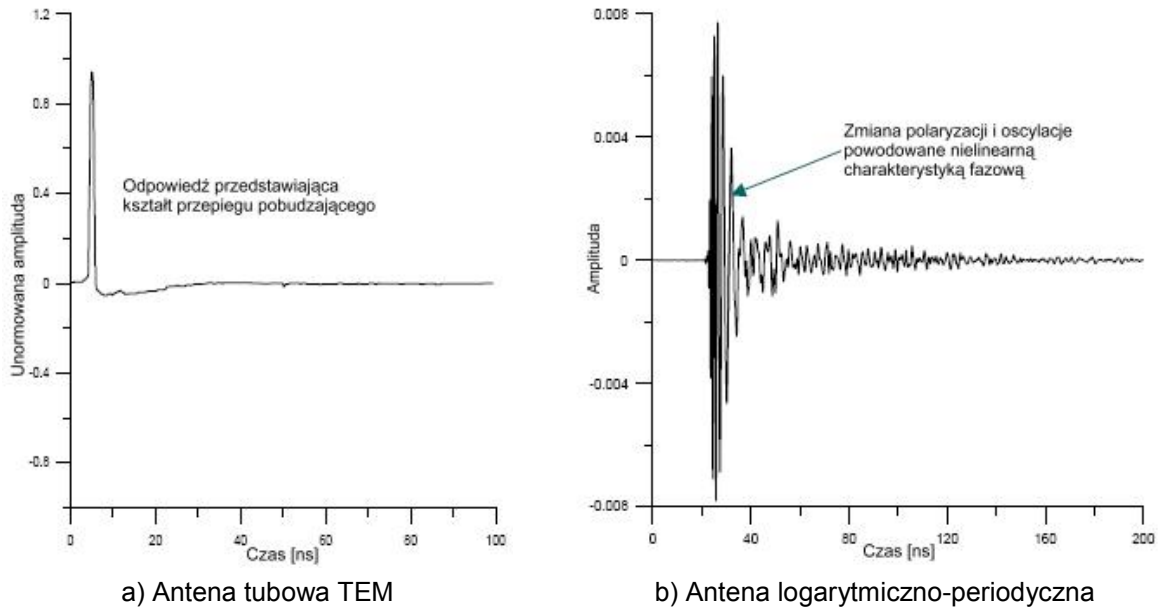
Rys. 2.3.12: Transmisja impulsu pomiędzy dwoma identycznymi antenami tubowymi TEM

Istotne jest odnotowanie faktu, że zasada odwrotności stosowana odnośnie anten analizowanych w dziedzinie częstotliwości nie jest prawdziwa w dziedzinie czasu [22]. W równaniach opisujących związek pobudzenia anteny z jej odpowiedzią impulsową występuje czynnik " $j\omega$ ". Nie ma on znaczenia w przypadku systemu wąskopasmowego analizowanego w dziedzinie częstotliwości, gdyż dla przebiegu sinusoidalnego oznacza przesunięcie fazy o 90° (odpowiedzią na pobudzenie w postaci fali sinusoidalnej jest fala sinusoidalna) i w klasycznej teorii anten systemów radiowych jest pomijany. W przypadku sygnału UWB analizowanego w dziedzinie czasu czynnik " $j\omega$ " ma zasadnicze znaczenie. Zależnie od funkcji anteny (nadawcza lub odbiorcza) powoduje różniczkowanie lub całkowanie przebiegu pobudzającego. W dziedzinie czasu odpowiedź impulsowa anteny nadawczej jest proporcjonalna do pochodnej odpowiedzi impulsowej tej samej anteny zastosowanej jako antena odbiorcza.

W wielu pracach teoretycznych na temat modeli systemów UWB rozważana jest także tzw. "D-dot antenna" [20]. W zasadzie jest to bardzo krótki monopól umieszczony nad płaszczyzną ziemi. Układ zastępczy takiej anteny można przedstawić jako źródło napięcia i pojemność. Antena typu D-dot różniczkuje przebieg pola elektrycznego. Przy wyższych częstotliwościach staje się anteną $\lambda/4$.

Należy podkreślić, że typowe anteny stosowane w laboratoriach badawczych do pomiarów RF w szerokim zakresie częstotliwości, np. logarytmiczno-periodyczne, mają nieliniarną charakterystykę fazową. Wskutek tego pojedynczy nanosekundowy impuls pola elektromagnetycznego pobudzający antenę logarytmiczno-periodyczną na wyjściu anteny

powoduje odpowiedź w postaci ciągu impulsów o charakterze gasnących oscylacji. Na rys. 2.3.13 [4] porównano odpowiedź anteny tubowej TEM z odpowiedzią anteny logarytmiczno-periodycznej na pobudzenie w postaci pojedynczego wąskiego impulsu pola elektrycznego.



Rys. 2.3.13: Wpływ charakterystyki fazowej anteny na odpowiedź impulsową anteny

2.3.12 Techniki pomiarów UWB

Techniki badania właściwości kanału radiowego dla wielopasmowych systemów OFDM (MB OFDM) w zasadzie są rozwinięciem technik badania systemów OFDM, stosowanych w przypadku systemów takich jak WiMAX, ADSL, co znajduje odzwierciedlenie w standardach przyjętych przez różne stowarzyszenia [16-19, 34, 35].

Źródła UWB mogą nadawać krótkie impulsy lub sekwencje impulsów i mogą być wbudowane do urządzeń o różnym przeznaczeniu, jak podano w punktach 2.3.4 i 2.3.7, stosowanych dla komunikacji wewnątrz lub na zewnątrz, radarach analizujących strukturę obiektów, urządzeniach medycznych, systemach nadzoru wartościowych przedmiotów, radarach samochodowych i w inteligentnym transporcie. [4, 26]

Podstawy technik pomiaru impulsowych sygnałów UWB opisano w zaleceniu ITU-R SM.1754 [26]. Ze względu na szerokie pasmo i szumopodobną charakterystykę rozkładu gęstości widmowej techniki pomiaru różnią się od stosowanych do pomiaru parametrów w konwencjonalnych systemach radiowych.

Ograniczenia administracyjne odnoszące się do gęstości widmowej e.i.r.p. emisji UWB powodują, że podstawowym problemem staje się pomiar tego parametru.

Teoretycznie badania emisji urządzeń UWB można wykonywać w dziedzinie czasu lub częstotliwości, każda z metod ma wady i zalety. Charakterystyki zmierzone w dziedzinie czasu mogą być przekształcone na charakterystyki widmowe z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Parametry w dziedzinie częstotliwości mogą być odnoszone (porównane) z wartościami granicznymi emisji określonymi w wymaganiach. Teoretycznie pomiar tą metodą może przedstawiać pełną charakterystykę widmową. Do przeprowadzenia pomiaru potrzebny jest cyfrowy oscyloskop z pamięcią, wyposażony w szybki przetwornik

o szerokości pasma większej niż maksymalna częstotliwość sygnału UWB oraz procesor sygnałowy FFT do obliczania charakterystyki widmowej sygnału. Dalsze przetwarzanie sygnału pozwala na obliczanie typowych parametrów RF takich jak widmowa gęstość mocy.

Pomiar w dziedzinie częstotliwości za pomocą analizatora widma lub wektorowego analizatora widma ze względu na znacznie węższe pasmo stosowanych urządzeń od szerokości pasma sygnału UWB z zasady podlega ograniczeniom, innym ograniczeniem może być czułość tej metody (poziom własnego szumu analizatora przy RBW 50 MHz).

2.3.13 Stanowiska pomiarowe UWB

Stanowiska pomiarowe UWB są budowane dla różnych potrzeb, takich jak:

- zapis pojedynczych zdarzeń UWB,
- kalibracja anten (zysku lub współczynnika antenowego),
- generacja standardowego pola do kalibracji anten i czujników UWB,
- systemy pomiarowe do badania propagacji, rozpraszania i skuteczności ekranowania oraz oddziaływania UWB na inne systemy.

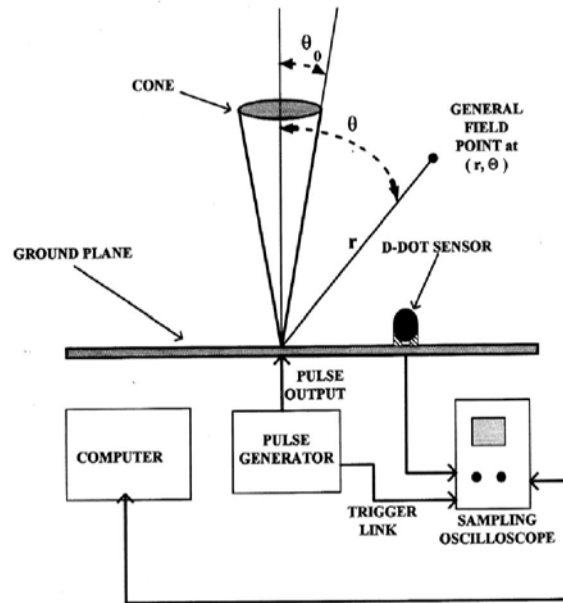
W kilku publikacjach [2, 3, 4] opisano wyposażenie stanowiska do pomiarów UWB (*UWB Antenna Measurement Facility*) zaprojektowanego i zbudowanego dla potrzeb NIST.

Jak wspomniano wcześniej do generacji pola UWB najkorzystniejszym typem anteny jest antena stożkowa. W laboratorium NIST wykonano tę antenę jako metalowy stożek o wysokości 4 m umieszczony nad płaszczyzną ziemi o wymiarach $7,3\text{ m} \times 7,3\text{ m}$ w pomieszczeniu z betonowymi ścianami i sufitem na wysokości 5 m, rys. 2.3.14. [http://www.ce-mag.com/archive/03/01/newsline.html]. Urządzenie może wytwarzać pole o częstotliwości powyżej 20 MHz. Przeprowadzając w dziedzinie czasu i częstotliwości analizę sygnałów odbitych od ścian można uzyskać zobrazowanie otoczenia stanowiska identyfikując przeszkody powodujące zaburzenia pola, a następnie metodami matematycznymi uwzględnić ich obecność – wprowadzać korekty do wyników pomiarów przeprowadzonych na tym stanowisku.



Rys. 2.3.14: Fotografia stanowiska pomiarowego UWB zbudowanego w NIST

Jako pomiarowe anteny odbiorcze stosowane są anteny tubowe TEM. Punktowym czujnikiem pola może być antena typu "D-dot".



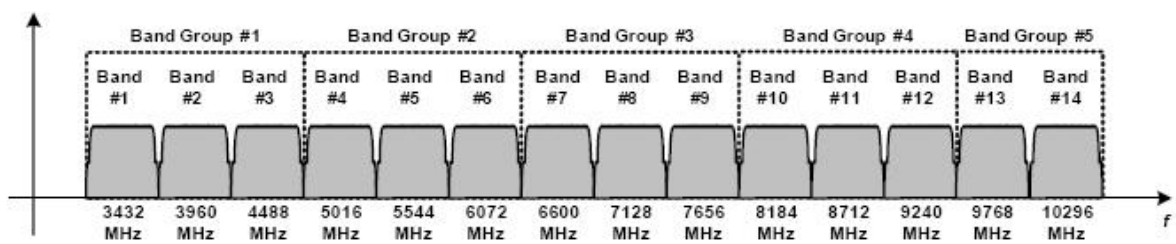
Rys. 2.3.15: Przykład wyposażenia stanowiska NIST [4]

2.3.14 Standaryzacja systemów

2.3.14.1 Standardy ECMA

Standard ECMA-368 [16] zawiera specyfikacje ultra szerokopasmowej warstwy fizycznej (PHY) oraz podwarstwy dostępu do medium (MAC) dla radiowych sieci bliskiego zasięgu (PAN), umożliwiających transmisję z szybkością do 480 Mbit/s, wykorzystujących wszystkie częstotliwości w zakresie pomiędzy 3,1 GHz a 10,6 GHz. Model architektury sieci UWB zdefiniowany w standardach ECMA-368 i ECMA-369 [17] jest wzorowany na modelach dla sieci lokalnych opisanych w standardach z serii IEEE 802.

W standardzie ECMA-368 zdefiniowano 14 pasm częstotliwości, każde o szerokości 528 MHz, oznaczonych "Band #1" ÷ "Band #14". Z pierwszych 12 pasm utworzono cztery grupy (Band Group) w każdej po trzy pasma, piątą grupę tworzą pozostałe dwa pasma, rys. 2.3.16.



Rys. 2.3.16: Podział zakresu 3,1 ÷ 10,6 GHz w standardzie ECMA-368

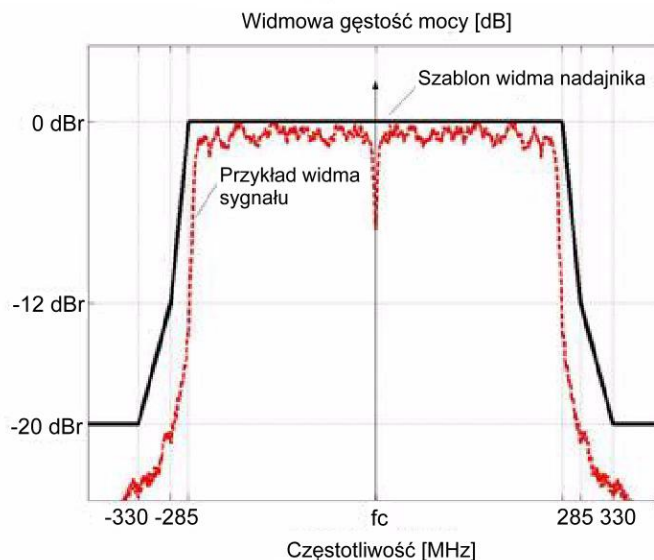
Związek pomiędzy częstotliwością środkową f_c i numerem identyfikującym pasmo (N_b) jest następujący: $f_c(N_b) = 2904 + 528 \times N_b$ [MHz], dla $N_b = 1, \dots, 14$.

Charakterystyczne częstotliwości poszczególnych zakresów podano w tab. 2.3.5.

Tab. 2.3.5: Granice pasm częstotliwości zdefiniowanych w standardzie ECMA-368

Grupa pasm	Numer pasma (N_b)	Częstotliwość najniższa [MHz]	Częstotliwość środkowa (f_c) [MHz]	Częstotliwość najwyższa [MHz]
1	1	3168	3432	3696
	2	3696	3960	4224
	3	4224	4488	4752
2	4	4752	5016	5280
	5	5280	5544	5808
	6	5808	6072	6336
3	7	6336	6600	6864
	8	6864	7128	7392
	9	7392	7656	7920
4	10	7920	8184	8448
	11	8448	8712	8976
	12	8976	9240	9504
5	13	9504	9768	10032
	14	10032	10296	10560

Dopuszczalna widmowa gęstość mocy sygnału nadawanego w pojedynczym paśmie jest ograniczona przez następujące punkty (por. rys. 2.3.17): ± 260 MHz o poziomie 0 dB względem maksimum widmowej gęstości mocy, poziom -12 dB przy odstrojeniu ± 285 MHz, poziom -20 dB przy odstrojeniu ± 330 MHz i większym. Przewiduje się konieczność regulacji mocy nadajnika.



Rys. 2.3.17: Ograniczenie widmowej gęstości mocy nadajnika UWB w jednym paśmie

Do transmisji informacji zastosowano sposób modulacji i kodowania nazwany MB-OFDM, polegający na elastycznym wykorzystaniu możliwości transmisji OFDM. W tym celu w każdym z pasm zdefiniowano 122 podnośne z odstępem 4,125 MHz (rozmiar transformaty FFT wynosi 128) spośród których 100 jest wykorzystywane do transmisji danych, 12 spełnia funkcje pilotów umożliwiających synchronizację odbiornika i koherentną detekcję sygnałów, a 10 jest traktowane jako odstępy ochronne. Aby zwiększyć niezawodność transmisji w różnych warunkach środowiska z propagacją wielodrogową zastosowano kodowanie

nadmiarowe (FEC) z kodem splotowym o sprawności 1/3, 1/2, 5/8 oraz 3/4, przy tym kodowana informacja może być przeplatana w jednym paśmie – Fixed Frequency Interleaving (FFI) lub w trzech pasmach – Time-Frequency Interleaving (TFI).

W obrębie każdej z czterech pierwszych grup pasm zdefiniowano cztery kody czasowo-częstotliwościowe korzystające z TFI i trzy kody korzystające z FFI – łącznie siedem w grupie. W piątej grupie zdefiniowano dwa kody korzystające z TFI. Zatem w standardzie ECMA wyznaczono ogółem 30 kodowanych kanałów UWB do przesyłania informacji.

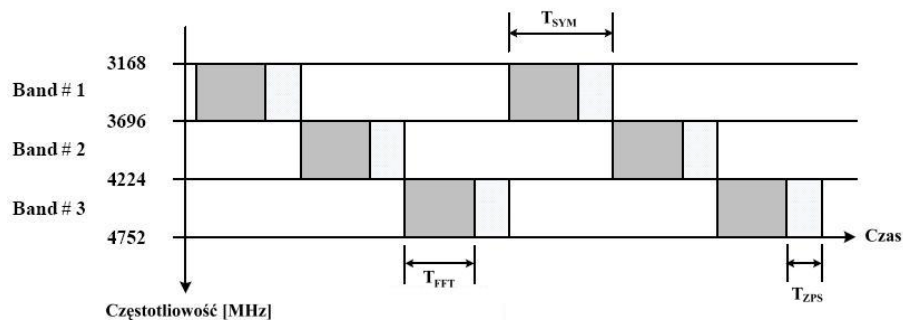
Zasadę realizacji transmisji sygnału OFDM w trzech pasmach przedstawiono na rys. 2.3.18. Czas rezerwowany dla każdego nadawanego symbolu (T_{SYM}) składa się z czasu (T_{FFT}) symbolu OFDM formowanego w wyniku zastosowania odwrotnej szybkiej transformaty Fouriera oraz czasu przyrostka (T_{ZPS}), traktowanego jako odstęp ochronny pomiędzy kolejnymi nadawanymi symbolami, koniecznego w celu uzyskania odporności transmisji na opóźnienie sygnału odbieranego.

Urządzenia zgodne ze specyfikacjami ECMA-368 / ECMA-369 powinny nadając i odbierając dane obsługiwać następujące szybkości: 53,3 Mbit/s, 80 Mbit/s, 106,7 Mbit/s, 160 Mbit/s, 200 Mbit/s, 320 Mbit/s, 400 Mbit/s oraz 480 Mbit/s. Przy czym jako obligatoryjne minimum jest wymagane wykorzystywanie trzech pierwszych grup częstotliwości i nadawanie i odbieranie z szybkościami: 53,3 Mbit/s, 106,7 Mbit/s i 200 Mbit/s oraz stosowanie kodowania TFI i FFI.

Przy szybkościach transmisji nie przekraczających 200 Mbit/s stosuje się modulację QPSK, a przy większych DCM.

Należy tu zauważyć, że najniższa szybkość transmisji akceptowana w tym standardzie jest taka, jak maksymalna szybkość transmisji WLAN zgodnych ze standardami IEEE 802.11a lub IEEE 802.11g.

Wymaganą czułość odbiornika, wyznaczoną dla pakietowej stopy błędu (PER), przy różnych szybkościach transmisji w kanałach pierwszej grupy, określoną przy założonych: współczynniku szumu 6,6 dB, stratach związanych z realizacją 2,5 dB i marginesie 3 dB, podano w tab. 2.3.6.



Rys. 2.3.18: Przykład realizacji transmisji sygnału MB-OFDM w trzech pasmach

Przyrostek $T_{ZPS} = 70,08$ ns (zero-padded suffix)

$T_{FFT} = 242,42$ ns

$T_{SYM} = 312,5$ ns

Tab. 2.3.6: Wymagana czułość odbiornika UWB przy różnych szybkościach transmisji

Szybkość transmisji [Mbit/s]	Minimalna czułość odbiornika [dBm]
53,3	-80,8
80	-78,9
106,7	-77,8
160	-75,9
200	-74,5
320	-72,8
400	-71,5
480	-70,4

W standardzie ECMA-368 podwarstwę MAC zaprojektowano tak, aby umożliwić mobilność komunikujących się urządzeń radiowych rozumianą w ten sposób, że dana grupa urządzeń może kontynuować komunikację oddzielając się (*while splitting*) od pierwotnej grupy oraz może kontynuować komunikację w trakcie przyłączania się innej grupy (*while merging*). Funkcjonalność MAC jest rozproszona pomiędzy urządzeniami. Koordynacja jest również rozproszona, aby unikać zakłóceń pomiędzy różnymi grupami, rezerwować i używać kanały w sposób gwarantujący uzyskanie zakładanego QoS.

Protokoły MAC mają gwarantować równoprawne współużytkowanie pasma. W tym celu w każdym urządzeniu jest implementowany protokół zdecentralizowanej rezerwacji (Distributed Reservation Protocol, DRP), którego zadaniem jest obsługa negocjacji i rezerwacja czasu kanału, obowiązująca wszystkie urządzenia w sąsiedztwie uczestniczących w rezerwacji. MAC zapewnia również priorytety odpowiednie do izochronicznej i asynchronicznej transmisji danych. W tym celu zastosowano kombinację dostępu CSMA oraz TDMA.

Podwarstwa MAC i warstwa PHY mogą wykonywać pomiar czasu przekazu w obu kierunkach pomiędzy odległymi urządzeniami. Funkcja ta umożliwia pomiar odległości związany z parametrami synchronizacji komunikujących się urządzeń. Np. ECMA-368 [16] jeżeli zegar, w którego jednostkach jest mierzony czas przejścia sygnału ma częstotliwość 4224 MHz, to odpowiadający tej częstotliwości błąd pomiaru odległości wynosi ~ 71 mm. W rzeczywistości niepewność pomiaru jest większa ze względu na szum, skutki propagacji wielodrogowej, dokładność zegara, wzajemne przemieszczanie się urządzeń i inne czynniki.

Dla potrzeb komunikacji MB-OFDM antena powinna mieć charakterystykę promieniowania równomierną w zakresie częstotliwości i dookólną. W praktyce wymagania dotyczące charakterystyki fazowej i opóźnienia są umiarkowane, ponieważ system z zasady jest projektowany do odbioru sygnałów o zmiennej amplitudzie i fazie (ze zmiennym opóźnieniem). Są oferowane seryjnie produkowane, tanie anteny o wymiarach $16 \text{ mm} \times 13,6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$.

2.3.14.2 Inne standardy

Omówione wyżej dokumenty ECMA-368 i ECMA-369 w 2007 r. zostaną prawdopodobnie przyjęte jako standardy ISO/IEC dla radiowych łącz multimedialnych bliskiego zasięgu.

Specyfikację systemu MB OFDM przedstawiono również do akceptacji przez IEEE jako propozycję standardu WPAN o dużej szybkości, oznaczonego symbolem 802.15.3b [35].

Uwaga. Stowarzyszenie MultiBand OFDM Alliance SIG, wspomniane w wielu publikacjach dotyczących rozwoju UWB dostępnych w Internecie, powołano stawiając za cel

promocję MB-OFDM jako globalnego standardu multimedialnych sieci UWB. Podstawowe elementy specyfikacji PHY i MAC systemu zdefiniowano w latach 2003/2004. Obecnie inicjatywa stworzenia uniwersalnej spójnej platformy dla aplikacji multimedialnych, gwarantującej jakość i bezpieczeństwo usług jest rozwijana w ramach WiMedia Alliance [www.wimedia.org].

Oprócz MB OFDM istnieją inne specyfikacje szerokopasmowych systemów radiowych bliskiego zasięgu opracowane do połączenia drogą radiową odtwarzaczy wideo, projektorów i innego rodzaju domowych urządzeń używanych dla rozrywki, tworzenia bram pomiędzy Internetem a domowymi urządzeniami audio i wideo, zastąpienia kabli USB lub zapewnienia łączności pomiędzy różnego rodzaju urządzeniami peryferyjnymi używanymi w domu, biurze, samochodzie. Należy wymienić przede wszystkim: Bluetooth [www.bluetooth.com], Wireless 1394 lub W-1394 [www.1394ta.org], Wireless-USB lub W-USB [www.usb.org/wusb], standardy IEEE z serii 802.15.3 i inne lansowane przez różne grupy przemysłowe pod różnymi nazwami handlowymi.

Standard IEEE 802.15.3-2003 [34] definiuje warstwę fizyczną i MAC dla sieci WPAN tworzonych ad-hoc dla transmisji danych i multimediiów w paśmie 2,4 GHz, używających małej mocy i wielu formatów modulacji: QPSK, DQPSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, z szybkością w granicach 11 Mbit/s (QPSK) do 55 Mbit/s (64-QAM). Warstwa MAC obsługuje izochroniczną i asynchroniczną transmisję danych.

W tym miejscu warto zauważyć, że urządzenia radiowe Wi-Fi stosowane powszechnie w lokalnych sieciach komputerowych, zgodne ze specyfikacjami z serii IEEE 802.11 nie spełniają wymagań w zastosowaniu do transmisji multimedialnych m.in. ze względu na:

- duży pobór mocy zasilania,
- zbyt małe szybkości przesyłania danych,
- nie obsługiwanie strumieniowego wideo.

Ponadto bazują raczej na rozwiązaniach z infrastrukturą (przyłączenie do sieci Ethernet), a komunikacja per-to-per nie jest techniką dojrzałą.

W specyfikacji wersji IEEE 802.11n opracowano mechanizmy umożliwiające większe szybkości transmisji, ale pozostałe zastrzeżenia odnośnie zastosowań multimedialnych pozostają aktualne.

2.3.15 Podsumowanie

Badaniami systemów UWB zajmuje się aktualnie wiele ośrodków naukowych. Potencjalne możliwości cywilnych zastosowań UWB dotyczą m.in. szybkiej komunikacji danych (rzędu Gbit/s) na małe odległości oraz urządzeń zobrazowania radarowego (*Radar imaging devices*) tzw. radarów impulsowych. Bardzo wąskie impulsy RF umożliwiają lokalizację obiektów z dokładnością znacznie lepszą niż uzyskiwana przy wykorzystaniu satelitarnych systemów nawigacyjnych (GPS) i innych systemów radiowych. Penetracja fal radiowych w głąb stratnych materiałów dielektrycznych oraz ich zróżnicowane pochłanianie i odbicia zależne od parametrów materiału na jakie fala jest skierowana umożliwiają uzyskanie obrazu obiektów, które znajdują się na drodze promieniowanej fali radiowej, np. pod powierzchnią gruntu, wewnątrz ścian lub za ścianą.

Wiedza zgromadzona w trakcie przygotowania niniejszego rozdziału pracy pozwala na stwierdzenie, że możliwości podjęcia prac nad systemami UWB istnieją również w Instytucie Łączności. Kontynuacja w 2007 r. rozpoczętych badań umożliwi: opanowanie podstaw teoretycznych działania radarów impulsowych oraz wskazanie możliwych zastosowań zobrazowania radarowego (*Radar imaging devices*); opracowanie koncepcji urządzenia oraz podstaw technik pomiarowych jego części radiowej. Działania te przygotowują zespół do

drugiego etapu, planowanego w 2008 r. polegającego na opracowaniu i zbudowaniu elementów laboratoryjnego modelu urządzenia. Pomyślna wyniki uzyskane w tym etapie pozwolą na sformułowanie wniosku o projekt badawczy i poszukiwanie partnerów gotowych do podjęcia produkcji.

Dalsze prace powinny rozpocząć się od opracowania na podstawie dostępnej literatury i własnych badań: matematycznych modeli impulsowego sygnału, przeprowadzenie symulacji parametrów widmowych (Matlab) i oceny zgodności tych parametrów z regulacjami wprowadzonymi w Europie, koncepcji urządzenia (schemat funkcjonalny), podstaw metodyki pomiarowej w tym anten pomiarowych UWB. Badania powinny obejmować wybór zakresu częstotliwości dla aplikacji takich jak analiza gruntu, ścian budynku, wykrywanie ludzi (możliwe zastosowania w ratownictwie).

Wykaz akronimów użytych w rozdz. 2.3

ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DAA	Detect and Avoid
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DCM	Dual Carrier Modulation
DRP	Distributed Reservation Protocol
e.i.r.p.	equivalent isotropic radiated power;
ECC	Electronic Communications Committee (CEPT)
ECMA	European Computer Manufacturer Association
EESS	Earth exploration-satellite service
ERM	Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ETSI)
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
FCC	Federal Communications Commission (USA)
FEC	Forward Error Correction
FFI	Fixed Frequency Interleaving
FFT	Fast Fourier Transform
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positioning System
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ISM	Industrial, Scientific, Medical
ISO	International Organization for Standardization
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
LNA	Low Noise Amplifier
LPD	low probability of detection
LPI	low probability of interception
MAC	Medium Access Control
MBOA	Multiband OFDM Alliance
MB-OFDM	Multiband OFDM, Multi Band Orthogonal Frequency Division Modulation
NETEX	Networking in the Extreme

NIST	National Institute of Standards and Technology (USA)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Modulation
OOK	On-Off keying
PAM	Pulse-Amplitude Modulation
PAN	Personal Area Network
PER	Packet Error Rate
PHY	Physical Layer
PPM	Pulse-Position Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAS	radio astronomy service
RBW	Resolution Bandwidth
RF	Radio Frequency
RLAN	Radio Local Area Network, WLAN
RMS	Root Mean Square
RR	Radio Regulation
SRD	Short Range Devices
SRS	Space Research Service
TDMA	Time Division Multiple Access
TEM	transverse electromagnetic
TFI	Time-Frequency Interleaving
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra-Wideband, Ultra Wide Band
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
W-USB	Wireless-USB

Bibliografia do rozdz. 2.3

- [1] Title 47 Code of Federal Regulation. Part 15 – Radio Frequency Devices; Subpart F – Ultra-Wideband Operation. [<http://www.fcc.gov>].
- [2] L. E. Miller. Why UWB? A Review of Ultrawideband Technology. NIST. April 2003.
- [3] Ch. A. Grosvenor i inni. TEM Horn Antenna Design – Theory and Simulation. NIST. 2003.
- [4] R. T. Johnk. Ultrawideband Metrology at NIST.
- [5] MultiBand OFDM Alliance (MBOA). Ultrawideband: High-speed, short-range technology with far-reaching effects.
- [6] Telcordia Technologies. 17.03.2004. Overview of Ultra Wide Band (UWB) Impulse Radio. UMIACS/LTS Seminar.
- [7] MBOA-SIG White Paper. 01.09.2004.
- [8] Ultrawideband: High-speed, short-range technology with far-reaching effects. MBOA-SIG White Paper. Sept. 1, 2004
- [9] Industry Canada. Consultation Paper on the Introduction of Wireless Systems Using Ultra-wideband Technology. No. SMSE-002-05. Feb. 2005.
- [10] CEPT/ERC Report 025: The European table of frequency allocations and utilisations covering the frequency range 9 kHz to 275 GHz.
- [11] ECC Report 064. The protection requirements of radiocommunications systems below 10.6 GHz from generic UWB applications. Feb. 2005.
- [12] ECC/DEC/(06)04. ECC Decision of 24 March 2006 on the harmonised conditions for devices using UWB technology in bands below 10.6 GHz.
- [13] Draft ECC/DEC/(06)EE. ECC Decision of dd mm 2006 on the harmonised conditions for devices using Ultra-Wideband (UWB) technology in band 3.1 – 4.6 GHz.
- [14] European Commission. Radio Spectrum Committee. Brussels, 23 Nov. 2006. RSCOM06-91. DG INFSO/B4. Clarification on issues relating to the harmonised introduction of ultra-wideband technology (UWB) in the Community.
- [15] European Commision. Brussels, 05.12.2006. Radio Spectrum Committee. Working Document. Opinion of the RSC pursuant to Article 5.2 of Decision 1999/468/EC and 4.3 of the Radio Spectrum Decision. Subject: Draft EC Decision on the harmonisation of the radio spectrum for equipment using ultra-wideband technology in the community. RSCOM06-90 rev 1.
- [16] Standard ECMA-368. 1st Edition / December 2005. High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard.
- [17] Standard ECMA-369. 1st Edition / December 2005. MAC-PHY Interface Specification for ECMA-368.
- [18] MultiBand OFDM Alliance SIG. Sept. 14, 2004. MultiBand OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a.
- [19] Wireless Universal Serial Bus Specification Revision 1.0 released May 12, 2005.
- [20] I. Opperman, M. Hämäläinen, J. Iinatti. UWB Theory and Applications. John Wiley & sons, Ltd. 2004.
- [21] M-G. di Benedetto. G. Giancola. Understanding Ultra wide Band Radio Fundamentals. Pearson Education, Inc. 2004. (Prentice Hall).
- [22] J. R. Andrews. UWB signal sources, antennas and propagation. Picosecond Pulse Labs. 2003.

-
- [23] ITU Document 1/BL/13-E. 2006. Draft new Recommendation ITU-R SM.[UWB.COMP]. Impact of devices using ultra-wideband technology on systems operating within radiocommunication services.
 - [24] Rec. ITU-R SM.1756 (05-2006). Framework for the introduction of devices using ultra-wideband technology.
 - [25] Rec. ITU-R SM.1755 (05-2006). Characteristics of ultra-wideband technology.
 - [26] Rec. ITU-R SM.1754 (05-2006). Measurement techniques of ultra-wideband transmissions.
 - [27] ITU Document 1/BL/9-E. 2006. Draft new Recommendation ITU-R [Doc. 1/74]. Method for measurements of radio noise.
 - [28] ETSI TR 101 994-1 V1.1.1 (2004-01). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for SRD equipment using Ultra Wide Band technology (UWB); Part 1: Communications applications.
 - [29] ETSI TR 101 994-2 V1.1.1 (2004-11). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for SRD equipment using Ultra Wide Band technology (UWB); Part 2: Ground- and Wall- Probing Radar applications.
 - [30] ETSI TR 102 495-1 V1.1.1 (2006-01). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for SRD equipment using Ultra Wide Band Sensor technology (UWB); System Reference Document Part 1: Building material analysis and classification applications operating in the frequency band from 2,2 GHz to 8 GHz.
 - [31] ETSI TR 102 495-2 V1.1.1 (2006-05). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for SRD equipment using Ultra Wide Band Sensor technology (UWB); System Reference Document.
 - [32] ETSI TR 102 495-3 V1.1.1 (2006-01). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for SRD equipment using Ultra Wide Band Sensor technology (UWB); System Reference Document Part 3: Location tracking applications operating in the frequency band from 6 GHz to 9 GHz.
 - [33] ETSI EN 302 435-1 V1.1.1 (2006-05). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for SRD equipment using Ultra Wide Band technology (UWB); Building Material Analysis and Classification equipment applications operating in the frequency band from 2,2 GHz to 8 GHz.
 - [34] IEEE 802.15.3. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
 - [35] IEEE Std 802.15.3b-2005 (Amendment to IEEE Std 802.15.3-2003) 5 May 2006. Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment 1: MAC Sublayer.

Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej (Z-21)

Rozdział 3

Wymagania widmowe i aspekty kompatybilności elektromagnetycznej
systemów radiokomunikacyjnych następnych generacji

Praca nr 21300086

Wrocław 2006

Spis treści rozdz. 3

Zadanie 3	3
3.1. Prognozy rozwoju systemów komórkowych trzeciej i następnych generacji.....	3
3.2. Widmo przeznaczone dla obecnych i przyszłych potrzeb systemów komórkowych trzeciej i następnych generacji	5
3.2.1. Aranżacje częstotliwości dla wdrażanego od 2008 roku segmentu naziemnego UMTS	7
3.2.2. Aranżacje w przyszłych zakresach częstotliwości	9
3.2.3. Prognoza nowych zakresów częstotliwości.....	11
3.3. Problemy kompatybilności	13
Bibliografia do rozdz. 3	17

Zadanie 3

Wymagania widmowe i aspekty kompatybilności elektromagnetycznej systemów radiokomunikacyjnych następnych generacji

Możliwości wprowadzenia nowych technik transmisji radiowej i szerokopasmowych systemów radiokomunikacyjnych wiążą się z koniecznością przeznaczenia dla ich potrzeb określonej porcji widma oraz opracowania warunków ich kompatybilności wewnątrz i międzysystemowej. Zalecenia organizacji międzynarodowych wytyczają strategiczne kierunki gospodarki widmem. Jednakże podstawowym problemem pozostaje analiza i określenie możliwości wprowadzenia nowych systemów na obszarze Polski w odniesieniu do aktualnego stanu zagospodarowania widma w kraju.

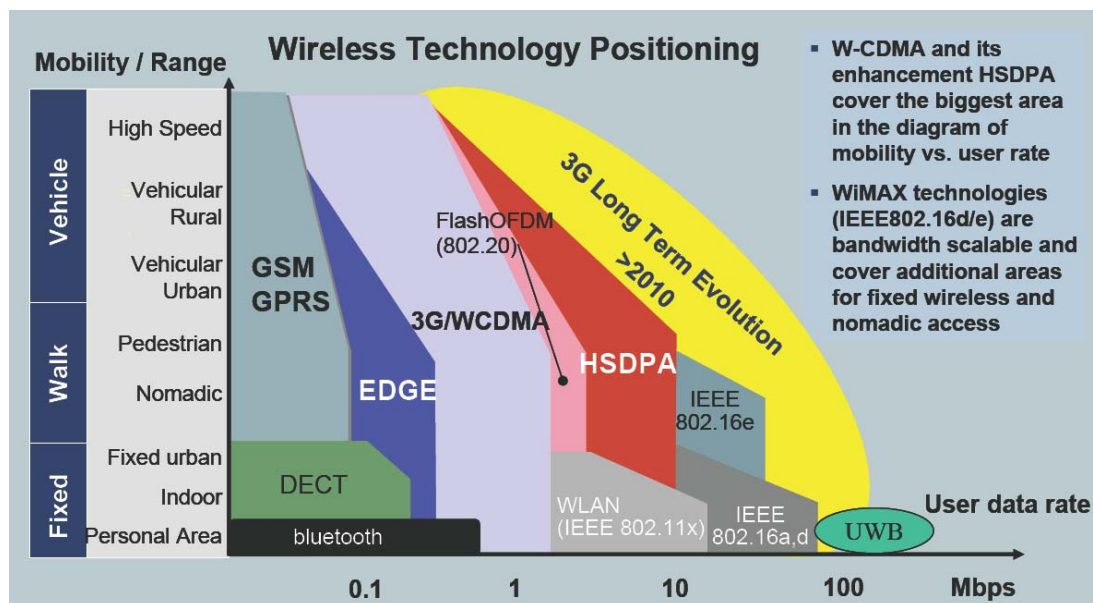
Zakłada się, że niniejsze opracowanie **pozwoli udzielić** odpowiedzi odnośnie możliwości implementacji takich systemów w Polsce i jednocześnie **pozwoli na określenie** warunków ich kompatybilności z innymi systemami. W szczególności analizowany jest rozwój przyszłościowych technologii pod kątem wykorzystania (skończonych) zasobów widma częstotliwości radiowych.

Jest rzeczą niezmiernie istotną, by prognozy rozwoju systemów radiokomunikacyjnych następnych generacji pozwoliły na wskazanie kolejnych partii widma, które mogą i powinny być udostępnione dla nowych systemów. W przypadkach konieczności zastąpienia dotychczas istniejących systemów systemami nowymi, należy czynić to w taki sposób, by w wytypowanych pasmach zahamować dalszy rozwój systemów dotychczasowych. Można też ewentualnie określić harmonogram ich wycofywania z użytku po to, aby nie narażać operatorów radiokomunikacyjnych i Skarbu Państwa na dodatkowe wydatki wynikające z konieczności nagłej zmiany techniki.

3.1. Prognozy rozwoju systemów komórkowych trzeciej i następnych generacji

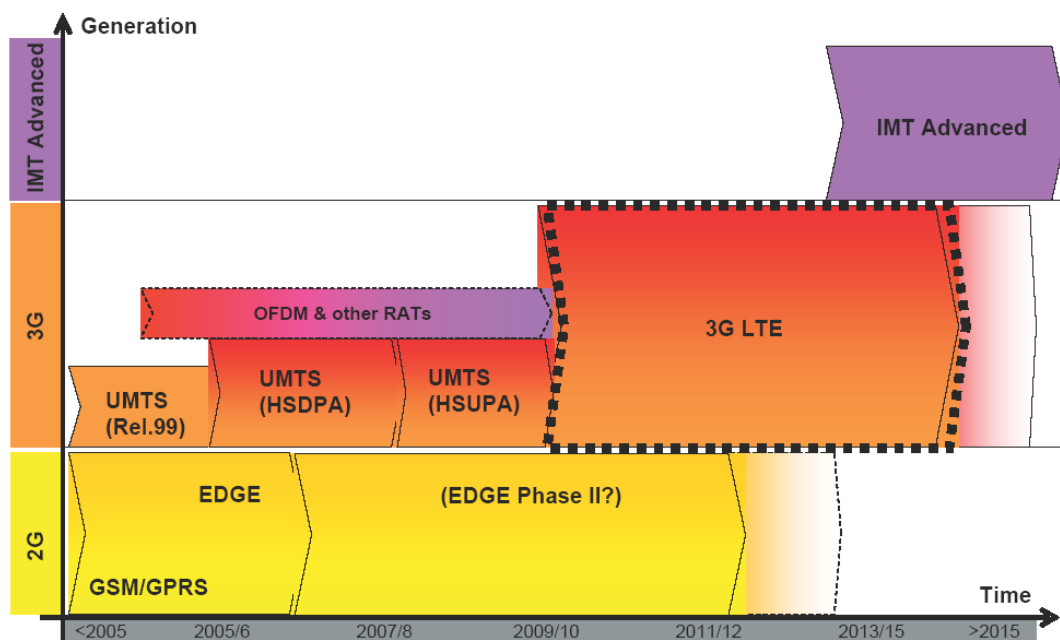
Systemy komórkowe ulegają ciągłej ewolucji i rozwojowi. Wprowadzanie nowych technik umożliwia oferowanie coraz to nowszych usług użytkownikowi systemu, zapewniając przy tym coraz większą wydajność i efektywność tego systemu. Istotnie polepsza się również tzw. wydajność widmowa, czyli możliwość uzyskania większej przepływności strumienia danych przy wykorzystaniu określonej porcji widma. Rozwojowi podlegają zarówno systemy 2. generacji, jak i 3. generacji. Planowany jest również rozwój systemów następnych generacji.

W zależności od wymaganej przepływności transmisji oraz w zależności od środowiska, w którym ma pracować określony system łączności bezprzewodowej stosowane są różne rozwiązania techniczne. Przegląd obecnych rozwiązań przedstawiony jest na rys. 3.1 [1]. Oznaczenia skrótów na rys. 3.1: GPRS – *General Packet Radio Service*, EDGE – *Enhanced Data for Global Evolution*, DECT – *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*, HSDPA – *High Speed Downlink Packet Access*, WCDMA – *Wideband Code Division Multiple Access*, WLAN – *Wireless Local Area Network*, OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, UWB – *Ultra Wide-Band*, IEEE 802.xxx – norma techniczna stowarzyszenia IEEE, WiMAX – *Worldwide Interoperability for Microwave Access*. Kilka z tych technik: GPRS, EDGE, HSDPA, WCDMA oraz OFDM, wykorzystywanych jest (lub będzie) w obecnych i przyszłych systemach komórkowych.



Rys. 3.1: Nowoczesne techniki w komunikacji radiowej

Długoterminowa ewolucja systemów 3G (3G LTE) związana jest z postępem techniki radiowej. Pierwszym krokiem w tej ewolucji jest wdrożenie technik: HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) i drugiej fazy IMS (*IP Multimedia Subsystem*) oraz podjęcie współpracy z sieciami *Wireless Local Area Networks* (WLAN) i z systemem *Multimedia Broadcast Multicast Service* (MBMS). Architektura sieci dostępowych będzie cechować się rosnącą funkcjonalnością. System ma bazować na protokole IP wykorzystując całe dostępne widmo. Powinno to zapewnić przepływności do 100 Mb/s przy użyciu kanałów transmisyjnych o szerokości pomiędzy 1,25 MHz a 20 MHz.



Rys. 3.2: Czasowa prognoza rozwoju kolejnych generacji systemów komórkowych

Prognoza czasowa rozwoju systemów komórkowych przedstawiona jest na rys. 3.2 [1]. Wynika z niej, że kolejne generacje tych systemów, zwanych "zaawansowanymi IMT" (do

niedawna obowiązywała nazwa "systemy następujące po IMT – *beyond IMT*") wdrażane będą za około 6 – 7 lat.

Podstawowe informacje dotyczące parametrów istotnych dla rozwoju kolejnych generacji systemów komórkowych, przedstawione są w tab. 3.1.

Tab. 3.1: Rozwój systemów komórkowych – podstawowe parametry

Generacja	Zakres widma [MHz]	Szerokość kanału	Typ dostępu	Sieć radiowa
2G: GSM [HSCSD] GPRS EDGE	900 – 1800 850 – 1900 [450 zrewidowane]	200 kHz	TDMA	GERAN
3G/IMT2000 (UMTS) Rel. 99 W-CDMA HSDPA HSUPA	1920 – 2200 (zakres podstawowy) 2500 – 2690 (zakres rozszerzony)	5 MHz	CDMA	UTRAN
----- LTE	----- [+2G zrewidowany]	n * 5 MHz n = (1/3, 1, 2, 3, 4)	OFDM(A) (spodziewany)	Ewolucja UTRAN
Zaawansowane IMT (systemy następujące po IMT-2000)	Nowe zakresy (będą określone)	do 100 MHz (spodziewana)	OFDM(A) (spodziewany)	Nowa (będzie określona)

Jak wynika z przedstawionego powyżej zestawienia, potrzeby widmowe stają się kluczową kwestią umożliwiającą dalszy rozwój systemów komórkowych.

3.2. Widmo przeznaczone dla obecnych i przyszłych potrzeb systemów komórkowych trzeciej i następnych generacji

Badania nad tworzeniem ogólnosięciowych systemów telekomunikacyjnych umożliwiających transmisje multimedialne, zwanymi początkowo *Future Public Land Mobile Telecommunications Systems* (FPLMTS) a obecnie *International Mobile Telecommunications – 2000* (IMT-2000) rozpoczęły się w latach 80. ubiegłego stulecia. Badania te prowadzono zarówno w sektorze radiokomunikacyjnym jak i w sektorze standaryzacyjnym Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego (odpowiednio ITU-R i ITU-T). W ramach pierwszych badań prowadzono analizy usług, rozwiązań technicznych i operacyjnych systemów oraz określano wymogi w dziedzinie zapotrzebowania na widmo elektromagnetyczne.

Oczekiwania związane z pakietem usług, które mogą oferować systemy trzeciej generacji wymusiły wprowadzenie bardzo zaawansowanych technologii. Z uwagi na planowaną przyszłą pełną integrację segmentów naziemnego i satelitarnego konieczne stało się przeznaczenie dla nich bliskich sobie zakresów częstotliwości. W związku z tym WARC-92 zidentyfikowała dla niezbędnych potrzeb UMTS/IMT-2000 pasmo częstotliwości 2 GHz (zwane w Europie pasmem zasadniczym – *core band*) obejmujące zakresy 1885 – 2025 MHz i 2110 – 2200 MHz, przy czym na potrzeby segmentu satelitarnego przeznaczono zakresy 1980 – 2010 MHz i 2170 – 2200 MHz. Zakresy te zdefiniowano w przypisie 5.388 Artykułu 5 Regulaminu Radiokomunikacyjnego ITU [2]. Są one dostępne dla systemów IMT-2000 zgodnie z Uchwałą 212 (Rev.WRC-95, Rev.WRC-97) [3].

W latach 90. ubiegłego stulecia, gdy postanowiono w Europie uruchomić kompatybilny z IMT-2000 system *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), zaliczany do tzw. *Family IMT*, badaniami potrzeb zajętości widma dla tego systemu zajął się głównie Europejski Komitet Radiokomunikacyjny (*European Radiocommunication Committee*,

ERC)¹, powołany przez Europejską Konferencję Poczty i Telekomunikacji (*European Conference of Postal and Telecommunications, CEPT*). Badania te doprowadziły do określenia niezbędnej ilości widma koniecznego do uruchomienia pierwszych systemów radiokomunikacyjnych trzeciej generacji. Na naszym kontynencie, ze względu na będący w użyciu system radiokomunikacyjny DECT, zakresy częstotliwości przeznaczone pierwotnie dla UMTS zostały ograniczone do 1900 – 2025 MHz i 2110 – 2200 MHz [4, 5, 6].

Obecnie kwestiami widmowymi w Europie zajmują się powołany przez ECC Zespół Projektowy PT1 oraz Europejski Instytut Normalizacji Telekomunikacji (ETSI)². Badania tego typu prowadzone są również przez UMTS Forum – niezależne stowarzyszenie operatorów, producentów i regulatorów. Wyniki tych prac prezentowane są głównie podczas spotkań organizowanych przez ITU-R w ramach zajmującej się problemami IMT-2000 grupy WP8F³. Prowadzone obecnie badania mają na celu przedstawienie na forum międzynarodowym realnego zapotrzebowania na widmo niezbędne do dalszej implementacji systemu oraz identyfikowanie dostępności kolejnych zakresów częstotliwości dla rozwoju UMTS/IMT-2000.

W uzupełnieniu do wspomnianych wyżej zakresów częstotliwości przeznaczonych dla IMT-2000 (1885 – 2025 MHz i 2110 – 2200 MHz), konferencja WRC-2000 zidentyfikowała następujące dodatkowe (tzw. rozszerzone) zakresy częstotliwości dla IMT-2000:

- dla segmentu naziemnego: 1710 – 1885 MHz, 2500 – 2690 MHz i części zakresu 806 – 960 MHz używane, bądź planowane do użycia przez systemy ruchome,
- dla segmentu satelitarnego: 1525 – 1544 MHz, 1545 – 1559 MHz, 1610 – 1626,5 MHz, 1626,5 – 1645,5 MHz, 1646,5 – 1660,5 MHz, 2483,5 – 2500 MHz, 2500 – 2520 MHz i 2670 – 2690 MHz,

z uwagą, że niektóre kraje mogą rozwijać swoje systemy IMT-2000 w innych zakresach niż zidentyfikowane w Regulaminie Radiokomunikacyjnym oraz że identyfikacja ta nie ustala priorytetu i nie wyklucza zastosowań innych służb radiowych w tych zakresach. Powyższe zakresy częstotliwości wyszczególnione zostały w przypisach 5.384A i 5.317A do Artykułu 5 Regulaminu Radiokomunikacyjnego oraz w Uchwałach 223 (WRC-2000), 224 (WRC-2000) i 225 (WRC-2000) [2].

Jak wynika z przedstawionego powyżej wykazu, zakresy 2500 – 2520 MHz i 2670 – 2690 MHz zostały przypisane obu segmentom systemów IMT-2000 a możliwość wyboru, który segment będzie tam implementowany, pozostawiono zainteresowanym krajom. W zakresach przewidzianych dla segmentu satelitarnego ustalone zostały kierunki transmisji ("w górę" UL, lub "w dół" DL). W Europie ustalono jednak, że dla potrzeb segmentu naziemnego wykorzystany będzie pełny zakres 2500 – 2690 MHz [6, 7]. Zakres ten ma być dostępny do użytku od 1 stycznia 2008 roku, stosownie do zapotrzebowania rynku i założeń polityki przyznawania koncesji w danym kraju. Natomiast w Polsce częstotliwości w ramach tego zakresu, zgodnie z zapisami Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości, dostępne są już od początku roku 2006 [8].

Przegląd tych prac i ich wyniki przedstawione zostały w referacie plenarnym wygłoszonym podczas Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji w Poznaniu [9], por.

Załącznik nr 1.

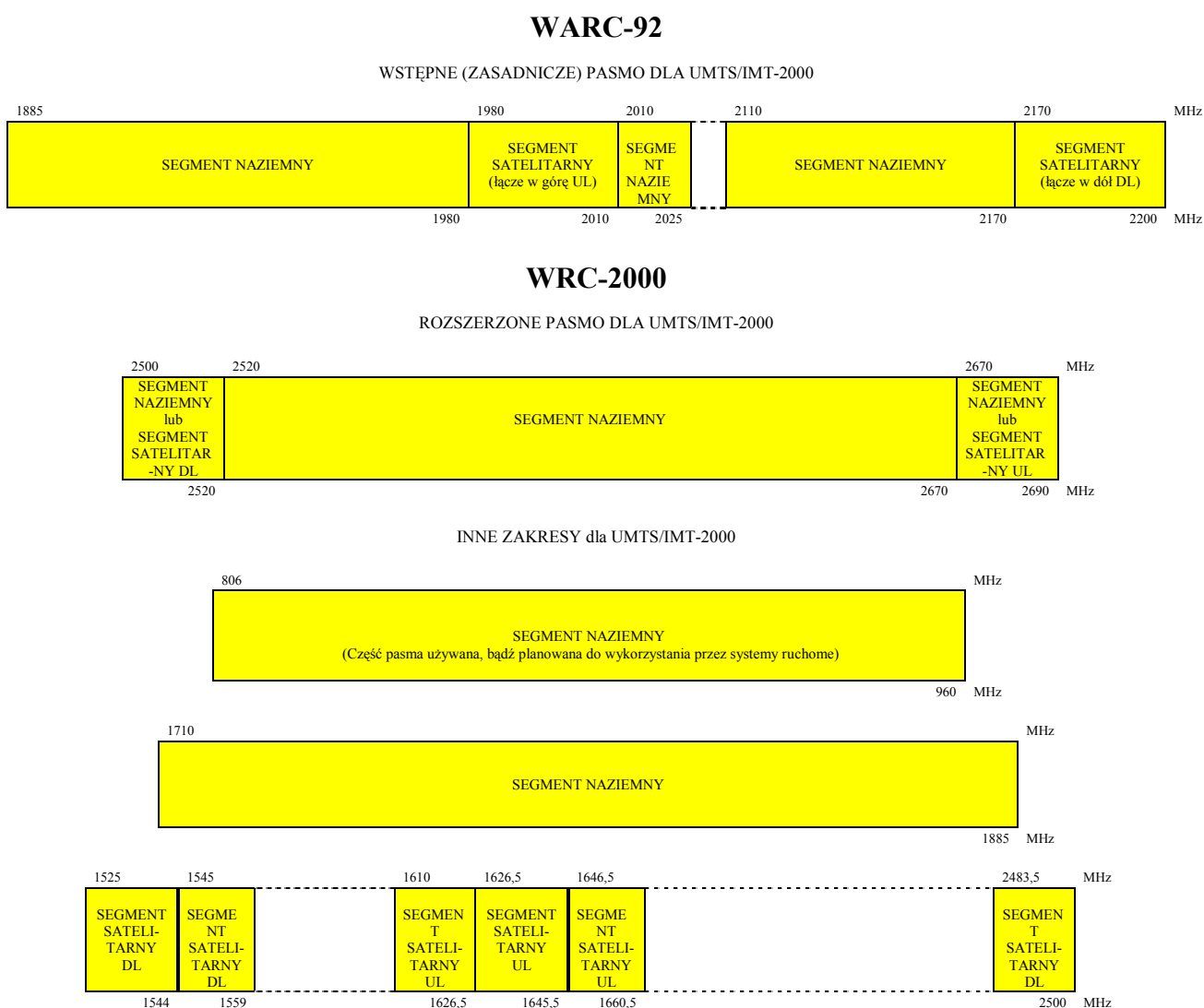
¹ W roku 2002 ERC przekształcono, po połączeniu z Europejskim Komitetem ds. Regulacji Telekomunikacyjnych (*European Committee for Telecommunications Regulatory Affairs, ECTRA*), w Komitet Komunikacji Elektronicznej (*Electronic Communications Committee, ECC*)

² Badania w ramach projektu ogólnosiwiatowego, zwanego 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*).

³ Dawniej była to grupa zadaniowa TG 8/1, na forum której publikowano pierwsze zapotrzebowania widmowe.

Ilustracja zakresów częstotliwości zidentyfikowanych dla aktualnych potrzeb oraz potrzeb dalszego rozwoju UMTS/IMT-2000 przez konferencje WARC-1992 i WRC-2000 jest przedstawiona na rys. 3.3.

Zakresy częstotliwości wykorzystywane obecnie przez systemy radiokomunikacyjne 2. generacji mogą być używane przez systemy UMTS/IMT-2000 dopiero w dalszym horyzoncie czasowym. Potrzeby segmentu satelitarnego zostały zaspokojone poprzez przydzielenie mu niektórych zakresów częstotliwości przewidzianych dla służb ruchomych satelitarnych (*Mobile Satellite Services, MSS*).

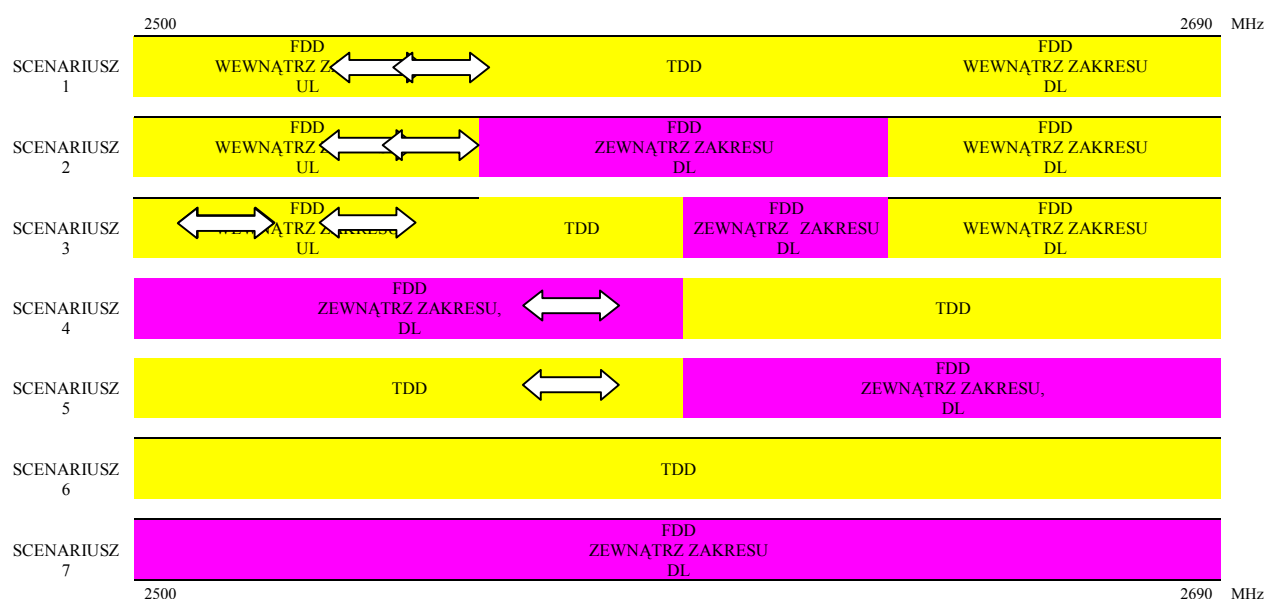


Rys. 3.3: Zakresy częstotliwości zidentyfikowane dla UMTS/IMT-2000 przez konferencje WARC-92 i WRC-2000

3.2.1. Aranżacje częstotliwości dla wdrażanego od 2008 roku segmentu naziemnego UMTS

Przy użytkowaniu systemów UMTS/IMT-2000 zalecana jest jednolita aranżacja częstotliwości. Następuje wówczas bardziej efektywne wykorzystanie widma. Aranżacje zharmonizowanych w skali ogólnosiwiatowej częstotliwości powinny ułatwić roaming międzynarodowy, łatwiej zapewnić kompatybilność wewnątrzsystemową, szczególnie transgraniczną, oraz prowadzić do redukcji kosztów implementacji sieci UMTS/IMT-2000, a także cen terminali.

Obecnie realizowana aranżacja częstotliwości w zasadniczym (podstawowym) zakresie częstotliwości przedstawiana jest w literaturze dość szeroko, np. [9, 10, 11, 12, 13]. W zakresie rozszerzonym (2500 – 2690 MHz) kilka znanych sposobów różnych możliwych aranżacji dodatkowych zakresów częstotliwości przyznanych dla potrzeb segmentu naziemnego opisanych zostało np. w [8, 9, 13]. Rozwiązania tych aranżacji mogą być odmienne ze względu na przewidywaną (niewiadomą w szczegółach jak dotychczas) asymetrię ruchu radiowego. Znanych jest siedem scenariuszy rozwiązań aranżacji zakresu rozszerzonego, w tym trzy scenariusze zwane podstawowymi. Scenariusze te opracowano w ITU. Przedstawione są one na rys. 3.4. Należy zwrócić uwagę na to, że w zaleceniu [10] nieustalone są rozmiary ewentualnej luki centralnej i odstepu dupleksowego dla trybu FDD. Wiadomo natomiast, że rozmiary zarówno luki jak i związanego z nią odstepu dupleksowego uzależnione będą w głównej mierze od maksimum nadawanej mocy, zarówno w łączach "w górę" jak i "w dół", a także od poziomu izolacji pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem (budowy dupleksera, obwodów wejściowych odbiornika, czy filtrów na wyjściu nadajnika).

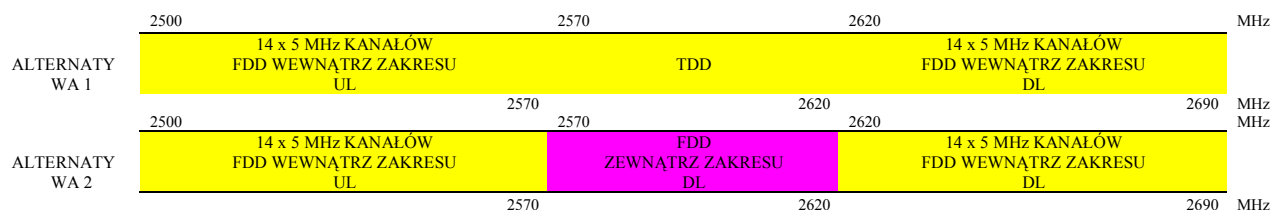


Uwaga: Administracje mogą wykorzystać całe widmo lub jego część w wybranych przez siebie granicach.

Rys. 3.4: Aranżacje częstotliwości w zakresie rozszerzonym dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według ITU-R

Aranżacja opisana w projekcie zmiany Zalecenia [10] opracowanym przez ITU-R WP8F, zakłada trzy możliwe scenariusze zwane C1, C2, i C3. Aranżacje C1 i C2 odpowiadają przy tym scenariuszom 1. i 2. z rys. 3.4, natomiast aranżacja C3 pozwala na elastyczne wykorzystanie trybu FDD lub TDD w ramach całego zakresu rozszerzonego.

Szczegółowy sposób wykorzystania i problemy rozmiarów poszczególnych podzakresów częstotliwości rozwiązano w podjętej w 2005 roku decyzji ECC o harmonizacji wykorzystania zakresu rozszerzonego przez segment naziemny UMTS/IMT-2000 [14]. W decyzji tej określono dwa możliwe rozwiązania, w których centralna luka o szerokości 50 MHz może być użyta albo dla potrzeb duplexu TDD albo dla łącza "w dół" pracującego w trybie TDD. Oba powyższe warianty rozwiązania aranżacji kanałów częstotliwościowych w zakresie rozszerzonym przedstawione są na rys. 3.5.



Uwaga: Każde z pasm ochronnych umieszczonych pomiędzy zakresami FDD/TDD i FDD Wewnątrz / Zewnątrz winno być wyłonię z zakresu 2570 – 2620 MHz i określone przez administrację krajową.

Rys. 3.5: Aranżacje częstotliwości w zakresie rozszerzonym dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według CEPT

Nadmienić należy, że rozwiązanie europejskie zgodne jest ze scenariuszami 1. i 2. opublikowanymi w zaleceniu ITU-R [10]. Problemy wykorzystania zakresu rozszerzonego w Europie prezentowane były Komisji Europejskiej przez CEPT w ramach dwóch sprawozdań [15, 16].

3.2.2. Aranżacje w przyszłych zakresach częstotliwości

W przyszłości, gdy możliwe będzie użytkowanie przez systemy UMTS/IMT-2000 innych, przyznanych przez WRC-2000 a obecnie wykorzystywanych przez systemy 2. generacji, zakresów częstotliwości, ITU-R zaleca do wykorzystania dwie aranżacje w zakresie 824 – 960 MHz (oznaczane zwykle jako A1 i A2) oraz sześć aranżacji w zakresie 1710 – 2170 MHz (oznaczanych jako B1 – B6, przy czym B1, B2 i B3 uważane są aranżacje podstawowe) [9, 10]. Aranżacja B1 jest przy tym identyczna jak przedstawiona powyżej dla zakresu zasadniczego, z dodatkowymi 5 MHz przeznaczonymi dla duplexu TDD poniżej dolnego skraju tego zakresu. Proponowane przez ITU-R aranżacje A1 i A2 przedstawione są w tab. 3.2, natomiast aranżacje B1 – B6 w tab. 3.3.

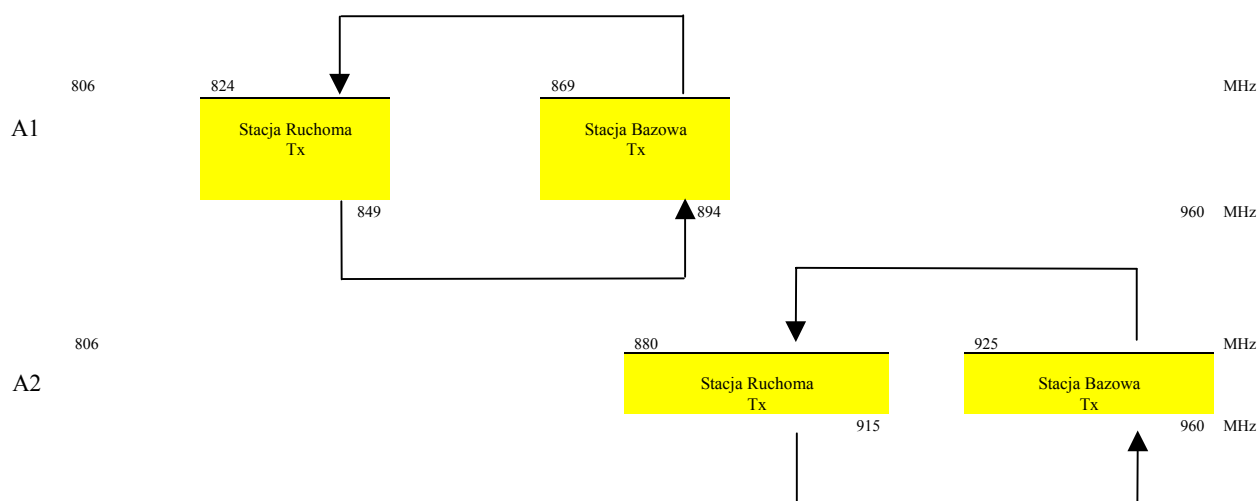
Tab. 3.2: Aranżacje częstotliwości w zakresie 824 – 960 MHz

Oznaczenie aranżacji częstotliwościowej	FDD UL [MHz]	FDD DL [MHz]	Odstęp duplexowy [MHz]
A1	824-849	869-894	45
A2	880-915	925-960	45

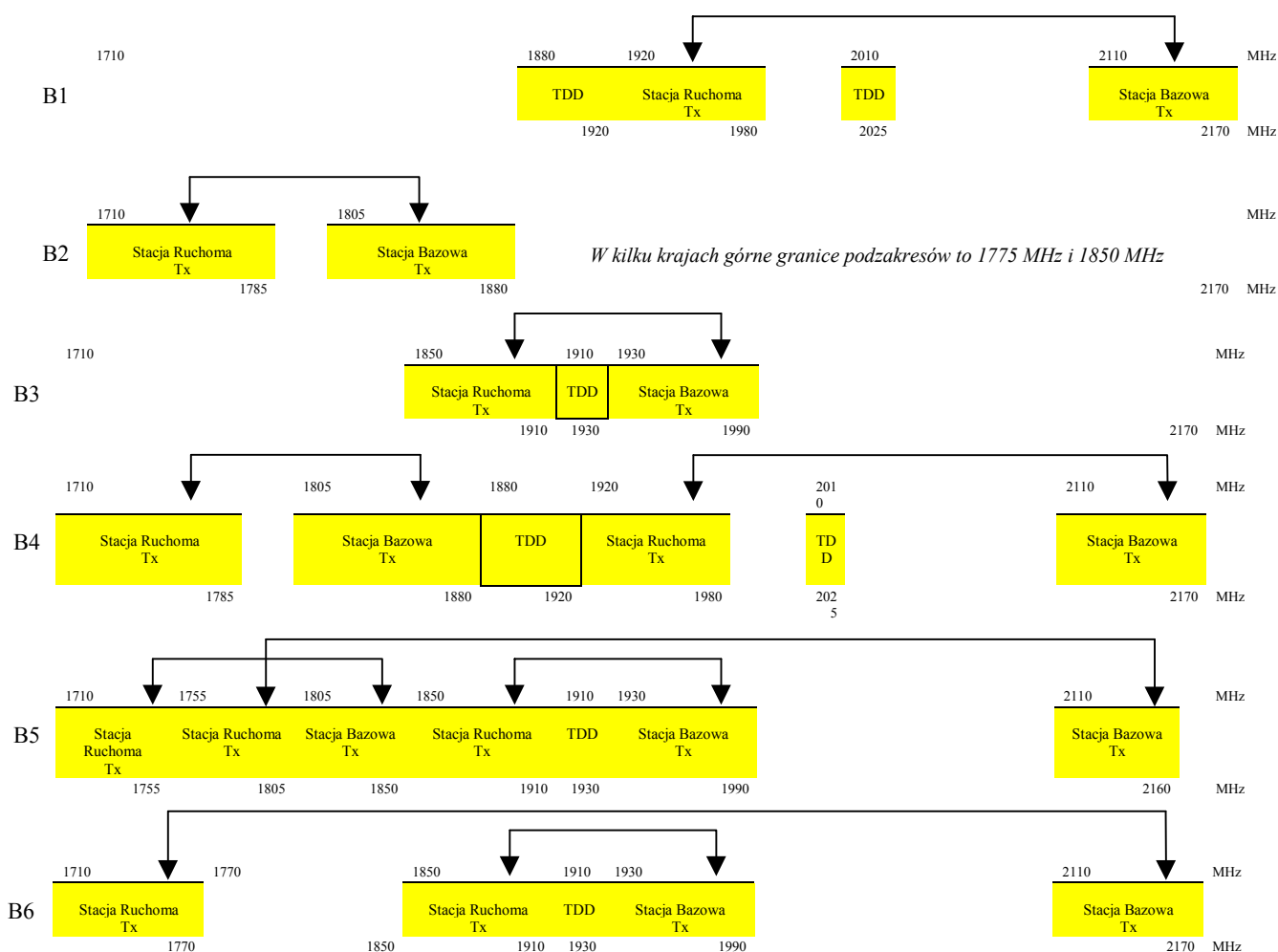
Tab. 3.3: Aranżacje częstotliwości w zakresie 1710 – 2170 MHz

Oznaczenie aranżacji częstotliwościowej	FDD UL [MHz]	FDD DL [MHz]	Odstęp duplexowy [MHz]	Niesymetryczne widmo (np. dla TDD) [MHz]
B1	1 920-1 980	2 110-2 170	190	1 880-1 920, 2 010-2 025
B2	1 710-1 785	1 805-1 880	95	Brak
B3	1 850-1 910	1 930-1 990	80	1 910-1 930
B4 (zharmonizowana z B1 i B2)	1 710-1 785 1 920-1 980	1 805-1 880 2 110-2 170	95 190	1 900-1 920, 2 010-2 025
B5 (zharmonizowana z B3 i częściami B1 i B2)	1 850-1 910 1 710-1 755 1 755-1 805	1 930-1 990 1 805-1 850 2 110-2 160	80 95 355	1 910-1 930
B6 (zharmonizowana z B3 i częściami B1 i B2)	1 850-1 910 1 710-1 770	1 930-1 990 2 110-2 170	80 400	1 910-1 930

Odpowiednie ilustracje tych aranżacji pokazane są na rys. 3.6 i rys. 3.7.



Rys. 3.6: Aranżacje częstotliwości w zakresie 824 – 960 MHz dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według ITU-R



Rys. 3.7: Aranżacje częstotliwości w zakresie 1710 – 2170 MHz dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według ITU-R

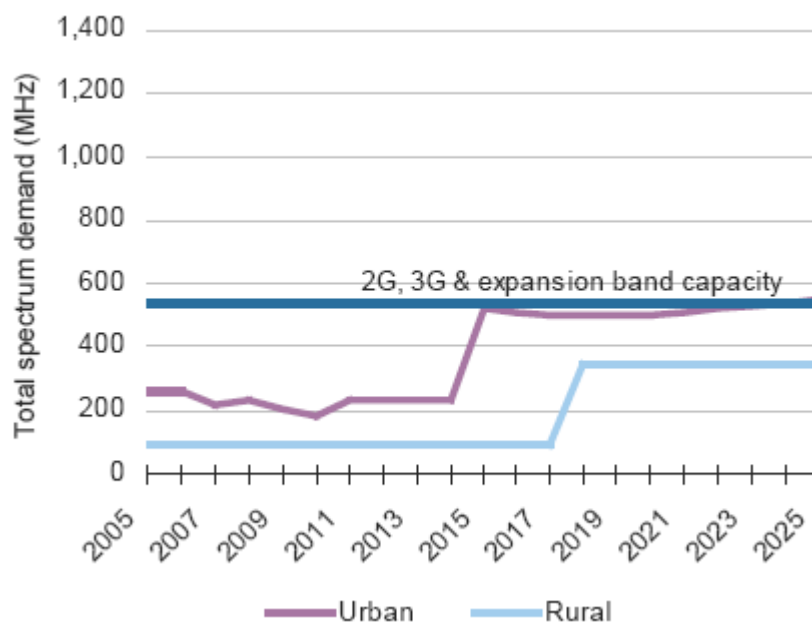
Poszczególne warianty tych aranżacji mogą być wykorzystywane bez jakichkolwiek zmian, zakłada się jednak, że niektóre kraje mogą implementować również ich części. Zakłada się przy tym 5 MHz szerokości bloków (kanałów) częstotliwościowych. Tryb TDD w zasadzie powinien być używany w podzakresach niesymetrycznych, czasem jednak (pod pewnymi warunkami) również w podzakresach symetrycznych właściwych dla łącza "w górę" a także w obrębie luki centralnej (pomiędzy podzakresami używanymi dla łącza "w górę" i "w dół" właściwych dla trybu FDD), wyłączając zakres 2025 – 2110 MHz przeznaczony dla innych służb radiowych.

3.2.3. Prognoza nowych zakresów częstotliwości

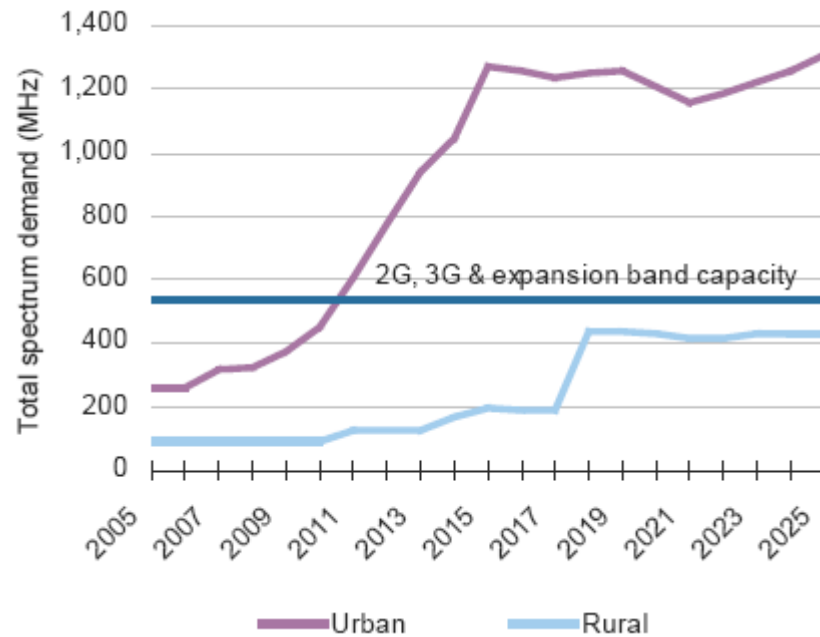
Na całym świecie obserwowany jest dalszy rozwój badań nad spełnieniem zapotrzebowania systemów trzeciej i dalszych generacji na widmo elektromagnetyczne. Trwają intensywne próby przejścia zakresów o niższych niż dotychczas częstotliwościach (poniżej 470 MHz), aby wykorzystać bardziej korzystne warunki propagacji fal radiowych i uzyskać większe obszary pokrycia, co ma istotne znaczenie przy uruchamianiu nowych systemów na terenach o małej gęstości zaludnienia.

W związku z powyższym operatorzy skupieni w UMTS Forum ogłosili, że istnieje potrzeba identyfikacji nowego zakresu częstotliwości dla systemu UMTS/IMT-2000. Zakres ten nazwany *new Coverage Extension Band* powinien być wydzielony w ramach tzw. dywidendy cyfrowej (czyli zysku częstotliwościowego powstałego w wyniku przejścia z nadawania analogowego na cyfrowe) z pasm przeznaczonych dla radiodifuzji i zharmonizowany w zakresie 470 – 600 MHz [17]. Zapotrzebowanie w ramach nowego pasma częstotliwości sięga rozmiaru 2×30 MHz widma.

Prognozy zapotrzebowania na widmo częstotliwości radiowych wskazują na rosnące apetyty, które powinny być zaspokojone w końcu przyszłej dekady. Przykłady takich prognoz, dotyczących łącznego zapotrzebowania na widmo, sporządzonych w Wielkiej Brytanii w ubiegłym roku, przedstawione są na rys. 3.8 i rys. 3.9.

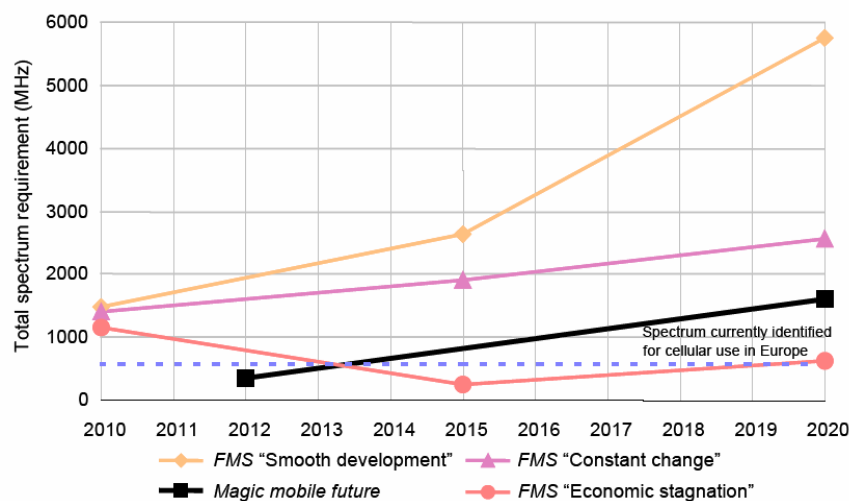


Rys. 3.8: Zapotrzebowanie na widmo dla systemów komórkowych, scenariusz niewielkiego ruchu radiowego. Źródło: Mason, Analyses, 2005



Rys. 3.9: Zapotrzebowanie na widmo dla systemów komórkowych, scenariusz dużego ruchu radiowego. Źródło: Mason, Analyses, 2005

Nieco inne zapotrzebowanie zostało zgłoszone dla założeń różnych wariantów rozwoju rynku, rys. 3.10.



:Spectrum requirements calculated using the spectrum forecasts¹⁰ in Europe [Source: Analysys, Magic mobile future, FMS, 2005]

Rys. 3.10: Zapotrzebowanie na widmo dla systemów komórkowych, cztery scenariusze rozwoju rynku. Źródło: Analyses, Magic mobile future, FMS, 2005

Prezentowane powyżej prognozy zapotrzebowania nie są związane z jakimkolwiek wycinkiem widma i jak widać, są prawie całkowicie rozbieżne. Tymczasem zapotrzebowanie na konkretne nowe zakresy widma zostało zgłoszone ostatnio przez różne instytucje, korporacje, grupy robocze, przez różnych producentów i operatorów. Najbardziej znane propozycje przeznaczenia nowych zakresów dla zaawansowanego IMT i jego dalszych wersji rozwojowych – następnych generacji systemów komórkowych, włączając w to przedstawione powyżej propozycje UMTS Forum, przedstawiają się następująco:

- 410 – 430 MHz (zgłoszone przez ITU-R WP8F),
- 450 – 470 MHz (operatorzy i producenci),
- 470 – 600 MHz (operatorzy i producenci),
- 2300 – 2400 MHz (ITU-R WP8F),
- 2700 – 2900 MHz (ITU-R WP8F),
- 3400 – 3650 MHz (ITU-R WP8F),
- 4400 – 4990 MHz (ITU-R WP8F),
- 5150 – 6000 MHz (ITU-R WP8F).

Propozycje te rozpatrywane będą w toku prac odpowiednich grup roboczych ITU-R a ponadto będą przedmiotem prac na najbliższej Światowej Konferencji Radiokomunikacyjnej WRC-07.

3.3. Problemy kompatybilności

Wprowadzając do użytku każdy nowy system, a w szczególności cyfrowy, należy się liczyć z możliwością wprowadzania do środowiska elektromagnetycznego dużego poziomu zakłóceń. W szczególności wprowadzane w środowisko użytkowanych już systemów (linii radiowych, radiowego dostępu, ruchomych służb satelitarnych) systemy 3G (i następnych) muszą uwzględniać zaistniałą sytuację. Niezakłócona koegzystencja różnych systemów telekomunikacyjnych polega na nie wnoszeniu zakłóceń z jednego do drugiego systemu w stopniu przewyższającym międzynarodowe normy, np. określone przez ITU (a w Europie przez CEPT lub ETSI). Lokując systemy trzeciej generacji w otoczeniu istniejących już innych systemów zdawano sobie sprawę z konieczności przeprowadzenia badań kompatybilnościowych. Pod pewnymi warunkami możliwe jest bowiem "bezbolesne" wprowadzenie nowego systemu w określone środowisko. Czasem jednak takiej możliwości nie ma i użytkowane dotychczas systemy muszą być z określonych pasm usunięte.

Już podczas rozpatrywania możliwości uruchomienia systemu UMTS/IMT-2000 w określonych zakresach częstotliwości konieczne jest przeprowadzanie analizy alokacji widmowej rozmieszczonych tam różnych innych służb (ewentualnie systemów) radiowych. Po rozpatrzeniu przeznaczenia zakresów częstotliwości właściwych dla wprowadzanego systemu oraz zakresów sąsiadujących, możliwe jest wskazanie innych służb i systemów w nich pracujących. Na podstawie tego typu przeprowadzonej analizy tworzona jest macierz koincydencji wskazująca, dla jakich służb i systemów konieczne jest określenie warunków kompatybilności zewnątrzsystemowej dla systemów UMTS/IMT-2000.

Takie badanie przeprowadziła grupa zadaniowa ECC PT1 przed planowanym wprowadzeniem UMTS do użytku w zakresie rozszerzonym. Utworzona została macierz koincydencji [18], tab. 3.5, która powstała w wyniku analiz właściwego dla tego zakresu częstotliwości wycinka Europejskiej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości [6], tab. 3.4. Działania PT1 i wnioski stąd wynikające opisane zostały w pracy prowadzonej w ubiegłym roku na rzecz Ministerstwa Infrastruktury [19].

Tab. 3.4: Przeznaczenia służb radiowych w zakresie częstotliwości 2500-2690 MHz i zakresach z nim sąsiadujących zgodnie z Regulaminem Radiokomunikacyjnym (Region I), Europejską Tablicą Przeznaczeń Częstotliwości [6] i Krajową Tablicą Przeznaczeń Częstotliwości [8]

Zakres częstotliwości		Przeznaczenie		
f dolna [MHz]	f górna [MHz]	Regulamin Radiokomunikacyjny (Region 1.)	ERC Sprawozdanie 25	Krajowa Tablica Przeznaczeń Częstotliwości
2483,5	2500	STAŁA RUCHOMA RUCHOMA SATELITARNA (kosmos - Ziemia) 5.351 A Radiolokalizacja 5.150 5.371 5.397 5.398 5.399 5.402	STAŁA RUCHOMA RUCHOMA SATELITARNA (kosmos - Ziemia) 5.351 A 5.150 5.371 5.398 5.402	STAŁA RUCHOMA RUCHOMA SATELITARNA (Ziemia - kosmos) 5.351 A Radiolokalizacja 5.150 5.371 5.398 5.399 5.402
2500	2520	STAŁA 5.409 5.410 5.411 RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A RUCHOMA SATELITARNA (kosmos - Ziemia) 5.403 5.351A 5.405 5.412 5.414	RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A Stała EU15	STAŁA 5.409 5.410 5.411 RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A RUCHOMA SATELITARNA (kosmos - Ziemia) 5.403 5.351A 5.414 POL.21
2520	2655	RADIODYFUZJA SATELITARNA 5.413 5.416 STAŁA 5.409 5.410 5.411 RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A 5.339 5.403 5.405 5.412 5.417C 5.417D 5.418B 5.418C	STAŁA RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A 5.339 5.418B 5.418C EU2 EU15 EU16	RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A STAŁA 5.409 5.410 5.411 RADIODYFUZJA SATELITARNA 5.413 5.416 5.339 5.403 5.417C 5.417D 5.418B 5.418C POL.21 POL.25
2655	2670	RADIODYFUZJA SATELITARNA 5.413 5.416 STAŁA 5.409 5.410 5.411 RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A Badania kosmiczne Ziemi (pasywne) Radioastronomia 5.149 5.347A 5.412 5.420	STAŁA RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A Badania kosmiczne Ziemi (pasywne) Radioastronomia Badania kosmiczne 5.149 EU2 EU15 EU16	RADIODYFUZJA SATELITARNA 5.413 5.416 STAŁA 5.409 5.410 5.411 RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A Radioastronomia Satelitarne badania Ziemi (pasywne) Badania kosmosu (pasywne) 5.149 5.347A 5.420 POL.21 POL.25

Zakres częstotliwości		Przeznaczenie		
f dolna [MHz]	f górna [MHz]	Regulamin Radiokomunikacyjny (Region 1.)	ERC Sprawozdanie 25	Krajowa Tablica Przeznaczeń Częstotliwości
2670	2690	STAŁA 5.409 5.410 5.411 RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A RUCHOMA – SATELITARNA (Ziemia – kosmos) 5.351A Badania kosmiczne Ziemi (pasywne) Radioastronomia Badania kosmiczne 5.149 5.347A 5.412 5.419 5.420	RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A Stała Radioastronomia 5.149 EU15	STAŁA 5.409 5.410 5.411 RUCHOMA z wyjątkiem ruchomej lotniczej 5.384A RUCHOMA – SATELITARNA (Ziemia - kosmos) 5.351A Radioastronomia 5.149 5.347A 5.419 5.420 POL.21 POL.25
2690	2700	SATELITARNE BADANIA ZIEMI (pasywne) RADIOASTRONOMIA BADANIA KOSMICZNE (pasywne) 5.340 5.422	SATELITARNE BADANIA ZIEMI (pasywne) RADIOASTRONOMIA BADANIA KOSMICZNE (pasywne) 5.340	SATELITARNE BADANIA ZIEMI (pasywne) RADIOASTRONOMIA BADANIA KOSMOSU (pasywne) 5.340

Uwaga: Wielkimi literami zaznaczone są służby pierwszej ważności, które muszą być chronione przed zakłóceniami, a małymi literami służby drugiej ważności. W poszczególnych komórkach tabeli wprowadzone są dodatkowe informacje odnośnie wykorzystania poszczególnych zakresów częstotliwości przez różne kraje. Informacje te są przedstawione w postaci oznaczeń do tablicy (przypisy ITU przedstawione są w formacie 5.XXXY, np. 5.384A). Europa wprowadziła do swej tablicy oznaczenia przypisów dotyczących tylko krajów europejskich np. (EU15), a Polska wprowadziła do swojej tablicy własne oznaczenia (np. POL.21). Treść przypisów europejskich i polskich – najważniejszych z punktu wykorzystania widma w naszym kraju, jest następująca:

EU15 – Pracujące w zakresie częstotliwości 1350-2690 MHz systemy taktycznych linii radiowych powinny mieć możliwość przestrajania w całym zakresie. Wymagania dotyczące taktycznych linii radiowych powinny łączyć się z wymaganiami obowiązującymi dla podzakresów: 1350-1400 MHz, 1427-1452 MHz, 1492-1525 MHz, 1660-1670 MHz, 1675-1710 MHz, 1785-1800 MHz, 2025-2110 MHz, 2200-2290 MHz, 2520-2575 MHz, 2615-2670 MHz. Wspólne wymaganie 2x45 MHz dla taktycznych linii radiowych w przypadku operacji między lub przygranicznych i ćwiczeń powinno zostać zaspokojone w zakresach 2025-2110 MHz i 2200-2290 MHz, a w szczególności w zakresach 2025-2070/2200-2245 MHz.

EU16 – Po wprowadzeniu IMT-2000 służba stała stanie się służbą drugiej ważności w odpowiednich częściach pasma.

POL.21 – Zakres częstotliwości 2500 – 2690 MHz od dnia 1 stycznia 2006 r. przeznaczony jest na potrzeby służby ruchomej wykonywanej przez użytkowników cywilnych (UMTS). Do czasu ogłoszenia postępowania przetargowego w sprawie rozdysponowania przedmiotowego zakresu na potrzeby UMTS zakres ten może być wykorzystywany przez użytkowników podlegających Ministerstwu Obrony Narodowej.

POL.25 – W zakresach częstotliwości 153-174 MHz, 1427-1452 MHz, 2025-2110 MHz, 2170-2400 MHz, 2520-2690 MHz, 5925-7450 MHz, 7850-8400 MHz i 12,00-13,75 GHz, 14,0-14,4 GHz i 14,50-15,35 GHz jednostki organizacyjne podlegające Ministrowi Obrony Narodowej mogą wykorzystywać określone częstotliwości dla potrzeb służby radiolokalizacji, której urzędnicy byli w eksploatacji przed dniem 31 grudnia 2002 r. Takie wykorzystywanie wymaga uzgodnień z Prezesem Urzędu Regulacji Telekomunikacji i Poczty.

Tab. 3.5: Macierz koincydencji służb w zakresie częstotliwości 2500 – 2690 MHz i jego otoczeniu

Zakres częstotliwości	poniżej 2500 MHz	2500 – 2520 MHz	2520 – 2670 MHz	2670 – 2690 MHz	powyżej 2690 MHz
Przeznaczenie wg Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości	STAŁA RUCHOMA RUCHOMA SATELITARNA (kosmos- Ziemia) Radiolokacja	STAŁA* RUCHOMA RUCHOMA SATELITARNA* (kosmos – Ziemia)	STAŁA RUCHOMA RADIODYFUZJA SATELITARNA*	STAŁA* RUCHOMA RUCHOMA SATELITARNA* (Ziemia- kosmos)	RADIOASTRO- NOMIA
Współużytkowanie widma		UMTS / STAŁA UMTS / RUCHOMA SATELITARNA	UMTS / STAŁA (MMDS) UMTS / RADIODYFUZJA SATELITARNA*	UMTS / STAŁA UMTS / RUCHOMA SATELITARNA	
Kompatybilność sąsiedniokanałowa (dolny kraniec zakresu)		UMTS / STAŁA UMTS / RUCHOMA SATELITARNA*	UMTS / STAŁA UMTS / RUCHOMA SATELITARNA*	UMTS / STAŁA UMTS / RADIODYFUZJA SATELITARNA*	
Kompatybilność sąsiedniokanałowa (górny kraniec zakresu)		UMTS / RADIODYFUZJA SATELITARNA*	UMTS / RUCHOMA SATELITARNA	UMTS / RADIOASTRO- NOMIA	

* Uwaga: Zgodnie z Regulaminem Radiokomunikacyjnym [2] i Krajową Tablicą Przeznaczeń Częstotliwości [8], natomiast niezgodnie z Europejską Tablicą Przeznaczeń i Zastosowań Częstotliwości ECA [6].

Z przedstawionego zestawienia wynika, że warunki kompatybilności, dotyczące sposobu współużytkowania tych samych i sąsiadujących podzakresów częstotliwości, winny zostać ustalone dla systemu IMT-2000/UMTS i następujących służb pierwszej ważności:

- stałej,
- ruchomej satelitarnej,
- rozsiewczej satelitarnej,
- radioastronomii.

Zgodnie z Regulaminem Radiokomunikacyjnym niektóre części zakresu częstotliwości 2500-2690 MHz przeznaczone są w Regionie 1. ITU dla potrzeb służby ruchomej satelitarnej i rozsiewczej satelitarnej [2]. Jednak zamiarem Europejskiego Komitetu Komunikacji Elektronicznej ECC jest niewprowadzenie w nim tych służb. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w Europejskiej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości, gdzie w powyższym zakresie częstotliwości nieprzewidziana jest jakakolwiek służba satelitarna.

W przypadku, gdyby kraje pozaeuropejskie chciały uruchomić systemy ruchome satelitarne MSS, czy rozsiewcze satelitarne (BSS GSO lub BSS NGSO) w zakresie częstotliwości 2500-2690 MHz, to w myśl Zalecenia ECC/REC/(03)/03 [20], kraje europejskie nie powinny wyrazić na to zgody.

W Polsce w zakresie częstotliwości 2690-2700 MHz użytkowana jest obecnie jedynie służba radioastronomiczna (RAS). W związku z tym polska administracja łączności powinna zadbać o niezakłócone współużytkowania widma między IMT-2000/UMTS i radioastronomią w okolicach górnego krańca zakresu 2670-2690 MHz.

Problemy dotyczące współużytkowania podzakresu 2520-2670 MHz mogą dotyczyć jedynie kompatybilności transgranicznej systemów IMT-2000/UMTS (w Polsce) i systemów MMDS (poza granicami Polski - Litwa). Nie powinno się przy tym dopuszczać do uruchomienia systemów MMDS na terenie Polski, bo wykluczy to możliwość implementacji IMT-2000/UMTS na dużych obszarach [19].

Zasady kompatybilnej pracy systemów naziemnego segmentu UMTS (UTRA) i segmentu satelitarnego mogą być rozpatrywane są przy założeniu, że są to odrębne służby radiowe, ponieważ segment satelitarny UMTS należy do Służby Ruchomej Satelitarnej (*Mobile Satellite Service, MSS*), a UTRA zaliczyć można do Służby Ruchomej Lądowej. Ze względu jednak na to, że z punktu widzenia tzw. rodziny systemów IMT-2000, obydwa segmenty naziemny i satelitarny do niej należą, stąd wzajemne zakłócenia pomiędzy nimi traktowane są z reguły jako wewnętrzsystemowe [13].

Podobne badania kompatybilnościowe należy przeprowadzać każdorazowo przed wprowadzeniem do użytku dowolnego systemu kolejnych generacji. Badania takie będą więc dotyczyć tych zakresów, w których przewiduje się dalszy rozwój (kolejne wersje) systemów, zaprezentowanych powyżej, w punkcie 3.2.

Bibliografia do rozdz. 3

- [1] J-P. Bienaime, Future of Telecommunications – UMTS Forum views, 13th CEPT Conference Berlin, 11-12 October 2006.
- [2] ITU, ITU-R Radio Regulations, Geneva 2004.
- [3] ITU, World Radiocommunication Conference WRC-97 (Geneva, 1997), Resolution 212 (Rev. 97), Implementation of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000).
- [4] ERC, ERC Decision of 30 June 1997 on the frequency bands for the introduction of the Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), ERC/DEC/(97)07.
- [5] ERC, ERC Decision of 28 March 2000 extending ERC/DEC/(97)07 on the frequency bands for the introduction of terrestrial Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), ERC/DEC/(00)01.
- [6] ECC, ERC Report 25, The European Table of Frequency Allocations and Utilisations Covering the Frequency Range 9 kHz to 275 GHz, Lisboa January 2002 – Dublin 2003 – Turkey 2004 – Copenhagen 2004.
- [7] ECC, ECC Decision of 15 November 2002 on the designation of frequency band 2500 – 2690 MHz for UMTS/IMT-2000, ECC/DEC/(02)06.
- [8] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 29 czerwca 2005 r. w sprawie Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości, Dz.U. z dn. 21 lipca 2005r., Nr 134, poz.1127.
- [9] M. J. Grzybkowski, Zasoby widmowe systemów IMT-2000 – rzeczywistość i strategia rozwoju, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Poznań 2006.
- [10] ITU, ITU-R Recommendation M.1036, Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) in the bands 806 – 960 MHz, 1 710 – 2 025 MHz, 2 110 – 2 200 MHz and 2 500 – 2 690 MHz.
- [11] ERC, ERC Decision of 29 November 1999 on the harmonised utilisation of spectrum for terrestrial Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) operating within the bands 1900 – 1980 MHz, 2010 – 2025 MHz and 2110 – 2170 MHz, ERC/DEC/(99)25.
- [12] ECC, ECC Recommendation (02)10, Harmonised Utilisation of Spectrum for 1.28 Mcps UTRA TDD Option in Connection with ERC/DEC/(99)25.
- [13] M. Nawrocki (ed.), et al., Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation: Theory and Practice, Wiley & Sons, 2006.

-
- [14] ECC, ECC Decision of 18 March 2005 on harmonised utilisation of spectrum for IMT-2000/UMTS systems operating within the band 2500 – 2690 MHz, ECC/DEC/(05)05.
 - [15] ECC, CEPT Report 001, Report from CEPT to the European Commission under Mandate 4, Frequency Usage to Facilitate a Co-ordinated Implementation in the Community of Third Generation Mobile and Wireless Communication Systems Operating in Additional Frequency Bands as Identified by the WRC-2000 for IMT-2000 Systems, 15 November 2002.
 - [16] ECC, CEPT Report 002, Report from CEPT to the European Commission on the 5th Mandate on IMT-2000/UMTS, Harmonisation of the Frequency Usage within the Additional Frequency Band of 2500 – 2690 MHz to be Made Available for IMT-2000/UMTS Systems in Europe, 12 November 2004.
 - [17] UMTS Forum, Report No 38, Coverage Extension Bands for UMTS/IMT-2000 in the bands between 470 – 600 MHz, 2005.
 - [18] ECC, ECC Report 45, Sharing and Adjacent Band Compatibility Between UMTS/IMT-2000 in the Band 2500 – 2690 MHz and Other Services, Granada, February 2004.
 - [19] Instytut Łączności, M.J. Grzybkowski, J. Kwolek, Kompatybilność radiowa systemów łączności ruchomej trzeciej i kolejnych generacji, Sprawozdanie nr Z21/21400555/941/05.
 - [20] ECC Recommendation (03)03, Measures to safeguard the future use of terrestrial IMT-2000/UMTS in the 2.5 GHz range with respect to satellite systems.
-

Załączniki

- **M. J. Grzybowski.** "Zasoby widmowe systemów IMT-2000 – Rzeczywistość i strategia rozwoju". KKRRiT. Poznań. 2006.
- **K. Kaczan. A. Orłowski.** "Radiowe sieci lokalne WLAN (Wi-Fi) – projektowanie, optymalizacja, testowanie". Seminarium Instytutu Łączności. 25.10.2006 r.
- **A. Orłowski.** "Standard TETRA – stan aktualny i kierunki rozwoju". II spotkanie Forum TETRA – Polska. Warszawa. Instytut Łączności. 28.11.2006 r.

ZASOBY WIDMOWE SYSTEMÓW IMT-2000 – RZECZYWISTOŚĆ I STRATEGIA ROZWOJU

Streszczenie: W referacie przedstawiono historię rozwoju zasobów widmowych przeznaczonych do wykorzystania przez systemy UMTS/IMT-2000 przez pryzmat rozstrzygnięć Światowych Konferencji Radiokomunikacyjnych. Zdefiniowano zakresy częstotliwości, w których możliwa jest aktualna i przyszła implementacja systemów IMT-2000 i post IMT-2000. Szczegółowo zaprezentowano możliwe warianty aranżacji częstotliwości dla segmentu naziemnego. Opisano kierunki rozwoju zasobów widmowych w kontekście wymagań operatorów radiokomunikacyjnych.

1. WSTĘP

Badania nad tworzeniem ogólnosięciowych systemów telekomunikacyjnych umożliwiających transmisję multimedialne, zwanymi początkowo Future Public Land Mobile Telecommunications Systems (FPLMTS) a obecnie International Mobile Telecommunications – 2000 (IMT-2000) rozpoczęły się w latach 80. ubiegłego stulecia. Badania te prowadzono zarówno w sektorze radiokomunikacyjnym jak i w sektorze standaryzacyjnym Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego (odpowiednio ITU-R i ITU-T). W ramach pierwszych badań prowadzono analizy usług, rozwiązań technicznych i operacyjnych systemów oraz określano wymogi w dziedzinie zapotrzebowania na widmo elektromagnetyczne.

W latach 90., gdy postanowiono w Europie uruchomić kompatybilny z IMT-2000 system Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), zaliczany do tzw. Family IMT, badaniami potrzeb zajętości widma dla tego systemu zajęli się głównie Europejski Komitet Radiokomunikacyjny (European Radiocommunication Committee, ERC)¹, powołany przez Europejską Konferencję Poczty i Telekomunikacji (European Conference of Postal and Telecommunications, CEPT). Badania te doprowadziły do określenia niezbędnej ilości widma koniecznego do uruchomienia pierwszych systemów radiokomunikacyjnych trzeciej generacji.

Obecnie kwestiami widmowymi na naszym kontynencie zajmują się powołany przez ECC Zespół Projektowy PT1 oraz Europejski Instytut Normalizacji

Telekomunikacji (ETSI)². Badania tego typu prowadzone są również przez UMTS Forum – niezależne stowarzyszenie operatorów, producentów i regulatorów. Wyniki tych prac prezentowane są głównie podczas spotkań organizowanych przez ITU-R w ramach zajmującej się problemami IMT-2000 grupy WP8F³. Prowadzone obecnie badania mają na celu przedstawienie na forum międzynarodowym realnego zapotrzebowania na widmo niezbędne do dalszej implementacji systemu oraz identyfikowanie dostępności kolejnych zakresów częstotliwości dla rozwoju UMTS/IMT-2000.

2. WYMAGANIA WIDMOWE DLA UMTS

Już z pierwszych analiz prowadzonych przez ITU-R wynikało, że wprowadzenie systemów trzeciej generacji pociągać będzie za sobą szereg zmian technologicznych a nowa jakość usług (np. w dziedzinie multimedii) powodować będzie większe niż dotychczas wymagania w stosunku do szerokości zajmowanego widma. Pod koniec lat 80. oceniano, że wszyscy operatorzy wykorzystywać będą w sumie zakresy częstotliwości o łącznej szerokości 130 do 180 MHz [1]. Z tego względu przypuszczano wtedy, że minimalna szerokość pasma przydzielana jednemu operatorowi sięgać będzie przynajmniej 2x20 MHz, a na jednym obszarze geograficznym powinno działać minimum dwóch operatorów. Później ustalono, że w początkowej fazie dla wszelkich potrzeb systemów radiokomunikacyjnych 3. generacji wystarczy jedynie ok. 230 MHz widma, przy czym ITU-R zalecał użycie 60 MHz widma dla potrzeb „stacji osobistych” i ok. 170 MHz dla stacji ruchomych [2]. Pierwsze wymagania na niezbędny rozmiar widma omawiane były podczas Światowej Administracyjnej Konferencji Radiowej (World Administrative Radio Conference) WARC-92⁴. Ustalono wtedy, że dla potrzeb segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000⁵ prze-

¹ w roku 2002 ERC przekształcono, po połączeniu z Europejskim Komitetem ds. Regulacji Telekomunikacyjnych (European Committee for Telecommunications Regulatory Affairs, ECTRA), w Komitet Komunikacji Elektronicznej (Electronic Communications Committee, ECC)

² badania w ramach projektu ogólnosięciowego, zwanego 3GPP (3rd Generation Partnership Project)

³ dawniej była to grupa zadaniowa TG 8/1, na forum której publikowano pierwsze zapotrzebowania widmowe

⁴ pełna nazwa określała również założenia tej konferencji: World Administrative Radio Conference for Dealing with Frequency Allocations in Certain Parts of the Spectrum (Malaga-Torremolinos, 1992)

⁵ podczas konferencji WARC-1992 IMT-2000 była określana jeszcze starym mianem FPLMTS

znaczone będzie łącznie 155 MHz a dla segmentu satelitarnego 2x30 MHz widma.

Gwałtowny i raczej nieoczekiwany rozwój systemów komunikacji ruchomej pociągnął za sobą wzrost wymagań widmowych. Początkowe zapotrzebowanie na widmo uległo szybkiej weryfikacji. W ramach grupy roboczej WP8F ITU (przy dużym współudziale grupy ECC PT1, pierwotnie zwanej ERC TG1, oraz powołanej przez UMTS Forum grupy Spectrum Access Group, SAG) opracowano metodykę obliczeń widma niezbędnego do zaspokajania potrzeb na usługi świadczone przez UMTS/IMT-2000 i przedstawiono ją osobno dla każdego z segmentów naziemnego i satelitarnego w kolejnych Zaleceniach ITU-R [3, 4].

Prowadzone przed Światową Konferencją Radiokomunikacyjną WRC-2000 obliczenia dotyczące przyszłego zapotrzebowania na widmo wykazały [5, 6], że rozmiar przeznaczeń częstotliwości określony na WARC-92 nie będzie wystarczający dla efektywnego wykorzystania zasobów radiowych zarówno przez segmenty naziemny jak i satelitarny UMTS/IMT-2000. Pierwotne zasoby widmowe umożliwią jedynie wprowadzenie systemu w formie podstawowej, nie dając możliwości jego przyszłościowego rozwoju i nie pozwalając na pełne wykorzystanie jego potencjalnych możliwości technicznych. W Europie prowadzono zatem prace mające na celu wyszukanie dodatkowych pasm częstotliwości dla UMTS. Analiza dotyczyła zasobów widmowych dostępnych dla służb radiokomunikacyjnych. Stanowiło to podstawę do zgłoszenia europejskich potrzeb częstotliwościowych w ramach Wspólnych Propozycji (ECP) zgłoszonych na WRC-2000. Równocześnie potrzeby takie zgłosiły różne kraje z całego świata.

W Sprawozdaniu ze Spotkań Przygotowujących Konferencję (CPM) oraz we Wspólnych Propozycjach na WRC-2000 pokazano, że celem zaspokojenia przyszłego zapotrzebowania na widmo dla UMTS/IMT-2000, przy przewidywanym wzroście ruchu radiowego, w roku 2010 niezbędne jest przeznaczenie dodatkowego, w stosunku do zidentyfikowanego uprzednio przez WARC-92, widma w wymiarze:

- dla segmentu naziemnego – 160 MHz,
- dla segmentu satelitarnego – 2x30 MHz.

Stwierdzono ponadto, że dla segmentu naziemnego celem spełnienia zapotrzebowania na dodatkowe 160 MHz widma, należy w ramach konferencji WRC-2000 znaleźć jednolite, ogólnosiwiatowe zakresy częstotliwości. Takie zharmonizowane globalnie zakresy powinny umożliwić ogólnosiwiatowy roaming i zredukować koszt i złożoność implementacji IMT-2000. Uzgodniono, że WRC-2000 winno także zidentyfikować dla potrzeb IMT-2000 tę część widma, która obecnie wykorzystywana jest dla potrzeb ruchomych systemów radiokomunikacyjnych drugiej generacji. Widmo to mogłoby być wykorzystane dla potrzeb UMTS/IMT-2000 w terminie późniejszym. Te wymagania na widmo zostały zaspokojone, gdyż konferencja WRC-2000 rzeczywiście określiła niezbędną ilość dodatkowego widma.

W ramach badań dotyczących zapotrzebowania na kolejne części widma dla dalszego rozwoju UMTS/IMT-2000 prowadzonych przez ITU-R WP 8F tworzone są nowe dokumenty związane z projektem nowych sprawozdań [IMT.ESTIMATE i IMT.METH] dotyczące wymagań związanych z przyszłym rozwojem systemów UMTS/IMT-2000 i późniejszych oraz metodologii obliczeń wymagań widmowych dla przyszłego rozwoju tych systemów po roku 2010. Dokumenty te mają powstać przed 2007 rokiem, przed WRC-2007. Ciekawą propozycją w Europie stanowi metoda obliczeń wymagań widma dla UMTS opracowana w ramach pracy WINNER Work Package 6 Task 2 [7].

3. WIDMO PRZEZNACZONE DLA OBECNYCH I PRZYSZŁYCH POTRZEB UMTS

Systemy trzeciej generacji wymusiły wprowadzenie bardzo zaawansowanych technologii. Z uwagi na planowaną przyszłą pełną integrację segmentów naziemnego i satelitarnego konieczne stało się przeznaczenie dla nich bliskich sobie zakresów częstotliwości. W związku z tym WARC-92 zidentyfikowała dla niezbędnych potrzeb UMTS/IMT-2000 pasmo częstotliwości 2 GHz (zwane w Europie pasmem zasadniczym – core band) obejmujące zakresy 1885 – 2025 MHz i 2110 – 2200 MHz, przy czym na potrzeby segmentu satelitarnego przeznaczono zakresy 1980 – 2010 MHz i 2170 – 2200 MHz. Zakresy te zdefiniowano w przypisie 5.388 Artykułu 5 Regulaminu Radiokomunikacyjnego ITU [8]. Są one dostępne dla systemów IMT-2000 zgodnie z Uchwałą 212 (Rev.WRC-95, Rev.WRC-97) [2]. W Europie, ze względu na będący w użyciu system radiokomunikacyjny Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT), zakresy częstotliwości przeznaczone dla UMTS zostały ograniczone do 1900 – 2025 MHz i 2110 – 2200 MHz [9, 10, 11].

W uzupełnieniu do wspomnianych wyżej zakresów częstotliwości przeznaczonych dla IMT-2000 (1885 – 2025 MHz i 2110 – 2200 MHz), konferencja WRC-2000 zidentyfikowała następujące dodatkowe (tzw. rozszerzone) zakresy częstotliwości dla IMT-2000:

- dla segmentu naziemnego: 1710 – 1885 MHz, 2500 – 2690 MHz i części zakresu 806 – 960 MHz używane, bądź planowane do użycia przez systemy ruchome,
- dla segmentu satelitarnego: 1525 – 1544 MHz, 1545 – 1559 MHz, 1610 – 1626,5 MHz, 1626,5 – 1645,5 MHz, 1646,5 – 1660,5 MHz, 2483,5 – 2500 MHz, 2500 – 2520 MHz i 2670 – 2690 MHz,

z uwagą, że niektóre kraje mogą rozwijać swoje systemy IMT-2000 w innych zakresach niż zidentyfikowane w Regulaminie Radiokomunikacyjnym oraz że identyfikacja ta nie ustala priorytetu i nie wyklucza zastosowań innych służb radiowych w tych zakresach. Powyższe zakresy częstotliwości wyszczególnione zostały w przypisach 5.384A i 5.317A do

Artykułu 5 Regulaminu Radiokomunikacyjnego oraz w Uchwałach 223 (WRC-2000), 224 (WRC-2000) i 225 (WRC-2000) [8].

Jak wynika z przedstawionego powyżej wykazu, zakresy 2500 – 2520 MHz i 2670 – 2690 MHz zostały przypisane obu segmentom systemów IMT-2000 a możliwość wyboru, który segment będzie tam implementowany, pozostawiono zainteresowanym krajom. W zakresach przewidzianych dla segmentu satelitarnego ustalone zostały kierunki transmisji („w górę” UL, lub „w dół” DL). W Europie ustalono jednak, że dla potrzeb segmentu naziemnego wykorzystany będzie pełny zakres 2500 – 2690 MHz [11, 12]. Zakres ten ma być dostępny do użytku od 01 stycznia 2008 roku, stosownie do zapotrzebowania rynku i założeń polityki przyznawania koncesji w danym kraju. Natomiast w Polsce częstotliwości w ramach tego zakresu, zgodnie z zapisami Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości, dostępne są już od początku roku 2006 [13]. Ilustracja zakresów częstotliwości zidentyfikowanych dla aktualnych potrzeb oraz potrzeb dalszego rozwoju UMTS/IMT-2000 przez konferencje WARC-1992 i

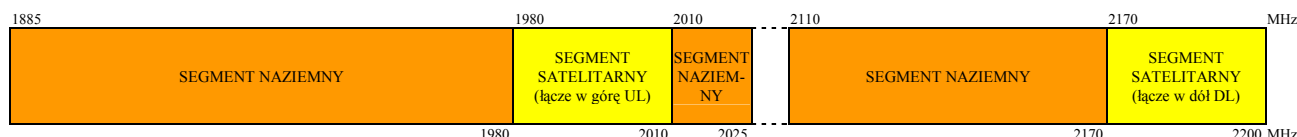
WRC-2000 jest przedstawiona na rys. 1. Zakresy częstotliwości wykorzystywane obecnie przez systemy radiokomunikacyjne 2. generacji mogą być używane przez systemy UMTS/IMT-2000 dopiero w dalszym horyzoncie czasowym. Potrzeby segmentu satelitarnego zostały zaspokojone poprzez przydzielenie mu niektórych zakresów częstotliwości przewidzianych dla służb ruchomych satelitarnych (Mobile Satellite Services, MSS).

4. ARANŻACJE CZĘSTOTLIWOŚCI DLA SEGMENTU NAZIEMNEGO UMTS

Przy użytkowaniu systemów UMTS/IMT-2000 zalecana jest jednolita aranżacja częstotliwości. Następuje wówczas bardziej efektywne wykorzystanie widma. Aranżacje zharmonizowanych w skali ogólnosiwiatowej częstotliwości powinny ułatwić roaming międzynarodowy, łatwiej zapewnić kompatybilność wewnątrzsystemową, szczególnie transgraniczną, oraz prowadzić do redukcji kosztów implementacji sieci UMTS/IMT-2000 a także cen terminali.

WARC-92

WSTĘPNE (ZASADNICZE) PASMO DLA UMTS/IMT-2000

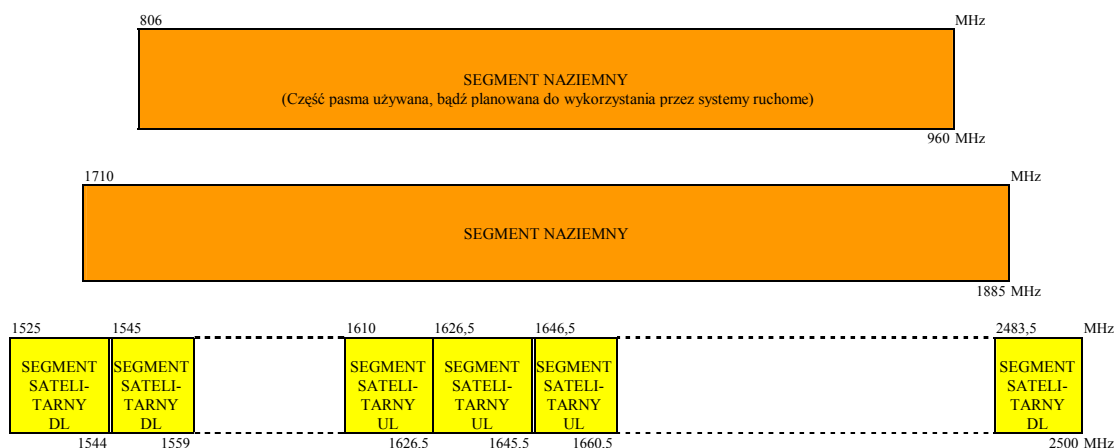


WRC-2000

ROZSZERZONE PASMO DLA UMTS/IMT-2000



INNE ZAKRESY dla UMTS/IMT-2000



Rys. 1. Zakresy częstotliwości zidentyfikowane dla UMTS/IMT-2000 przez konferencje WARC-92 i WRC-2000

4.1. Podstawowy zakres częstotliwości 1885 – 2170 MHz

W zasadniczym zakresie częstotliwości przeznaczonym dla segmentu naziemnego ITU-R zalecał w dawnej wersji Zalecenia [14], aby rozwijać systemy z uwzględnieniem obydwóch trybów działania – duplexu z podziałem częstotliwości (FDD) i duplexu z podziałem czasu (TDD) oraz by instalacja systemów wykorzystujących te tryby w sąsiednich blokach kanałowych dokonywana była z uwzględnieniem technik redukcji wzajemnych zakłóceń. Zalecana aranżacja częstotliwości zakresu podstawowego powinna według ITU wyglądać następująco:

- niesymetryczne zakresy częstotliwości 1885 – 1920 MHz i 2010 – 2025 MHz są przeznaczone dla działania w trybie TDD,
- symetryczne zakresy częstotliwości 1920 – 1980 MHz i 2110 – 2170 MHz są przeznaczone dla działania w trybie FDD, przy czym kierunek transmisji w dolnym podzakresie przebiega ku stacji bazowej – nadaje stacja ruchoma (łącze „w górę”), a w górnym podzakresie kierunek transmisji jest odwrotny – od stacji bazowej do stacji ruchomej. Zakłada się przy tym, że odstęp duplexowy jest równy 190 MHz.

Aranżacja ta przedstawiona jest na rys. 2.

Na tle tego podstawowego schematu rozwiązania szczegółowe mogły się nieco różnić, gdyż w niektórych krajach w dolnej części zakresu 1885 – 2025 MHz umożliwiono działanie innych systemów, np. wspomnianego wyżej DECT, który zajmuje zakres 1880 – 1900 MHz, Personal Handyphone System (PHS), pracującego w zakresie 1893,5 – 1919,6 MHz czy Personal Communication System (PCS) opartego na normach amerykańskich, wykorzystującego 80 MHz odstęp duplexowy w zakresie 1850 – 1990 MHz.

W krajach europejskich ERC zalecił, jak wspomniano wyżej, by ze względu na użytkowanie systemu DECT, zakres zasadniczy przeznaczony dla segmentu naziemnego UMTS ograniczyć od dołu, poczynawszy od częstotliwości 1900 MHz, oraz zdecydował o wprowadzeniu harmonizacji wykorzystania widma w tym zakresie [15]. Aranżacja częstotliwości w tak określonym zakresie zasadniczym nie różniła się od zalecanej przez ITU, lecz uszczegółowiony został sposób wyko-

rzystania tego zakresu. W decyzji [15] określono między innymi, że:

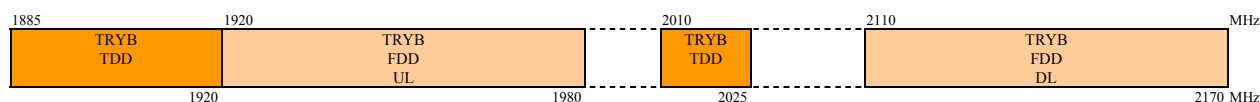
- raster kanałowy jest równy 200 kHz a częstotliwość „nośnej” jest całkowitą wielokrotnością 200 kHz,
- odstęp pomiędzy „nośnymi” FDD różnych operatorów publicznych jest równy minimum 5,0 MHz, natomiast odstęp pomiędzy „nośnymi” FDD w ramach widma przyporządkowanemu jednemu operatorowi jest zmienny i zachowując oparcie na rastrze 200 kHz, może być mniejszy od 5,0 MHz,
- odstęp pomiędzy „nośnymi” TDD różnych operatorów publicznych jest równy minimum 5,0 MHz, natomiast odstęp pomiędzy „nośnymi” TDD w ramach widma przyporządkowanemu jednemu operatorowi jest zmienny i zachowując oparcie na rastrze 200 kHz, może być mniejszy od 5,0 MHz,
- odstęp pomiędzy „nośnymi” TDD i FDD różnych operatorów publicznych jest równy minimum 5,0 MHz,
- podzakres 2010 – 2020 MHz jest przewidziany dla prywatnych krótkodystansowych zastosowań (do własnego użytku).

Jednak w przypadkach, gdy operatorzy używać będą duplex TDD, istnieje możliwość stosowania mniejszej przepływności chipowej niż 3,84 Mcps z nominalnym odstępem kanałowym 5 MHz. Zalecenie [16] dopuszcza wówczas użycie przepływności 1,28 Mcps z nominalnym odstępem kanałowym 1,6 MHz. Wtedy blok częstotliwościowy o szerokości 5 MHz przyporządkowany do jednej „nośnej” TDD o przepływności 3,84 Mcps może alternatywnie zawierać od jednej do trzech „podnośnych” TDD o przepływności 1,28 Mcps.

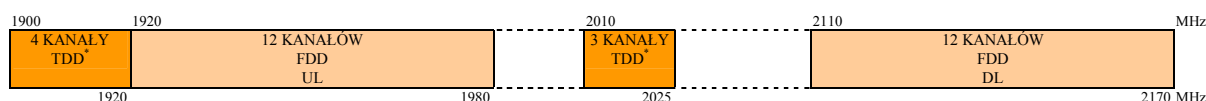
Aranżacja europejska przedstawiona jest na rys. 3.

4.2. Zakres rozszerzony 2500 – 2690 MHz

Kilka znanych sposobów różnych możliwych aranżacji dodatkowych zakresów częstotliwości przeznaczonych dla potrzeb segmentu naziemnego opisanych zostało w [13]. Ze względu na przewidywaną (niewiadomą w szczegółach jak dotychczas) asymetrię ruchu radiowego założono, że rozszerzony zakres częstotliwości może być podzielony na kilka podzakresów, w których nastąpi segmentacja dostępu duplexowego.



Rys. 2. Aranżacja częstotliwości dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 w zakresie zasadniczym według ITU-R



(*) Każdy kanał 5 MHz (tryb TDD) może być podzielony na maksimum trzy kanały TDD o odstępach między „podnośnymi” 1,6 MHz

Rys. 3. Aranżacja częstotliwości w zakresie zasadniczym dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według CEPT

W podzakresach tych może mieć miejsce:

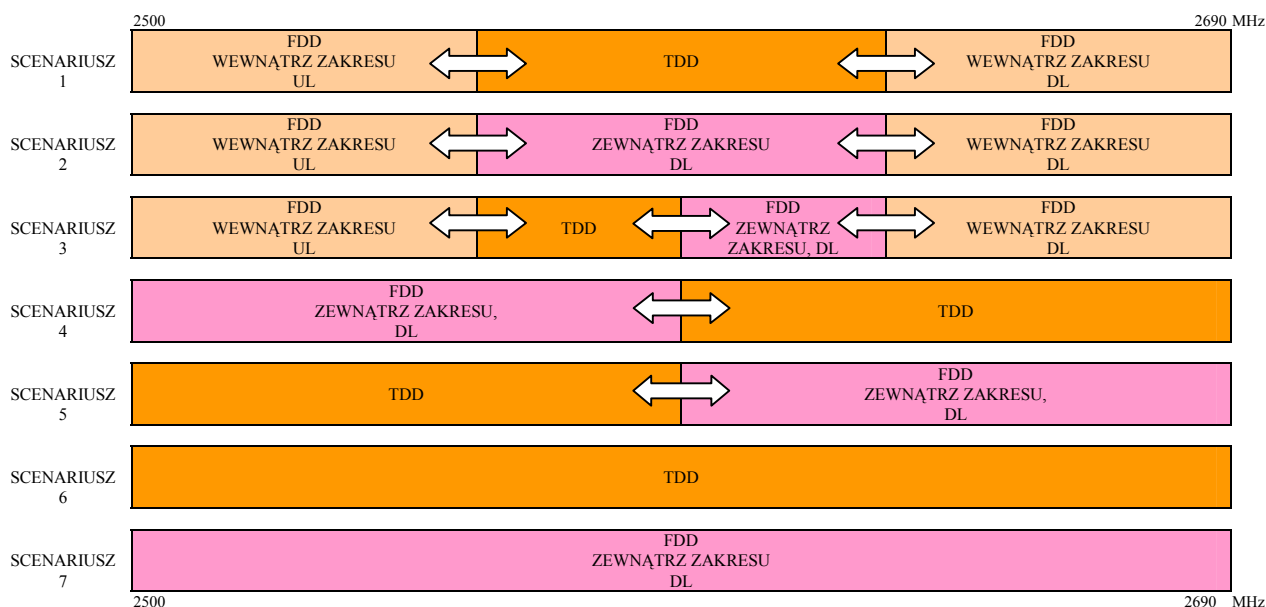
- działanie w trybie FDD zarówno „w górę” jak i „w dół” (z centralną luką częstotliwościową, która może być optymalnie wykorzystana dla potrzeb trybu TDD),
- niezależne działanie „w dół” w trybie FDD (które może być włączone do współpracy z dowolnym zakresem symetrycznym FDD, wziętym z pasma zasadniczego lub innego przeznaczonego dla systemów UMTS/IMT-2000),
- działanie w trybie TDD.

Rozmiary tych podzakresów nie zostały w dokumentach ITU sprecyzowane. ITU-R prezentuje 7 scenariuszy rozwiązań aranżacji zakresu rozszerzonego, w tym 3 scenariusze zwane podstawowymi. Przedstawione są one na rys. 4. Należy zwrócić uwagę na to, że w zaleceniu [14] nieustalone są rozmiary ewentualnej luki centralnej i odstepu dupleksowego dla trybu FDD. Wiadomo natomiast, że rozmiary zarówno luki jak i związanego z nią odstepu dupleksowego uzależnione będą w głównej mierze od maksimum nadawanej mocy, zarówno w łączach „w górę” jak i „w dół”, a także od poziomu izolacji pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem (budowy dupleksera, obwodów wejściowych odbiornika, czy filtrów na wyjściu nadajnika).

Aranżacja opisana w projekcie zmiany Zalecenia [14] opracowanym przez ITU-R WP8F, zakłada trzy możliwe scenariusze zwane C1, C2, i C3. Aranżacje C1 i C2 odpowiadają przy tym scenariuszom 1. i 2.

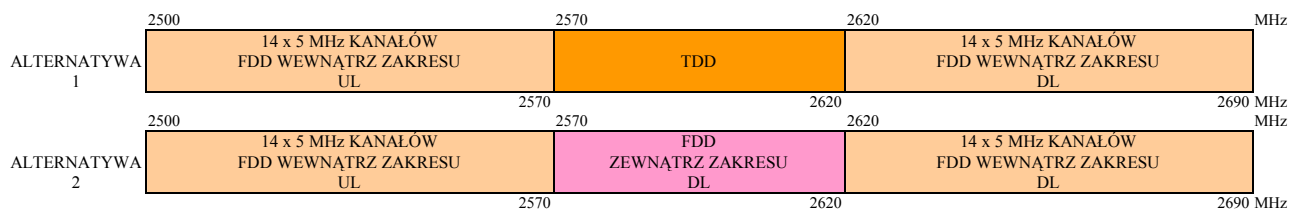
z rys. 4, natomiast aranżacja C3 pozwala na elastyczne wykorzystanie trybu FDD lub TDD w ramach całego zakresu rozszerzonego. Projekt ten jest szczegółowo konsultowany, gdyż rozwiązaniom takim sprzeciwiła się Liga Arabska.

Szczegółowy sposób wykorzystania i problemy rozmiarów poszczególnych podzakresów częstotliwości rozwiązano w podjętej w 2005 roku decyzji ECC o harmonizacji wykorzystania zakresu rozszerzonego przez segment naziemny UMTS/IMT-2000 [17]. Przyjęto w niej, że w zakresie rozszerzonym tryb FDD będzie mieć zastosowanie w zakresach symetrycznych 2500 – 2570 i 2620 – 2690 MHz, przy czym dla łącza „w górę” przeznaczony jest podzakres dolny a dla łącza „w górę” – podzakres górny. W decyzji tej określono dwa alternatywne rozwiązania, w których centralna luka o szerokości 50 MHz może być użyta albo dla potrzeb dupleksu TDD albo dla łącza „w dół” pracującego w trybie TDD. Ewentualne pasma ochronne w otoczeniu częstotliwości 2570 MHz i 2620 MHz, zapewniające kompatybilną pracę systemu, powinny być przy tym wydzielone z przestrzeni widmowej przeznaczonej na centralną lukę. Wielkość takich pasm ochronnych ustalona ma być indywidualnie przez administrację każdego z zainteresowanych krajów. Przewiduje się przydzielanie bloków (kanałów) częstotliwościowych o szerokości wielokrotności 5,0 MHz, przy czym wewnątrz zakresu rozszerzonego FDD odstęp dupleksowy ma wynosić 120 MHz.



Uwaga: Administracje mogą wykorzystać całe widmo lub jego część w wybranych przez siebie granicach

Rys. 4. Aranżacje częstotliwości w zakresie rozszerzonym dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według ITU-R



Uwaga: Każde z pasm ochronnych umieszczonych pomiędzy zakresami FDD/TDD i FDD Wewnętrz/Zewnętrz winno być wyłonię z zakresu 2570 – 2620 MHz i określone przez administrację krajową

Rys. 5. Aranżacje częstotliwości w zakresie rozszerzonym dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według CEPT

Oba powyższe warianty rozwiązania aranżacji kanałów częstotliwościowych w zakresie rozszerzonym przedstawione są na rys. 5.

Nadmienić należy, że rozwiązanie europejskie zgodne jest ze scenariuszami 1. i 2. opublikowanymi w zaleceniu ITU-R [14]. Problemy wykorzystania zakresu rozszerzonego w Europie prezentowane były Komisji Europejskiej przez CEPT w ramach dwóch sprawozdań [18, 19].

4.3. Inne zakresy częstotliwości

Podczas użytkowania przez systemy UMTS/IMT-2000 innych, przyznanych przez WRC-2000 dla potrzeb segmentu naziemnego IMT-2000 zakresów częstotliwości, ITU-R zaleca do wykorzystania dwie aranżacje w zakresie 824 – 960 MHz (oznaczane zwykle jako A1 i A2) oraz sześć aranżacji w zakresie 1710 – 2170 MHz (oznaczanych jako B1 – B6, przy czym B1, B2 i B3 uważane są aranżacje podstawowe) [14]. Aranżacja B1 jest przy tym identyczna jak przedsta-

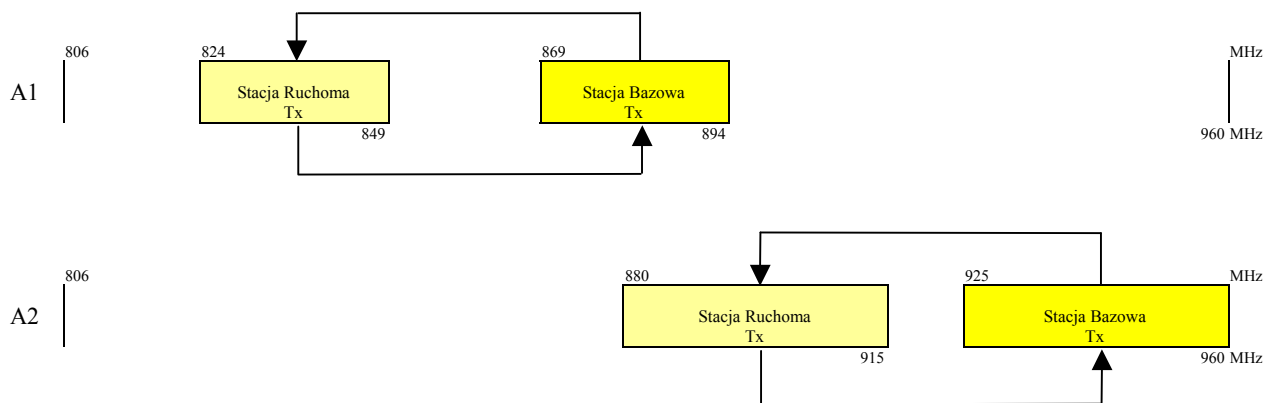
wiona powyżej dla zakresu zasadniczego, z dodatkowymi 5 MHz przeznaczonymi dla duplexu TDD poniżej dolnego skraju tego zakresu. Proponowane przez ITU-R aranżacje A1 i A2 przedstawione są w tablicy 1, natomiast aranżacje B1 – B6 w tablicy 2. Poszczególne aranżacje mogą być wykorzystywane bez jakichkolwiek zmian, zakłada się jednak, że poszczególne kraje mogą implementować również części tych aranżacji. Tryb TDD może być używany w podzakresach niesymetrycznych, czasem (pod pewnymi warunkami) również w podzakresach symetrycznych właściwych dla łącza „w górę” a także w obrębie luki centralnej (pomiędzy podzakresami używanymi dla łącza „w górę” i „w dół” właściwych dla trybu FDD), wyłączając zakres 2025 – 2110 MHz przeznaczony dla innych służb radiowych. Niestety, w odróżnieniu od zaleceń przygotowanych przez CEPT, nie szerokości bloków (kanałów) częstotliwościowych nie są tu określone, należy jednak przyjąć typowe wartości 5 MHz.

Tab. 1. Aranżacje częstotliwości w zakresie 824 – 960 MHz

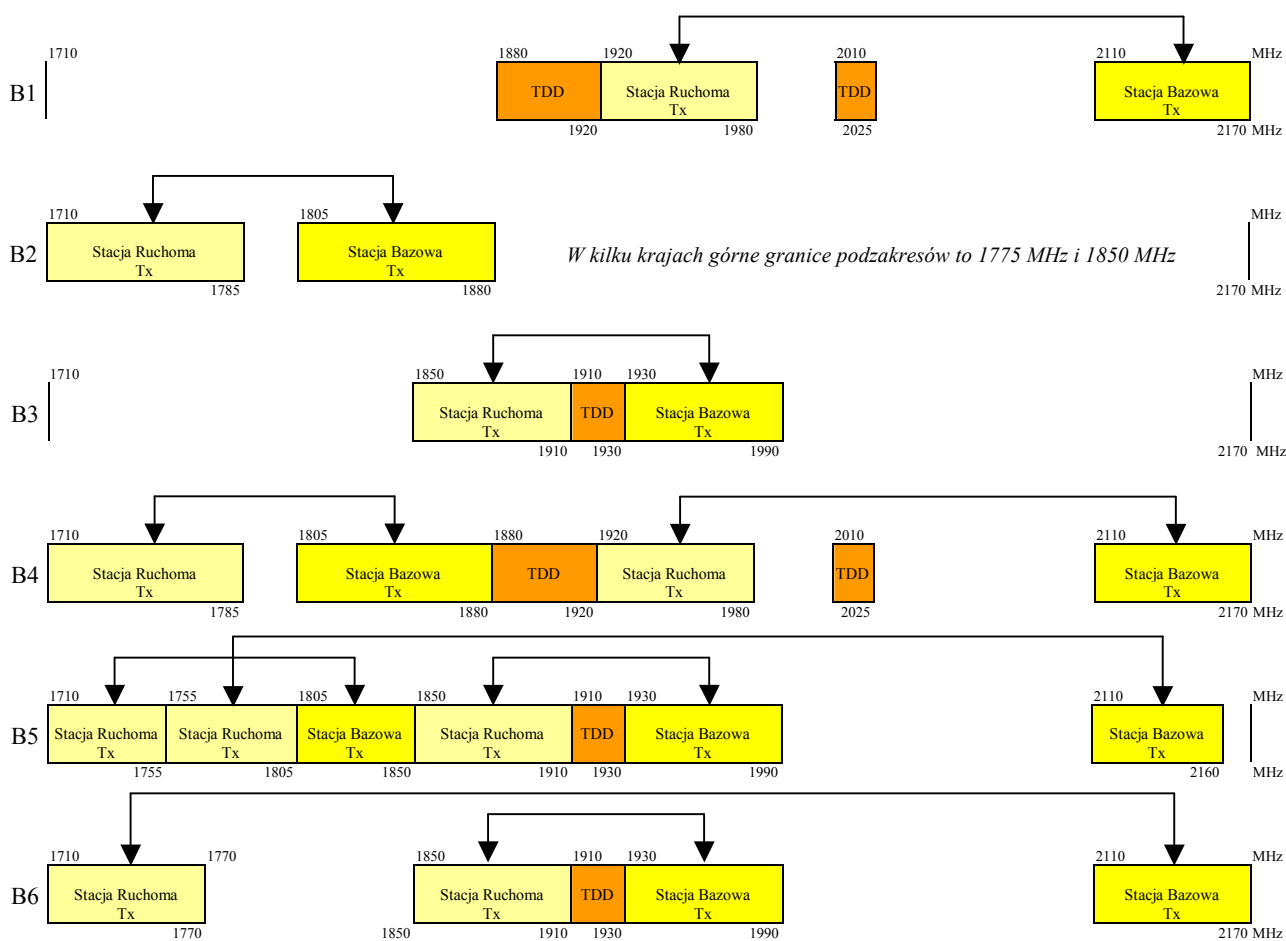
Oznaczenie aranżacji częstotliwościowej	FDD UL (MHz)	FDD DL (MHz)	Odstęp duplexowy (MHz)
A1	824-849	869-894	45
A2	880-915	925-960	45

Tab. 2. Aranżacje częstotliwości w zakresie 1710 – 2170 MHz

Oznaczenie aranżacji częstotliwościowej	FDD UL (MHz)	FDD DL (MHz)	Odstęp duplexowy (MHz)	Niesymetryczne widmo (np. dla TDD) (MHz)
B1	1 920-1 980	2 110-2 170	190	1 880-1 920, 2 010-2 025
B2	1 710-1 785	1 805-1 880	95	Brak
B3	1 850-1 910	1 930-1 990	80	1 910-1 930
B4 (zharmonizowana z B1 i B2)	1 710-1 785 1 920-1 980	1 805-1 880 2 110-2 170	95 190	1 900-1 920, 2 010-2 025
B5 (zharmonizowana z B3 i częściami B1 i B2)	1 850-1 910 1 710-1 755 1 755-1 805	1 930-1 990 1 805-1 850 2 110-2 160	80 95 355	1 910-1 930
B6 (zharmonizowana z B3 i częściami B1 i B2)	1 850-1 910 1 710-1 770	1 930-1 990 2 110-2 170	80 400	1 910-1 930



Rys. 6. Aranżacje częstotliwości w zakresie 824 – 960 MHz dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według ITU-R



Rys. 7. Aranżacje częstotliwości w zakresie 1710 – 2170 MHz dla segmentu naziemnego UMTS/IMT-2000 według ITU-R

Ilustracje tych aranżacji pokazane są na rys. 6 i 7.

Wiadomo jednak, że niektóre z przedstawianych wyżej aranżacji częstotliwości będą mogły być wykorzystane jedynie w dalszym horyzoncie czasowym,

ponieważ obejmują zakresy częstotliwości intensywnie wykorzystywane obecnie przez systemy radiokomunikacyjne 2. generacji.

5. ZAKOŃCZENIE

Od początku prac nad systemami 3. generacji ustaleniem niezbędnego rozmiaru widma oprócz organów odpowiedzialnych za nadzór nad widmem zainteresowani byli operatorzy systemów radiokomunikacyjnych. Operatorzy prowadzili również własne prace, by wysunąć stosowne żądania widmowe. Na kilka lat przed uruchomieniem pierwszych sieci systemu UMTS/IMT-2000 operatorzy i wytwórcy sprzętu skupieni UMTS Forum ogłosili wyniki badań nad zapotrzebowaniem na widmo. Badania te uwzględniały charakterystyki potencjalnego rynku tj. zakres usług, ruch telekomunikacyjny, gęstość i liczebność przyszłych użytkowników, przewidywały rozwój odpowiedniej infrastruktury i brały pod uwagę aspekty rozwoju techniki telekomunikacyjnej. W sprawozdaniu [20] UMTS Forum ogłosiło wyniki swoich badań zgłaszając zapotrzebowanie na widmo w latach 2005 i 2010.

Kolejna analiza dokonana przez UMTS Forum [21] dotyczyła wymagań na minimum widma koniecznego do zaspokojenia potrzeb publicznych operatorów UMTS w początkowej fazie rozwoju systemu. Rozpatrzono kilka scenariuszy zakładając różne rozmiary widma przydzielone jednemu operatorowi oraz biorąc pod uwagę m.in. maksymalne przepływności danych, oferowaną jakość, współczynniki asymetrii ruchu oraz wydajność widmową systemu. W wyniku przeprowadzonych rozważań, UMTS Forum zaleciło, jako preferowane minimum, przeznaczenie 2x15 MHz (w podzakresach symetrycznych) i 5 MHz (w podzakresach niesymetrycznych) widma dla potrzeb każdego operatora. Taki właśnie rozmiar widma został przydzielony każdemu z polskich operatorów po pierwszym przetargu przeprowadzonym w 2000 roku.

W sprawozdaniu [22] operatorzy skupieni w UMTS Forum określili, że do spełnienia ich długofalowego zapotrzebowania na widmo wystarczy przeznaczenie dodatkowych 187 MHz widma dla segmentu naziemnego, gdyż pozostałe zasoby widmowe pokryte będą przez wykorzystanie dotychczasowego widma przeznaczonego dla systemów 2. generacji. Żądania te zostały zaspokojone w 2000 roku, gdy konferencja WRC-2000 przyznała dla potrzeb UMTS-IMT-2000 dodatkowe zakresy częstotliwości (o rozmiarze 190 MHz widma w zakresie 2500 – 2690 MHz).

Jednak biorąc pod uwagę lepszą propagację fal radiowych w niższych zakresach częstotliwości (większe zasięgi, większe rozmiary komórek) operatorzy ogłosili niedawno, że istnieje potrzeba identyfikacji nowego zakresu częstotliwości dla systemu UMTS/IMT-2000. Zakres ten nazwany new Coverage Extension Band powinien być wydzielony w ramach tzw. dywidendy cyfrowej (czyli zysku częstotliwościowego powstałego w wyniku przejścia z nadawania analogowego na cyfrowe) z pasm przeznaczonych dla radiodifuzji i zharmonizowany w zakresie 470 – 600 MHz. Zapotrzebowanie w ramach nowego pasma częstotliwości sięga rozmiaru 2x30 MHz widma [23].

Na całym świecie obserwowany jest dalszy rozwój badań nad spełnieniem zapotrzebowania systemów

trzeciej i dalszych generacji na widmo elektromagnetyczne. Trwają intensywne próby przejścia zakresów o niższych niż dotychczas częstotliwościach (poniżej 470 MHz), aby wykorzystać bardziej korzystne warunki propagacji fal radiowych i uzyskać większe obszary pokrycia, co ma istotne znaczenie przy uruchamianiu nowych systemów na terenach o małej gęstości zaludnienia.

W tekście wykorzystane zostały rysunki zamieszczone przez autora w [24].

Autor składa podziękowanie pani Halinie Urydze (Orange France) za udostępnienie materiałów UMTS Forum.

LITERATURA

- [1] CCIR, Report 1153, *Future Public Land Mobile Telecommunications Systems*, Geneva 1990
- [2] ITU, World Radiocommunication Conference WRC-97 (Geneva, 1997), Resolution 212 (Rev. 97), *Implementation of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)*
- [3] ITU, ITU-R Recommendation M.1390, *Methodology for the Calculation of IMT-2000 Terrestrial Spectrum Requirements*
- [4] ITU, ITU-R Recommendation M.1391, *Methodology for the Calculation of IMT-2000 Satellite Spectrum Requirements*
- [5] ITU, ITU-R Report M.2023, *Spectrum Requirements for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)*
- [6] Grzybowski M. J., Uryga H., *Obliczenia widmowe dla systemu UMTS*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji Ruchomej KKRR'98, Poznań, str. 305-308
- [7] WINNER, IST-2003-507581, D 6.2, T. Irnich et al., *Methodology for estimating the spectrum requirements for "further developments of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000"*
- [8] ITU, ITU-R Radio Regulations, Geneva 2004
- [9] ERC, *ERC Decision of 30 June 1997 on the frequency bands for the introduction of the Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*, ERC/DEC/(97)07
- [10] ERC, *ERC Decision of 28 March 2000 extending ERC/DEC/(97)07 on the frequency bands for the introduction of terrestrial Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*, ERC/DEC/(00)01
- [11] ECC, ERC Report 25, *The European Table of Frequency Allocations and Utilisations Covering the Frequency Range 9 kHz to 275 GHz*, Lisboa January 2002 – Dublin 2003 – Turkey 2004 – Copenhagen 2004
- [12] ECC, *ECC Decision of 15 November 2002 on the designation of frequency band 2500 – 2690 MHz for UMTS/IMT-2000*, ECC/DEC/(02)06
- [13] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 29 czerwca 2005 r. w sprawie Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości, Dz.U. z dn. 21 lipca 2005r., Nr 134, poz.1127

- [14] ITU, ITU-R Recommendation M.1036, *Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) in the bands 806-960 MHz, 1 710-2 025 MHz, 2 110-2 200 MHz and 2 500-2 690 MHz*
- [15] ERC, *ERC Decision of 29 November 1999 on the harmonised utilisation of spectrum for terrestrial Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) operating within the bands 1900 - 1980 MHz, 2010 - 2025 MHz and 2110 - 2170 MHz*, ERC/DEC/(99)25
- [16] ECC, ECC Recommendation (02)10, *Harmonised Utilisation of Spectrum for 1.28 Mcps UTRA TDD Option in Connection with ERC/DEC/(99)25*
- [17] ECC, *ECC Decision of 18 March 2005 on harmonised utilisation of spectrum for IMT-2000/UMTS systems operating within the band 2500 – 2690 MHz*, ECC/DEC/(05)05
- [18] ECC, CEPT Report 001, Report from CEPT to the European Commission under Mandate 4, *Frequency Usage to Facilitate a Co-ordinated Implementation in the Community of Third Generation Mobile and Wireless Communication Systems Operating in Additional Frequency Bands as Identified by the WRC-2000 for IMT-2000 Systems*, 15 November 2002
- [19] ECC, CEPT Report 002, Report from CEPT to the European Commission on the 5th Mandate on IMT-2000/UMTS, *Harmonisation of the Frequency Usage within the Additional Frequency Band of 2500-2690 MHz to be Made Available for IMT-2000/UMTS Systems in Europe*, 12 November 2004
- [20] UMTS Forum, Report No 1, *A Regulatory Framework for UMTS*, 1997
- [21] UMTS Forum, Report No 5, *Minimum spectrum demand per public terrestrial UMTS operator in the initial phase*, 1998
- [22] UMTS Forum, Report No 6, *UMTS/IMT-2000 Spectrum*, 1998
- [23] UMTS Forum, Report No 38, *Coverage Extension Bands for UMTS/IMT-2000 in the bands between 470-600 MHz*, 2005
- [24] M. Nawrocki (ed.), et al., *Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation: Theory and Practice*, Wiley & Sons, 2006, w druku.

Warszawa, 25.10. 2006 r.

"Radiowe sieci lokalne WLAN (Wi-Fi) – projektowanie, optymalizacja, testowanie"

Zakład Systemów Radiowych, Z-1,

- mgr inż. Aleksander Orłowski

e-mail: A.Orlowski@itl.waw.pl

- inż. Krzysztof Kaczan

e-mail: K.Kaczan@itl.waw.pl



INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

1

Plan prezentacji

1. Charakterystyki WLAN – standardy z serii IEEE 802.11
 - wykorzystanie kanałów radiowych i wielodostęp
 - architektura sieci
2. Wymagania obowiązujące w Polsce
 - wykorzystanie pasm częstotliwości 2,4 GHz i 5 GHz
 - dołączanie anten zewnętrznych
3. Projektowanie łącza radiowego WLAN
 - bilans łącza radiowego
 - pojemność sieci
 - wybór standardu
 - rozpoznanie miejsca instalacji
 - zasięg na zewnątrz i wewnątrz pomieszczeń
4. Programy wspomagające planowanie i utrzymanie sieci WLAN
 - obliczania zasięgu i testowanie pokrycia
 - zarządzanie siecią

Wprowadzenie (I)

Określenie – "radiowe / bezprzewodowe sieci lokalne"

- **Radio** Local Area Networks, **RLAN**
(ITU-R, CEPT / ERO, ECC i ETSI) – jednoznaczne
- **Wireless** Local Area Networks, **WLAN**
(IEEE 802.11x, Wi-Fi Alliance) – **radu**żywane

WLAN (RLAN) są podklasą radiowych sieci dostępowych (*Wireless Access Systems, WAS*) o zasięgu od 10 m do ok. 100 m, użytkowanie:

- stacjonarne (*Fixed Wireless Access, FWA*)
- nomadyczne (*Nomadic Wireless Access, NWA*)
- ruchome (*Mobile Wireless Access, MWA*)
Mobilność terminala WLAN ograniczona do zasięgu pojedynczego (AP) lub kilku AP.

WPAN: do 10 m (Bluetooth, Zigbee, IEEE 802.15x, ...)

WMAN: (WiMAX, IEEE 802.16x,)

Wprowadzenie (II)

- **IEEE LAN/MAN Standards Committee. IEEE 802.11**
Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications
- **Przyczyny popularności RLAN:**
 - wyjątkowo korzystny stosunek oferowanej szerokości pasma do kosztów sprzętu i eksploatacji sieci oraz powszechna dostępność kanałów radiowych;
 - standard wyposażenia przenośnych PC (laptop) i w wielu PDA;
 - rozszerzenie lub alternatywa dla kablowych LAN;
 - radiowe łączy punkt-punkt pomiędzy kilkoma siedzibami firmy;
 - najtańsza forma radiowej sieci dostępu do Internetu;
 - "hotspot", dostęp do Internetu;
 - i inne zastosowania

Rozwój WLAN na świecie

- Systemy firmowe, inne standardy (Home-RF, DECT)
- Pierwsza, podstawowa wersja IEEE 802.11 (1997):
 - szybkość transmisji: 1 Mbit/s lub 2 Mbit/s,
 - radio FH-SS, lub DS-SS, pasmo 2,4 GHz, były wdrożenia, problemy z kompatybilnością powodem powołania Wi-Fi Alliance (certyfikacja interoperacyjności),
 - podczerwień (IR) – nigdy nie wdrożono,
 - wprowadzono protokół wielodostępu CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) używany we wszystkich późniejszych normach z tej serii,
 - wprowadzono szyfrowanie WEP (Wired Equivalent Privacy) z algorytmem RC4, problemy!

5

Model OSI w sieciach radiowych

Warstwa 3: Warstwa sieci (**NTWK**) obejmująca funkcje sterowania połączeniem, zarządzania mobilnością i zarządzania zasobami radiowymi

Warstwa 2: Warstwa sterowania dostępem do łącza (**LAC**)
Warstwa dostępu do medium (**MAC**)

Warstwa 1: Warstwa fizyczna (**PHY**) - w systemie radiowym wersje PHY i MAC zależą od rodzaju transmisji radiowej

Specyfikacje IEEE 802.11... i IEEE 802.16... ,
definiują tylko dwie dolne warstwy modelu OSI!

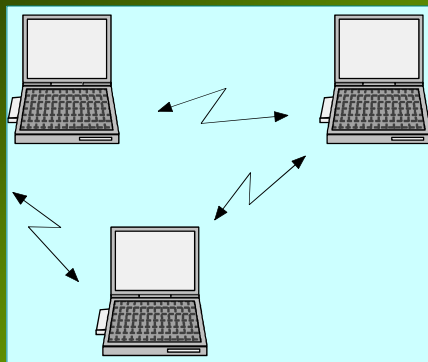
6

Standardy z serii IEEE 802.11 (I)

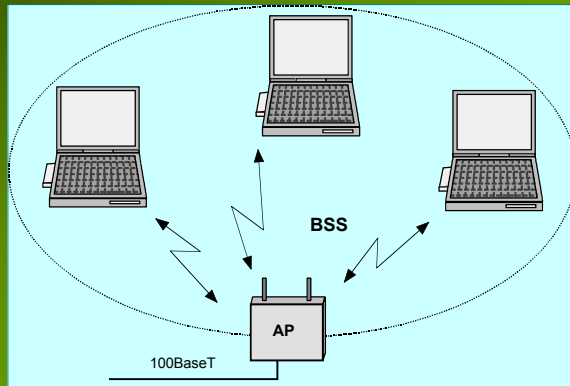
Wybrane standardy z serii IEEE 802.11

802.11 – oryginał (1997) transmisja radiowa w paśmie 2,4 GHz, FH-SS i DS-SS, lub na podczerwieni (IR)
+ suplementy (rozszerzenia funkcjonalności wersji z1997):

- 802.11b – (1999) do 11 Mbit/s w paśmie 2,4 GHz
- 802.11a – (1999) do 54 Mbit/s w paśmie 5 GHz
- 802.11e – (2005) QoS
- 802.11g – (2003) do 54 Mbit/s w paśmie 2,4 GHz
- 802.11h – (2004) "europejska" wersja 802.11a
- 802.11i – (2004) wzmocnione bezpieczeństwo
- 802.11n – (draft 2007) ponad 200 Mbit/s, MIMO
- 802.11s – sieci kratowe (w opracowaniu 2008)
- i inne opublikowane lub w trakcie opracowania

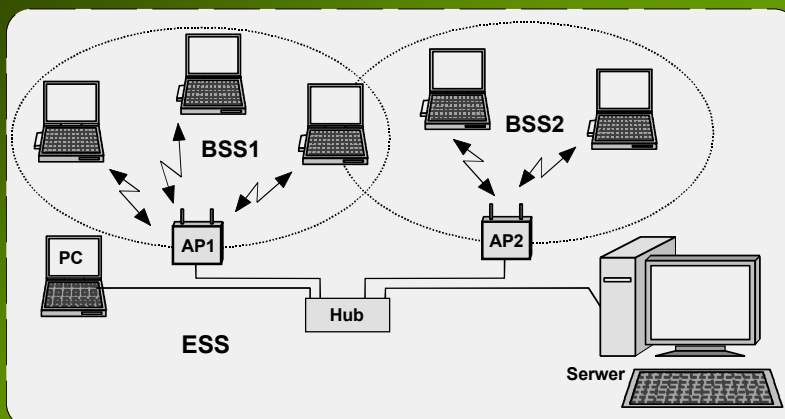


Sieć ad-hoc (każde urządzenie może komunikować się z innym kompatybilnym urządzeniem, które jest w jego zasięgu)



Sieć z infrastrukturą (stacjonarny punkt dostępowy),
w specyfikacji 802.11 BSS (Basic Service Set),

9



Sieć z infrastrukturą składającą się z wielu AP
(Extended Service Set, ESS)

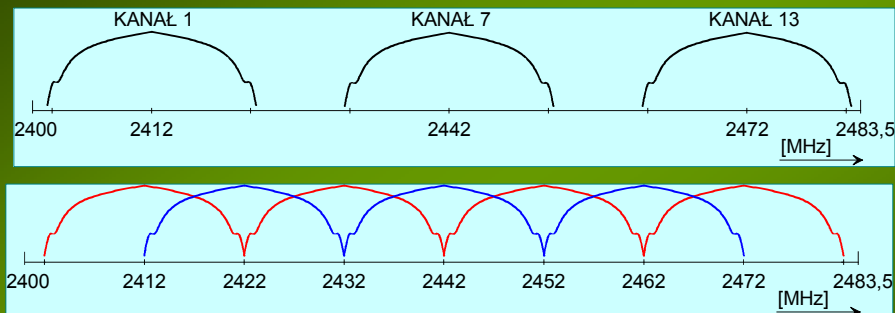
10

IEEE 802.11b (1999)

- kompatybilność "wstecz" z wersją 802.11
- maksym. szybkość transmisji 11 Mbit/s, ze względu na nadmiar związany z protokołem CSMA/CA praktycznie maksym. 5,9 Mbit/s przy TCP i 7,1 Mbit/s przy UDP
- zależnie od warunków szybkość spada do 5,5 Mbit/s, 2 Mbit/s, a na granicy zasięgu do 1 Mbit/s
- zajmuje kanał radiowy o szerokości 22 MHz
- od kilku lat podstawowy standard WLAN, przyczyny:
 - szybkości transmisji znacznie większe niż 802.11
 - dostępność pasma 2,4 GHz
 - wielu producentów, szybki spadek cen urządzeń
- są firmowe "usprawnienia" tzw. 802.11b+ o szybkościach 22, 33 i 44 Mbit/s uzyskiwanych np. metodą wykorzystywania pasma dwóch kanałów radiowych

11

IEEE 802.11b wykorzystanie kanałów RF



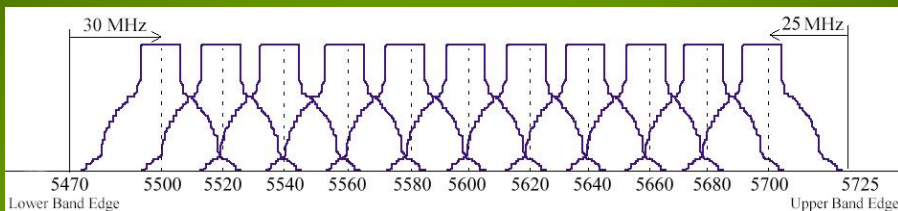
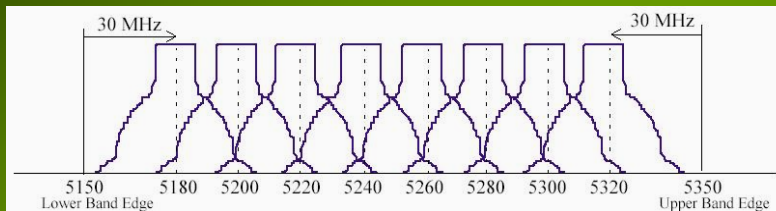
- **3 kanały niezachodzące na siebie (± 11 MHz / -30 dB):**
 - w USA zalecane: 1, 6, 11,
 - w Europie i w Polsce: 1, 7, 13 (por. rysunek u góry),
- 7 kanałów zachodzące na siebie (por. rysunek niżej),
- pasmo 2,4 GHz jest pasmem ISM, wiele zastosowań!

IEEE 802.11a (1999)

- niekompatybilny z wersją 802.11 i 802.11b
- wdrożony później niż wersja 802.11b
problemy producentów z implementacją (technologia),
problemy z użyciem częstotliwości w paśmie 5 GHz,
w Europie dodatkowo DFS, TPC nie ujęte w spec. IEEE
- wersja europejska IEEE 802.11h
- podobieństwo do spec. ETSI HiperLAN (brak urządzeń)
- maksym. szybkość transmisji 54 Mbit/s, realnie ok. 20 Mbit/s, zależnie od warunków maks. szybkość spada do 6 Mbit/s
- OFDM, modulacja 64-QAM, 16-QAM, QPSK, BPSK, sygnał RF zajmuje kanał radiowy o szerokości ~20 MHz
- podzakresy 5,15-5,35 GHz i 5,47- 5,725 GHz,
- mniejszy poziom zakłóceń niż w p. 2,4 GHz (zaleta),
ale większe tłumienie fali (wada)

13

IEEE 802.11a wykorzystanie kanałów RF



- do dyspozycji 8 + 11 kan., ale mogą być ograniczenia stosowania (dolne pasmo tylko w pomieszczeniach)

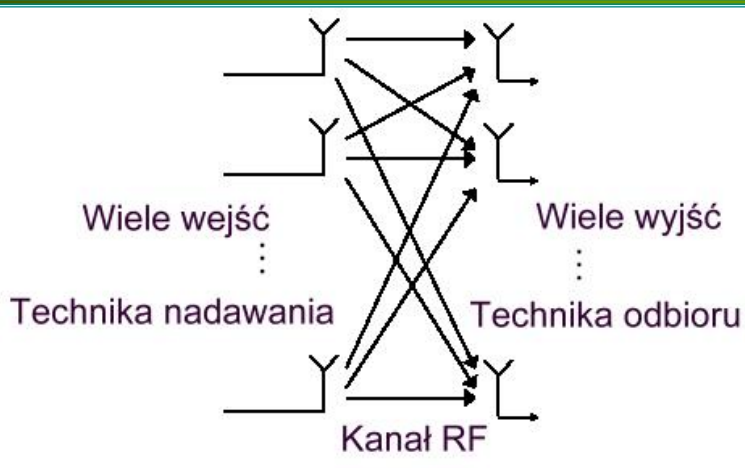
IEEE 802.11g (2003)

- pasmo RF 2,4 GHz – tak jak 802.11b
- modulacja OFDM – tak jak 802.11a (54 Mbit/s 6 Mbit/s)
- możliwość pracy w trybie zgodnym z 802.11b (11 Mbit/s 1 Mbit/s), ale wtedy mniejsza wydajność dla trybu 802.11g
- dostępne produkty "dual band" 802.11b/g i 802.11a

IEEE 802.11n (projekt 2006)

- pasmo RF 2,4 GHz lub 5 GHz
- typowa szybkość 200 Mbit/s
- maksymalna do 540 Mbit/s
- wprowadzono MIMO (multiple-input multiple-output)

Kierunki rozwoju (802.11n) => MIMO



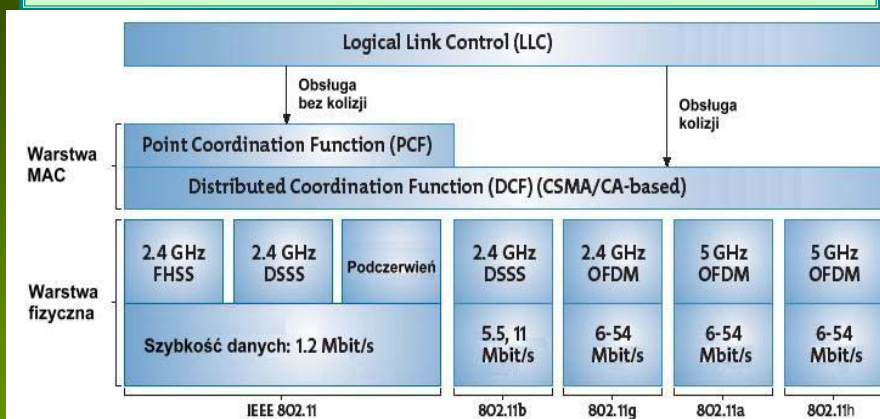
Standardy z serii IEEE 802.11 (II)

Charakterystyki warstwy fizycznej WLAN IEEE 802.11x

Wersja	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n (draft)
Data przyjęcia	1997	1999	1999	2003	2006
Rozproszenie widma	FHSS; DSSS	DSSS; (CCK)	OFDM	OFDM; DSSS	OFDM
Pasmo częstotliwości [GHz]	2,4	2,4	5	2,4	2,4 lub 5
Liczba kanałów Uwaga 1.	3	3	8 + 11 Uwaga 2.	3	(MIMO)
Szybkość w warstwie fizycznej [Mbit/s]	1; 2	1; 2; 5,5; 11	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54	OFDM jak 802.11a; DSSS jak 802.11b	200 do 540

- Uwagi. 1. W wersji europejskiej (ETSI). Kanały niezachodzące na siebie.
 2. 8 kanałów w zakresie częstotliwości 5150 ÷ 5350 MHz oraz 11 kanałów w zakresie częstotliwości 5470 ÷ 5725 MHz.
 3. W Europie dynamiczny wybór częstotliwości (DFS) i redukcja mocy nadajnika (TPC).

Warstwy PHY i MAC w normach serii 802.11x



Protokół CSMA/CA zajmuje znaczny procent pojemności kanału radiowego

IEEE 802.11i (2004)

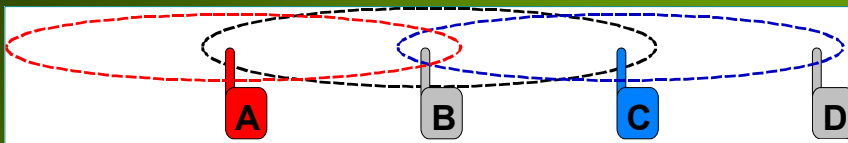
- bezpieczeństwo sieciach WLAN zgodnych z 802.11x
 - w 2001 ujawniono słabości 802.11 Wired Equivalent Privacy (WEP) z algorytmem RC4
 - skutek = nieautoryzowany dostęp do sieci
 - reakcja Wi-Fi Alliance, zamiast RC4 opracowano Wi-Fi Protected Access (WPA) w produktach od 2003
 - reakcja IEEE suplement 802.11i (2004), nazywany też WPA2, zamiast RC4 opcja z zastosowaniem Advanced Encryption Standard (AES)
- obserwacje wskazują, że w wielu sieciach sprzęt jest instalowany z domniemanymi parametrami ID i bez jakiegokolwiek zabezpieczenia (nawet WEP)

19

Protokół CSMA/CA

- stacje radiowe monitorują przydzielony kanał radiowy (medium) i podejmują próbę nadawania tylko wtedy, gdy kanał ten wydaje się wolny. Brak potwierdzenia odbioru pakietu stanowi informację, że nastąpiła kolizja z transmisją innej stacji,
- przykłady problemów ("ukryty węzeł") – następny slajd
- opcja z wymianą sygnałów RTS/CTS
 - "A" wysyła krótką wiadomość sygnalizującą gotowość do nadawania RTS (Ready To Send), a "B" do którego wiadomość jest adresowana odpowiada komunikatem CTS (Clear To Send),
 - ma sens, gdy dużo urządzeń i długie sesje transmisji, inaczej strata czasu na wymianę sygnałów RTS/CTS nieoptymalna

20



- **Problem ukrytego węzła (hidden node)**

A nadaje do B,

C nie może odbierać A (A jest "ukryty" dla C)

C chce nadawać do B, C uznaje że kanał jest wolny

Skutek: kolizja w B, utrata informacji wysłanej z A

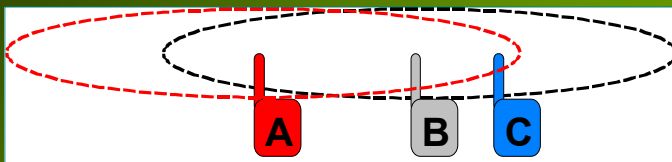
- **Problem oświetlonego węzła (exposed node)**

B nadaje do A, ale "oświetla" również C

C chce nadawać do D lecz stwierdza, że kanał jest zajęty i czeka, ale A jest poza zasięgiem C, oczekiwanie nie jest konieczne

Skutek: opóźnienia transmisji

21



- **Efekt bliskiego i odległego terminala (near-far effect)**

A i B nadają ze zbliżoną mocą do C,

ale A jest odległy a B jest znacznie bliżej

w C sygnał B >> sygnał A

C nie odbierze A (dyskryminacja w warstwie PHY)

Np. jeżeli C przydzieli prawo nadawania w sieci, to czynny nadajnik B wykluczy odbiór nadajnika A

22

Część II

Pan inż. Krzysztof Kaczan

Oprogramowanie wspomagające
projektowanie, badanie i utrzymanie sieci WLAN

Oprogramowanie wspomagające projektowanie, badanie i utrzymanie sieci WLAN

- projektowanie sieci Wi-Fi
- testowanie pokrycia
- zarządzanie i monitorowanie
- prezentacja oprogramowania

Sposoby podejść do problemu projektowania sieci WLAN

- neglect
- flooding
- rule of thumb
- computerized planning

Zalety projektowania wspomaganego komputerowo

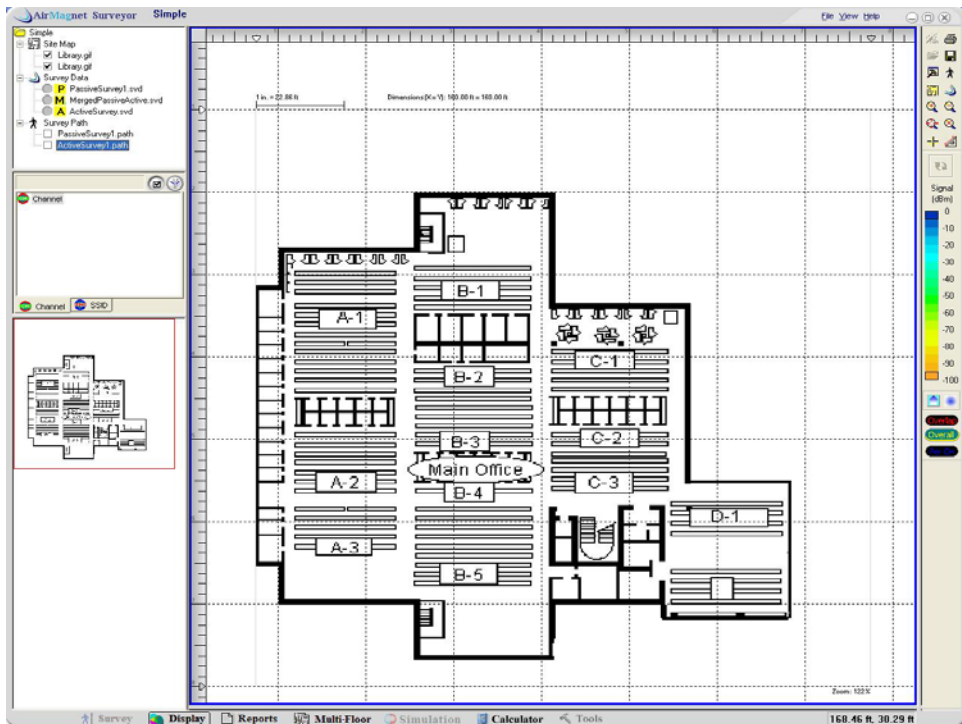
- eliminacja metody prób i błędów
- wizualizacja podstawowych parametrów sieci (poziom sygnału, dostępna przepływność i inne) oraz wpływu zmian lokalizacji punktów dostępowych, rodzaju anten i poziomu mocy promieniowanej na te parametry
- oszczędność czasu i pieniędzy
- satysfakcja użytkowników

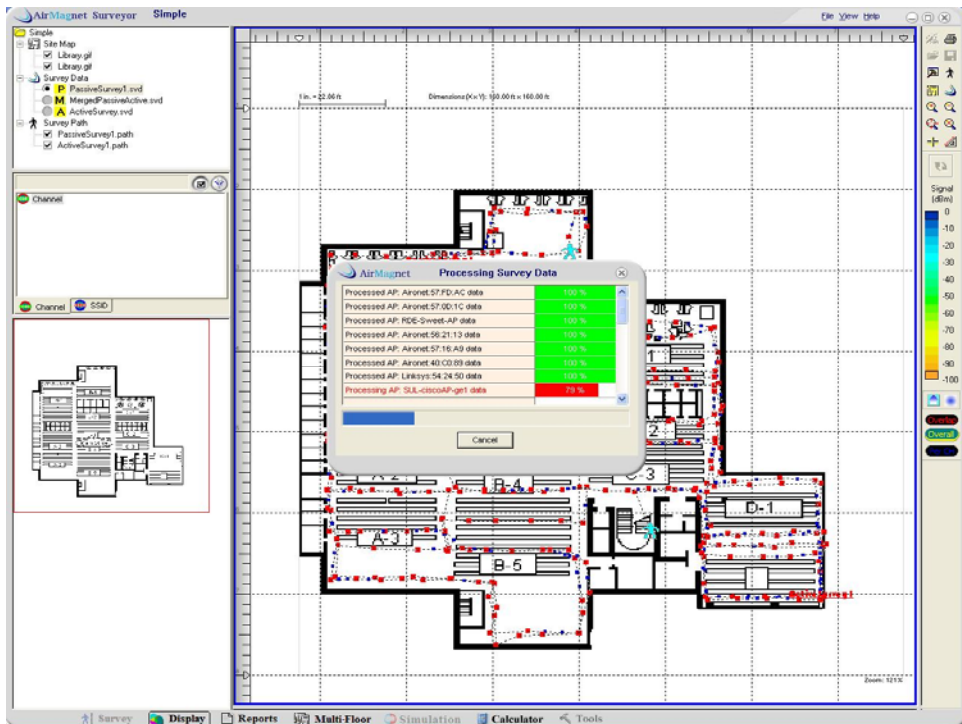
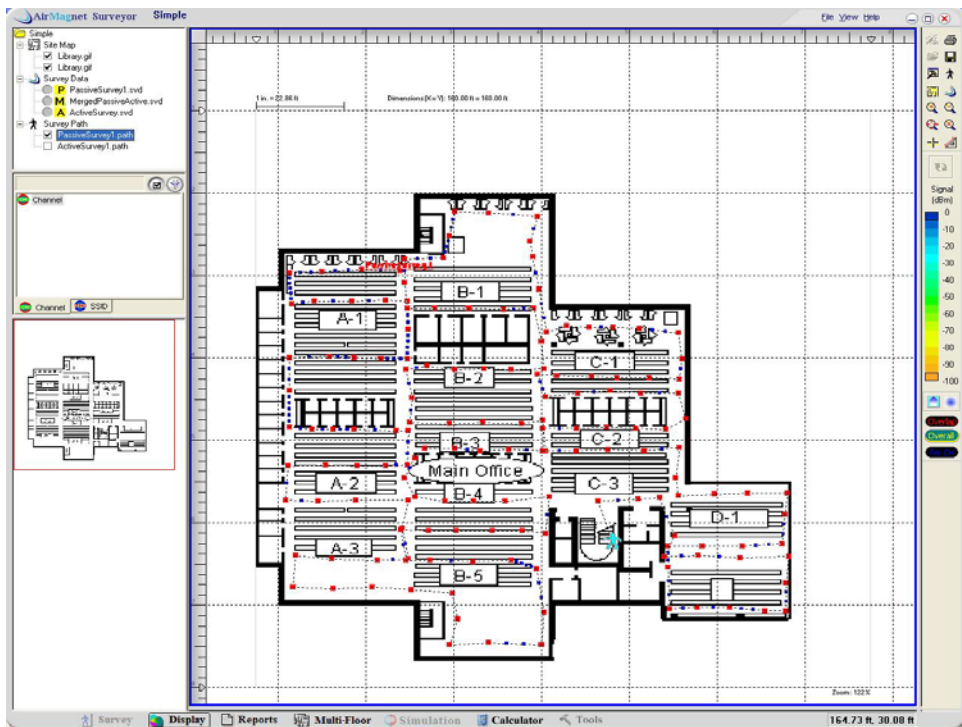
Wykorzystanie oprogramowania podczas projektowania sieci WLAN

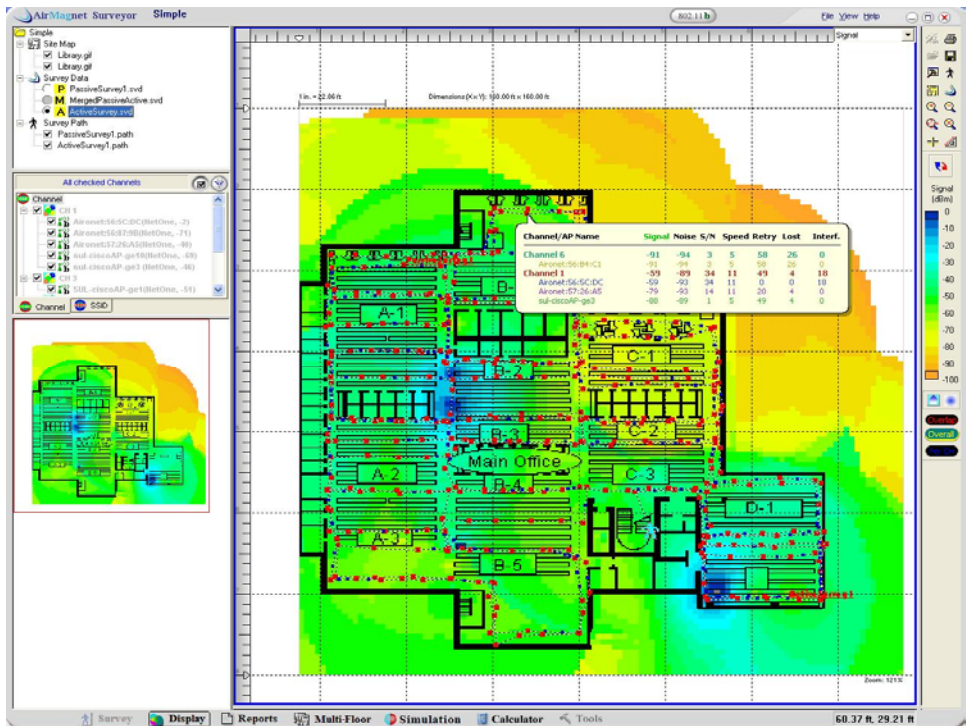
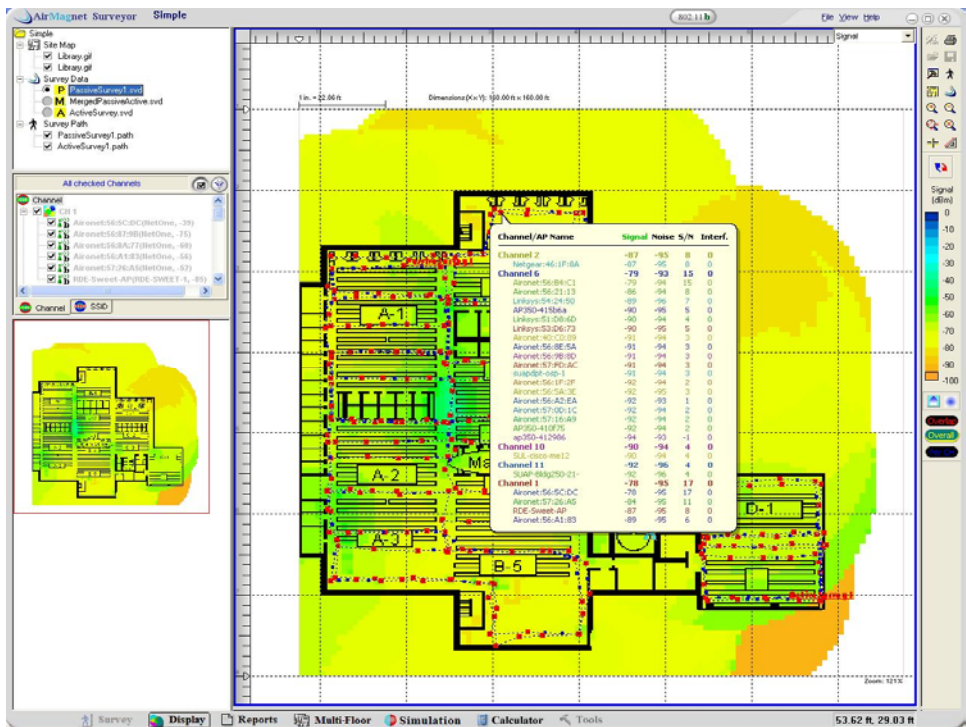
- wczytanie cyfrowej mapy (planu) pomieszczeń, zdefiniowanie skali oraz umiejscowienie przeszkód ograniczających propagację fal radiowych
- umieszczenie, konfiguracja wirtualnych punktów dostępowych
- symulacja parametrów projektowanej sieci
- optymalizacja zasięgu i wydajności

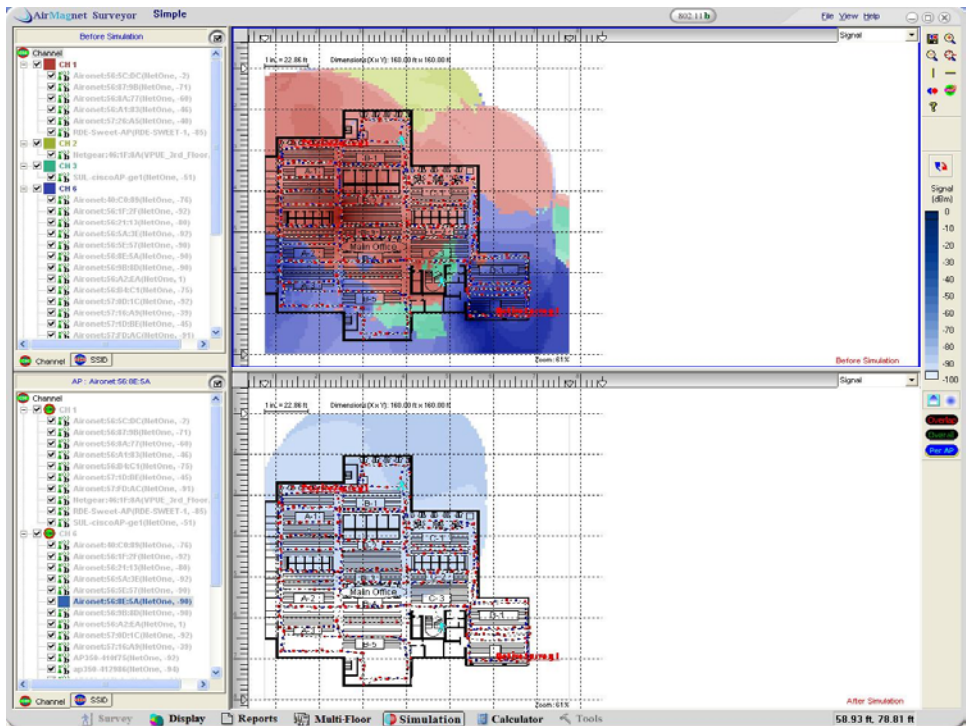
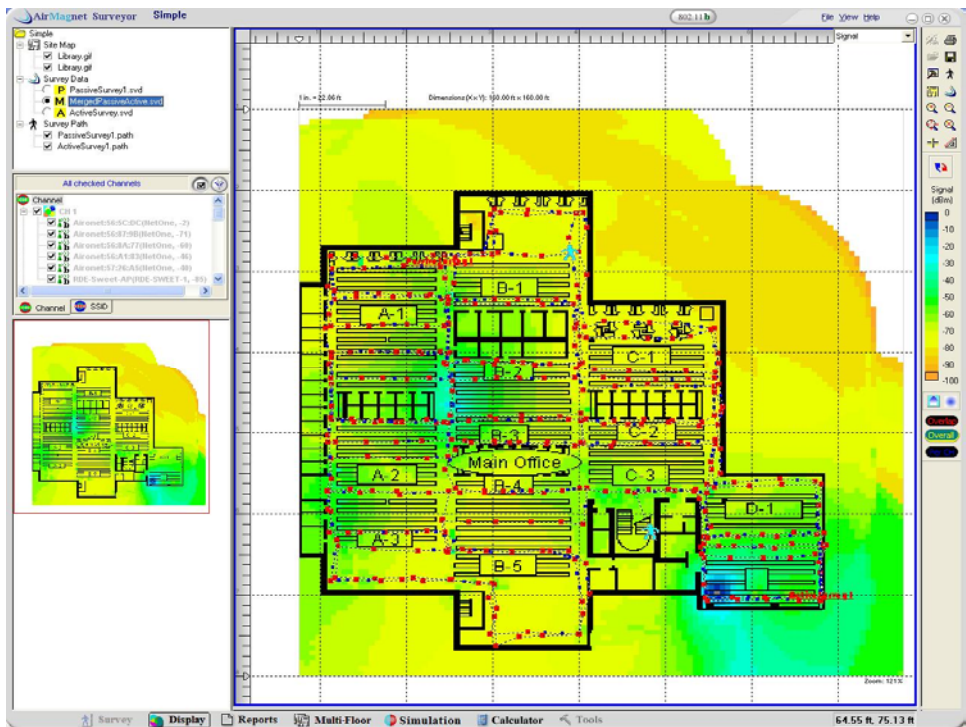
Testowanie pokrycia

- zbieranie danych
 - skanowanie pasywne
 - skanowanie aktywne
 - łączenie wyników
- wizualizacja danych
 - statystyki (RSSI, S/N, prędkość transmisji itp.)
 - analiza danych (w oparciu o SSID i kanały)
 - symulacje (zmiana lokalizacji, mocy, kanału)



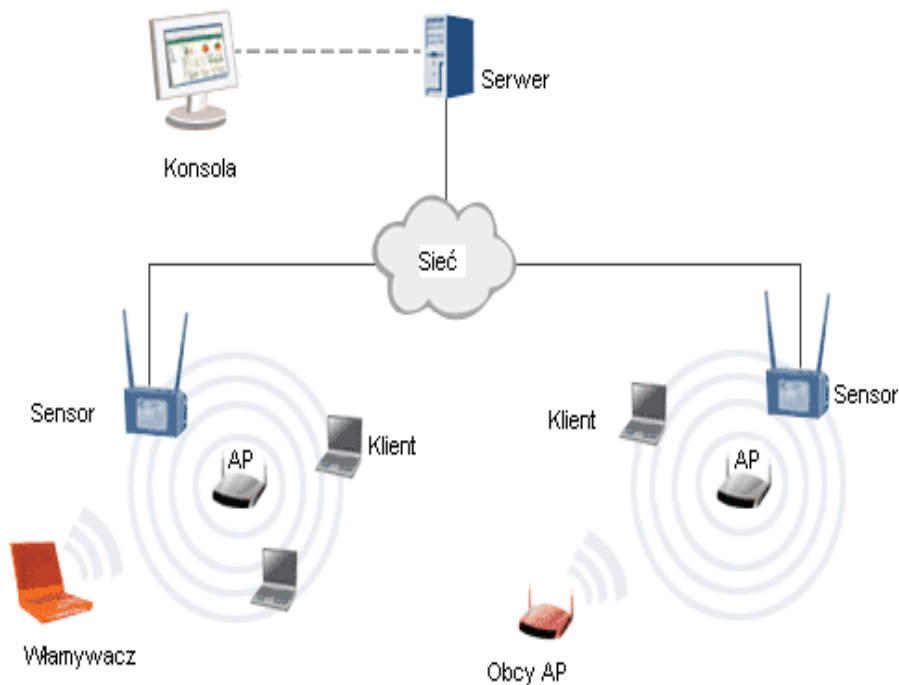






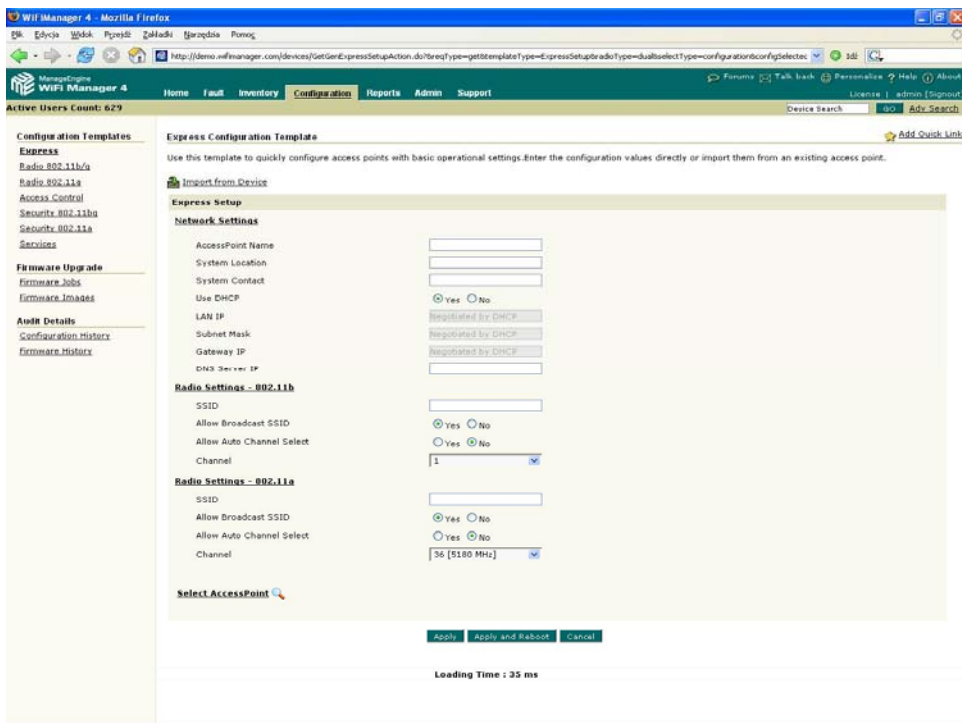
Zarządzanie i monitorowanie

- architektura sieci
 - serwer (gromadzenie i przetwarzanie informacji)
 - czujniki sprzętowe (zbieranie informacji o sieci)
 - konsola zarządzająca (interfejs użytkownika – wizualizacja zdarzeń, definiowanie reguł, konfiguracja urządzeń)



Możliwości systemu zarządzania siecią

- dodawanie, usuwanie i konfiguracja urządzeń
- aktualizacja oprogramowania punktów dostępowych
- sprawdzanie dostępności urządzeń przewodowych i radiowych
- monitorowanie podstawowych parametrów sieci
- wykrywanie i blokowanie ataków
- tworzenie przejrzystych raportów



Prezentacja oprogramowania

- projektowanie sieci
- testowanie pokrycia

Dziękuję za uwagę

Krzysztof Kaczan
kkaczan@itl.waw.pl

Forum TETRA Polska

II spotkanie, 28 listopada 2006 r.

Standard TETRA

– stan aktualny i kierunki rozwoju

mgr inż. Aleksander Orłowski

e-mail: A.Orlowski@itl.waw.pl



INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

1

TETRA = *Terrestrial Trunked Radio*

- projekt prowadzony przez ETSI
- pierwotna nazwa *Trans European Trunked Radio*
- cele:
 - zdefiniowanie europejskiego standardu cyfrowego systemu trunkingowego dla sieci PMR / PAMR
 - sieci dyspozytorskie (głos – dyspozytor \Leftrightarrow grupa), zbiorowe (grupy wirtualne, możliwe współdziałanie)
 - wg wymagań użytkowników, usługi V+D, w tym głównie służb bezpieczeństwa i ratownictwa (specjalne środki ochrony dostępu i komunikacji)
 - harmonizacja wymagań = scalenie rynku w jednym systemie (zamiast firmowych), oferowanym przez wielu dostawców, interoperacyjność produktów
 - efektywne wykorzystanie widma RF



Specyfikacje ETSI:
<http://www.etsi.org/>

ETSI TETRA

- system trunkingowy = przydział kanału na żądanie
 - sieci dyspozytorskiej (komunikacja grupowa: dyspozytor <=> użytkownicy stacji ruchomych),
 - sieci zbiorowe w wydzieleniu wirtualnych (VPN) np. dla różnych służb komunalnych, możliwe grupy wspólne (współdziałania)
- standaryzacja systemu TETRA V+D (interfejs radiowy):
 - tryb trunkingowy – z infrastrukturą (TMO),
 - tryb bezpośredni – bez infrastruktury (DMO),
 - optymalizowany do transmisji danych (PDO),
 - brak zainteresowania przemysłu

3

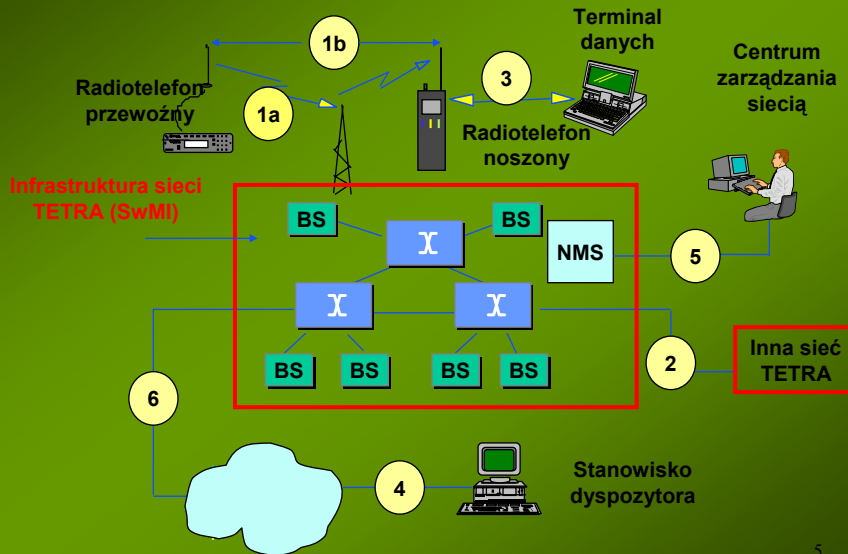
TETRA – architektura sieci

⇒ jednostki funkcjonalne systemu TETRA:

- stacje bazowe + stacje ruchome + **standardowy interfejs radiowy (AI)** – TMO (warstwa fizyczna i protokół trunkingowy)
 - węzeł (węzły) sterujący sieci
 - stanowiska dyspozytorskie
 - łącza (transmisja)
 - system zarządzania siecią (NMS)
 - bramy do innych sieci (PSTN/ISDN, PABX, resortowe ...)
- podstawowa infrastruktura sieci TETRA**
-
- opcje: system rejestracji rozmów, bramka SMS i in.
 - aplikacje (dyspozytorskie - zarządzanie grupami, AVL, dostęp do baz danych, GIS)

4

TETRA – architektura sieci



5

Standard TETRA V+D

⇒ Standardowe interfejsy systemu TETRA:

- 1) **AI** (*Air Interface*) interfejs radiowy sieci TETRA (trankingowy TMO / bezpośredni DMO)
- 2) **PEI** (*Peripheral Equipment Interface*) interfejs pomiędzy radiotelefonem TETRA, a urządzeniem końcowym transmisji danych, np. laptop PC, PDA
- 3) **ISI** (*Inter System Interface*) interfejs między sieciami
- 4) Gateways (PABX, PSTN)

Inne interfejsy ostatecznie nie zostały zdefiniowane.

Wniosek. W zasadzie interoperacyjność urządzeń TETRA dotyczy interfejsu radiowego (styku stacji bazowych z radiotelefonami) oraz PEI (styku radiotelefonu z PC) oraz ISI

6

TETRA MoU Association



⇒ Cele TETRA MoU Association:

- promocja standardu TETRA (informacje, prezentacje, konferencje itp.)
- opracowanie:
 - wymagań "TETRA Interoperability Profile (TIP)",
 - programów badań interoperacyjności "IOP test plans"
- testowanie interoperacyjności wg IOP MS \Leftrightarrow infrastruktura różnych producentów, w autoryzowanym laboratorium ISCOM w Rzymie, (Italian Ministry of Communications)

Uwaga. Testy protokołów warstw drugiej, trzeciej i wyższych (zatem niezależne od częstotliwości)

- certyfikacja interoperacyjności: (TETRA Interoperability Certificate)

TETRA – rynek wielu dostawców

⇒ **Producenci infrastruktury:**

- EADS (d. NOKIA)
- Motorola
- SELEX Communications (d. OTE)
- Teltronic
- Rohde & Schwarz
- Siemens
- Rohill

⇒ **Rozwiązania "klasyczne" lub oparte o IP**

⇒ **Producenci radiotelefonów:**

- EADS, Motorola, SELEX, Sepura, Cleartone, Niros, Teltronic, in. – wg informacji na TWC 2005
 - ponad 40 modeli na rynku w ciągu trzech lat,
 - ostatnio też radiowe moduły OEM dla własnych aplikacji



TETRA MoU Association

<http://www.tetramou.com/>

Członkowie:

130 organizacji z 30 krajów
w tym: National Institute of
Telecommunications

TETRA (grudzień 2005):
788 kontraktów w 77 krajach

Firmy, które uzyskały
certyfikaty TETRA MOU
(status: 22.09.2006):

- 3T Communications
- Artevea Digital
- Cleartone Telecoms
- EADS Secure Networks
- Motorola
- Rohde & Schwarz
BICK Mobilfunk
- Rohill Technologies
- Selex Communications (OTE)
- Sepura
- Teltronic
- Thales
- Unimo Technology

TETRA V+D – interfejs radiowy TMO

- efektywne wykorzystania widma kanału radiowego
– pasmo 25 kHz / 4 kanały fizyczne (szczeliny
czasowe) przydzielane na żądanie – "tranking"
- przesyłanie głosu (kanał 7,2 kbit/s)
=> cztery rozmowy / kanał radiowy,
lub kombinacja przesyłanie danych i rozmów)
- w każdej BS jedna szczelina jako kanał BCCH
- przesyłanie danych (netto) w trybie CS:

Liczba szczelin czasowych:	1	2	3	4
Bez zabezpieczenia	7.2	14.4	21.6	28.8
Słabe zabezpieczenie	4.8	9.6	14.4	19.2
Silne zabezpieczenie	2.4	4.8	7.2	9.6

- SDS: w kanale sterującym (BCCH)

TETRA V+D – transmisja danych

- dedykowane szczeliny (PDCH):
 - wada: niewykorzystane zasoby BS (przeczy idei "trankingu"),
 - zaleta: małe opóźnienie, lepsze wskaźniki QoS
- przydział dynamiczny:
 - zaleta: optymalne wykorzystanie (tranking),
 - wada: opóźnienie, gorsze wskaźniki QoS
- kilka szczelin do nadawania:
 - problem duplexu w MS => mała oferta rynkowa
- kanał danych: 2,4 kbit/s (netto) ⇒ aplikacje?
 - krótkie teksty, dostęp do baz danych, WAP, AVL, grafika o małej rozdzielczości (JPEG)
- wykorzystanie SDS (*Short Data Service*) do 2048 bitów platforma dla aplikacji, np. telemetrii, zdalnego sterowania, AVL, + "statusy" = predefiniowane wiadomości danych

Potrzeby w zakresie transmisji danych:

Stosowane lub przewidywane w sieciach PMR / PAMR:

- lokalizacja pojazdów (AVL) i/lub osób (APL)
- przesyłanie fotografii i nieruchomych obrazów
- przesłanie instrukcji, planów budynków i map (aplikacje GIS)
- pobieranie z baz danych informacji np. o osobach
- monitorowanie rytmu serca, temperatury itd. osób wykonujących bardzo ryzykowne zadania, albo pacjentów w czasie transportu do szpitala
- przesyłanie obrazów z miejsca wypadku, aby szpital zawczasu przygotował konieczne środki
- monitorowanie za pomocą kamer wideo prac związanych z dużym ryzykiem (bomba, skażenie chemiczne)

Potrzeby w zakresie transmisji danych:

- CCTV, monitorowania za pomocą kamer zagrożonych obszarów (prewencja)
- dane z urządzeń telemetrycznych
- zdalne sterowanie urządzeniami ostrzegającymi
- Transmisja wideo
 - kompresja obrazu ruchomego z kamery do kilku kbit/s, MPEG-4 part 10 lub AVC (ITU-T H.264)
- Fotografie, mapy i plany
 - kompresja "JPEG"

13

Rozwój systemu TETRA – potrzeby

- konieczność zaspokojenia potrzeb użytkowników w zakresie transmisji danych
- przedłużenie czasu życia systemu TETRA
- stworzenie drogi dla modernizacji TETRA V+D
- stworzenie możliwości wymiany usług z sieciami publicznymi 2,5 G i 3 G (nowy kodek)
- uzyskanie korzyści z wprowadzenia nowej techniki

Postęp techniki terminale:

- zachowane atrybuty sprzętu profesjonalnego
- odporność na narażenia środowiskowe
- ergonomiczny "podobny do komórki"
- przyjazny MMI,
- kolorowy wyświetlacz o dużej rozdzielczości,
- SDS, aplikacje dostępu do baz danych, AVL, statusy

Cele prac rozwojowych w ETSI:

- rozpoznanie nowych wymagań ze strony użytkowników;
- transmisja danych pakietowych o większej szybkości
- rozszerzenie standardu interfejsu radiowego
- wybór dodatkowego kodeka sygnału mowy (zgodność z 3G)
- opracowanie lub przyjęcie standardu zapewniającego współpracę i roaming między siecią TETRA a sieciami publicznymi
- rozwój SIM dla systemu TETRA
- zapewnienie kompatybilności wstecz z dotychczasowym standardem
- opcja o większym zasięgu (> 58 km) dla komunikacji Air-Ground-Air (AGA)

Drogi rozwoju systemu TETRA:

TETRA Advanced Packet Service (**TAPS**)
nowa koncepcja w oparciu o specyfikację GSM/GPRS,
– brak zainteresowania producentów

TETRA Enhanced Data Service (**TEDS**)
evolucja TETRA V+D w warstwie fizycznej,
w tym dwa istotne punkty:

- przygotowanie systemu pakietowej transmisji danych z szybkością większą niż możliwa TETRA V+D
- kompatybilność wstecz i integracja nowych usług z istniejącym standardem TETRA Release 1, [ok. 99,9 % wymagań specyfikacji TETRA Release 1 pozostaje aktualnych]
- 2005 r. decyzja o wprowadzeniu metodą rozszerzenie specyfikacji Release 1

Interfejs radiowy TEDS:

- częstotliwości jak TETRA V+D (pożądane ekstra)
 - system TDMA, 4 lub 8 szczelin;
 - ten sam kanał sterujący;
 - kanały radiowe o szerokości:
25 kHz, 50 kHz, 100 kHz oraz 150 kHz
 - modulacja $\pi/8$ D8PSK dla zwiększenia szybkości w kanałach 25 kHz drogą migracji (54 kbit/s zamiast 36 kbit/s przy $\pi/4$ DQPSK)
 - kanały QAM:
 - podnośne modulowane 4-QAM (2 bity/symbol), 16-QAM (4 bity/symbol), 64-QAM (6 bitów/symbol),
 - 8 podnośnych w paśmie kanału 25 kHz
 - w kanałach szerszych: 16, 32, 48 podnośnych
 - szybkość modulacji 2400 symboli/s
- por. ETSI EN 300 392-2 v3.1.1

Interfejs radiowy TEDS:

- szybkości transmisji (brutto) kanał 25 kHz:
 - przy 4-QAM: 19200 symboli/s – 38,4 kbit/s,
 - przy 16-QAM: 19200 symboli/s – 76,8 kbit/s,
 - przy 64-QAM: 19200 symboli/s – 115,2 kbit/s

.....

- szybkości transmisji (brutto) kanał 150 kHz:
 - przy 4-QAM: 115200 symboli/s – 230,4 kbit/s,
 - przy 16-QAM: 19200 symboli/s – 460,8 kbit/s,
 - przy 64-QAM: 19200 symboli/s – 691,2 kbit/s

BRAK DOSTĘPNEGO PASMA

TEDS przepływność danych pakietowych [kbit/s]

Channel Type Modulation	25 kHz	50 kHz	100 kHz	150 kHz
$\pi/4$ DQPSK	15.6			
$\pi/8$ D8PSK	24.3			
4-QAM	11	27	58	90
16-QAM	22	54	116	179
64-QAM	33	80	175	269
64-QAM	44	107	233	359
64-QAM	66	160	349	538

Uwaga. Podano dla łącza "w dół", kanał zajmujący 4 szczeliny

19

Szybkości danych użytkownika

np. w kanale 25 kHz szybkość (netto) w granicach do 60 kbit/s, a system TETRA V+D do 9,6 kbit/s;

Zwiększenie efektywności emisji (pasma),
kosztem utraty czułości odbiornika,
a w konsekwencji zmniejszenie zasięgów sieci.

Dla TEDS zasięg będzie kilkakrotnie mniejszy niż dla trybu V+D. W terenie otwartym zamiast kilkunastu km, kilka km. Czy zwiększać gęstość stacji bazowych?

Prace ETSI w toku! Oferta sprzętu – nowe stacje bazowe EADS (Nokia) i Motorola przygotowane sprzętowo do TEDS

Inne innowacje:

- kodek mowy, adaptacyjny 3GPP/GSM 4,75 kbit/s i opcjonalnie kodek NATO;
- interfejsy zewnętrzne sieci pakietowej jak GPRS

Zasięg w otwartej przestrzeni (kanał 150 kHz)

Modulacja	4 QAM	16 QAM	64 QAM
Czułość [dBm]	-106	-100	-94
Maksymalny zasięg [km]	11,9	5,9	3,0

