



# **INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI**

## **PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY**

**Zakład Systemów Radiowych (Z-1)**

**Prace dotyczące systemów radiokomunikacyjnych  
III i następnych generacji  
w szczególności dla potrzeb sieci inteligencji otoczenia**

**Praca nr 01 30 001 5**

**Warszawa, grudzień 2005**

Tytuł pracy: **Prace dotyczące systemów radiokomunikacyjnych III i następnych generacji w szczególności dla potrzeb sieci inteligencji otoczenia**

Numer pracy: 01300015

Słowa kluczowe: radiowe sieci lokalne; IEEE 802.11; RLAN; WLAN; Wi-Fi; WPAN; kompatybilność systemów; zasięgi; projektowanie; optymalizacja; wymagania; badania

Kierownik pracy: mgr inż. Aleksander Orłowski

Wykonawcy pracy: mgr inż. Aleksander Orłowski  
mgr inż. Krzysztof Kaczan (Z-1)  
mgr inż. Rafał Pawlak (Z-1)  
mgr inż. Przemysław Socha (Z-1)

Praca wykonana w Zakładzie Systemów Radiowych (Z-1) Instytutu Łączności w Warszawie

Kierownik Zakładu: mgr inż. Aleksander Orłowski

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

## SPIS TREŚCI

1.	Wstęp .....	5
1.1.	Sieci inteligencji otoczenia .....	5
1.2.	Radiowe sieci lokalne .....	8
1.3.	Radiowe sieci osobistego otoczenia.....	9
2.	Przegląd norm z serii IEEE 802.11 .....	11
2.1.	Wprowadzenie .....	11
2.2.	Architektura radiowej sieci lokalnej .....	15
2.3.	Hotspot .....	17
2.4.	Sieci kratowe.....	18
2.5.	Wielodostęp .....	19
2.6.	Techniki rozpraszania widma sygnału radiowego .....	20
2.6.1.	Charakterystyka systemu FHSS wg normy 802.11 .....	22
2.6.2.	Charakterystyki systemu DSSS wg norm 802.11 i 802.11b .....	22
2.6.3.	Charakterystyki systemu OFDM wg norm 802.11a i 802.11g .....	24
2.6.4.	Wersje niestandardowe .....	27
2.6.5.	Znak "Wi-Fi" .....	28
2.7.	Architektura urządzeń .....	28
2.8.	Związek z charakterystykami kanału radiowego .....	30
2.8.1.	Wielodrogowość – skutki w dziedzinie czasu .....	30
2.8.2.	Wielodrogowość – skutki w dziedzinie częstotliwości.....	31
3.	Podstawowe wymagania.....	32
3.1.	Wykorzystanie pasma 2,4 GHz.....	32
3.2.	Wykorzystanie pasma 5 GHz.....	33
3.3.	Dołączanie anten zewnętrznych.....	35
3.3.1.	Problemy prawno-administracyjne .....	35
3.3.2.	Problemy techniczne .....	35
3.3.3.	Lokalizacja anten zewnętrznych .....	36
3.3.4.	Wybór kabli antenowych .....	37
3.4.	Anteny urządzeń przenośnych .....	37
3.5.	Wymagane parametry odbiornika .....	39
4.	Propagacja fal radiowych.....	43
4.1.	Łącze radiowe punkt do punktu .....	44
4.1.1.	Propagacja fal radiowych w otwartej przestrzeni .....	44
4.1.2.	Propagacja fal radiowych nad ziemią .....	46
4.1.3.	Modelowanie trasy LOS .....	47
4.2.	Obliczanie bilansu łącza radiowego.....	49
4.2.1.	Projektowanie łącza punkt-punkt.....	50
4.2.2.	Projektowanie łącza punkt do wielu punktów .....	56

4.3.	Zasięg na zewnątrz budynków dla terminali noszonych.....	56
4.4.	Tłumienie fali w pomieszczeniach.....	57
4.5.	Stosowanie odbioru zbiorczego .....	59
4.6.	Zakłócenia wspólnokanałowe .....	60
4.7.	Zakłócenia w sieci kratowej.....	63
5.	Obsługa ruchu w radiowej sieci lokalnej .....	64
5.1.	Pojemność sieci RLAN .....	65
5.1.1.	Uwarunkowania systemowe .....	65
5.1.2.	Przypadek pojedynczego punktu dostępu .....	65
5.1.3.	Sieć z wieloma punktami dostępu.....	69
5.2.	Wymagania dotyczące obsługi ruchu .....	71
5.3.	Ocena ze strony użytkowników .....	74
6.	Przygotowanie projektu radiowej sieci lokalnej .....	74
6.1.	Wybór standardu RLAN .....	74
6.1.1.	Wydajność urządzeń 802.11g .....	75
6.1.2.	Porównanie charakterystyk urządzeń 802.11a i 802.11b.....	76
6.1.3.	Zakłócenia w paśmie 2,4 GHz .....	78
6.1.4.	Parametry sprzętu.....	79
6.2.	Rozpoznanie miejsca instalacji .....	80
6.3.	Programy wspomagające planowanie i utrzymania sieci .....	81
6.4.	Testowanie pokrycia .....	85
7.	Podsumowanie .....	86
	Podstawowe definicje .....	87
	Wykaz literatury.....	89
	Akronimy .....	92

## 1. Wstęp

Niniejszy dokument jest wynikiem pracy wykonanej w ramach działalności statutowej Instytutu Łączności, której celem było przygotowanie opracowania charakteryzującego rozwój systemów bliskiego zasięgu, stosowanych w radiowych komputerowych sieciach lokalnych. Zgodnie z zapisem w punkcie 8.3 wniosku nr 76/05 o realizację projektu badawczego finansowanego ze środków działalności statutowej, temat potraktowano jako pierwszy etap pracy, której kolejne etapy powinny dotyczyć: systemów stosowanych w radiowych sieciach otoczenia osobistego, a docelowo w sieciach sensorowych i sieciach inteligencji otoczenia.

We wstępie wyjaśniono podstawowe pojęcia związane z tytułem i zakresem pracy, a mianowicie:

- sieci inteligencji otoczenia,
- radiowe sieci lokalne (WLAN, RLAN<sup>/1</sup>),
- radiowe sieci osobistego otoczenia (WPAN),

oraz w zwartej formie opisano obecny i przewidywany zakres zastosowań tych systemów i problemy z tym związane.

W rozdziale 2 omówiono tematykę bieżących prac IEEE i opublikowane dokumenty z serii 802.11 dotyczące radiowych sieci lokalnych. Opisano podstawowe charakterystyki warstwy fizycznej (PHY) i dostępu do medium (MAC) systemów zgodnych ze standardami IEEE z serii 802.11, architekturę radiowych sieci lokalnych, zagadnienia wielodostępu i odporności na zakłócenie propagacyjne.

W rozdziale 3 przedstawiono podstawowe wymagania odnośnie parametrów urządzeń RLAN wynikające z norm i zaleceń międzynarodowych oraz inne warunki mające wpływ na projektowanie sieci.

Rozdział 4 dotyczy projektowania zasięgów radiowych łączy w sieciach lokalnych na zewnątrz i wewnątrz pomieszczeń. Omówiono także zasady planowania częstotliwości dla sieci RLAN i warunki kompatybilności.

Rozdział 5, w którym analizowano obsługę ruchu i pojemność sieci, ma ścisły związek z rozdziałem 6, w którym zamieszczono praktyczne wskazówki dotyczące wyboru systemu, urządzeń i informacje o dostępnych narzędziach wspomagających planowanie, testowanie i utrzymanie sieci.

### 1.1. Sieci inteligencji otoczenia

W ostatniej dekadzie nastąpił bezprecedensowy rozwój systemów telekomunikacyjnych stosowanych w sieciach publicznych oraz w sieciach wewnętrznych różnych organizacji i instytucji, a także użytkowanych przez osoby prywatne dla własnych potrzeb. Zaspokojenie

---

<sup>/1</sup> Stosowane akronimy zestawiono na końcu opracowania.

i pogodzenie potrzeb gwałtownie wzrastającej liczby użytkowników, w tym znacznej liczby użytkowników mobilnych, wprowadzenie nowych aplikacji wymagających coraz większej przepływności kanałów transmisyjnych i zagwarantowanie wysokiej jakości usług, powodują poszukiwanie rozwiązań technicznych, które mogą gwarantować uzyskanie pojemności sieci wystarczającej do realizacji tych celów.

Nasycenie środowiska urządzeniami teleinformatycznymi pociąga za sobą ryzyko stresu związanego z koniecznością szybkiego opanowania obsługi coraz to nowszych i bardziej skomplikowanych urządzeń i nadmiaru uzyskiwanych informacji. Drogą do zmniejszenia tego ryzyka jest stworzenie przyjaznego środowiska wyposażonego w interfejsy obsługiwane intuicyjnie o łatwiejszej, niż stosowane obecnie, percepcji dla zmysłów. Innymi słowy celem powinno być wyeliminowanie zbędnych manualnych i mentalnych czynności człowieka i przesunięcie ich do sfery kontrolowanej w całości przez maszyny. Te założenie są podstawą koncepcji sieci z inteligencją w otoczeniu (*Ambient Intelligence, AmI*), która jest postrzegana jako jedno z kluczowych zagadnień wymagających rozwiązania w ramach programów rozwoju Społeczeństwa Informacyjnego (*Information Society*).

Sieć z inteligencją w otoczeniu jest wizją fascynującą, ale niesie ze sobą wiele zagrożeń. Nie można zapominać, że ze względu na ograniczenie kontroli ludzkiej i brak doświadczeń w realizacji podobnych przedsięwzięć, wprowadzanie AmI będzie wiązać się ze zwiększonym ryzykiem utraty kontroli nad fragmentem sieci, a ze względu na wzajemne powiązania sieci zjawiska niekontrolowane mogą się rozprzestrzeniać w sposób trudny do przewidzenia. Sieć AmI powinna więc gwarantować nie tylko odpowiednią jakość usług i niezawodność, ale także odporność na narażenie stwarzane przez nieumiejętne postępowanie uprawnionych użytkowników lub celowe działanie intruzów oraz na naturalne i wywołane działalnością ludzi narażenia elektromagnetyczne. Jednocześnie powinna być obsługiwana i obsługiwać "zwykłych użytkowników".

Projekt pod nazwą "sieci otoczenia" (*Ambient Networks, AN*) [<http://www.ambient-networks.org/>] jest jednym z projektów finansowanych przez Komisję Europejską (*European Commission*) w ramach 6-tego Programu Ramowego (*6th Framework Programme*), jako jeden z tematów związanych z technologiami dla społeczeństwa informacyjnego. Projekt dotyczy strategicznego celu "Systemy ruchome i radiowe następujące po 3G" (*Mobile and Wireless Systems Beyond 3G*). Zakłada się, że w wyniku projektu zostaną stworzone propozycje skalowalnych sieci radiowych dostarczających bogaty zestaw usług komunikacyjnych dostępnych dla wszystkich, funkcjonujących w środowisku radiowym tworzonym przez mnóstwo urządzeń użytkowników indywidualnych i operatorów sieci.

Sieci otoczenia (AN) mają komponować i integrować sieci radiowe, takie jak np. sieci osobistego otoczenia użytkowników (*Wireless Personal Area Network, WPAN*), sieci w pojazdach komunikacji publicznej (*vehicular network*), lokalne sieci biurowe / hotelowe (*ambient office / hotel WLAN*), sieci municypalne (*ambient city hot-spot*), sieci komórkowe (*ambient cellular service*) i inne – dziś jeszcze nie znane.

AN tworzą zupełnie nową koncepcję dynamicznego komponowania sieci, pozwalającą uniknąć rosnącej liczby niejednorodnych rozszerzeń dodawanych do architektury istniejących sieci telekomunikacyjnych. Zasada ta powinno zapewnić dostęp do każdej sieci, w tym ruchomej sieci osobistej, poprzez chwilowe ustanowienie porozumienia pomiędzy sieciami.

Przyjęcie takich założeń prowadzi do konieczności projektowania systemów ruchomych o strukturze poziomej, w której będą wspólne funkcje sterujące dla różnych aplikacji i różnych technologii interfejsów radiowych. Radykalna zmiana koncepcji wymaga zdefiniowania nowych interfejsów i standardów sieci ruchomych.

W wyniku projektu *Ambient Networks* powinna powstać kompletna, spójna propozycja architektury dla samo-konfigurujących się elementów sieci radiowej, która zredukuje koszty wdrażania i utrzymania sieci, a także pakiet protokołów do tworzenia sieci stanowiących rozwinięcie IPv6. Wyniki uzyskane w ramach projektu powinny ułatwić stopniowe wprowadzanie nowych usług i stymulować rozwój europejskiego sektora komunikacji ruchomej.

W założeniach przewiduje się trzy fazy tego projektu. Pierwsza powinna określić ogólne podejście i zawierać studium realizowalności. Planowane nakłady ponad 2000 osobo-miesięcy w okresie dwóch lat (2006-2007) odzwierciedlają wagę przykładaną do strategicznych i technicznych zadań związanych z projektem.

W ramach projektu AN określono następujące cele techniczne:

- Zdefiniować i przeanalizować, z wykorzystaniem różnych scenariuszy, spójne rozwiązania dla sieci otoczenia w tym:
  - architekturę, która umożliwi łatwą i dynamiczną kompozycję oddzielnych sieci w środowisku ze stale rosnącą różnorodnością technologii i dostawców usług;
  - zestaw adaptacyjnych samo-konfigurujących się elementów sieci ruchomej, które pozwolą zmniejszyć koszty planowania, wdrażania, konfigurowania i utrzymania sieci;
  - obszerny, zintegrowany program bezpieczeństwa, zapewniający ochronę sieci od końca do końca (*end-to-end*) i odporność na ataki.
- Zapewnić, żeby sieci otoczenia stanowiły nowe standardy dla przyszłościowych świadomych kontekstu, wielo-domenowych sieci ruchomych przez następujące podstawowe elementy:
  - nowe algorytmy do efektywnego zarządzania zasobami radiowymi w różnych technologiach i w wielu domenach;
  - zaprojektowanie innowacyjnej warstwy łącza dla łatwej adaptacji i objęcia istniejących i nowych interfejsów radiowych;
  - zestaw protokołów dla kompozycji sieci zapewniających: możliwość przyłączenia, zarządzanie zasobami, bezpieczeństwo, wykrywanie konfliktów, sterowalność, przenoszenie zawartości (*content handling*);
  - obsługę dynamicznych uzgodnień międzysieciowych zapewniających abonentowi dostęp do każdej sieci w każdym miejscu z uwzględnieniem jakości usługi "od końca do końca" (*end-to-end QoS*);
  - zarządzanie w wielu domenach mobilnością użytkowników i grup użytkowników w różnorodnych radiowych sieciach dostępowych, z uwzględnieniem nowych rodzajów sieci, takich jak sieci osobistego otoczenia (*Personal Area Networks, PAN*) i sieci w pojazdach;
  - efektywną obsługę dostarczania multimediów przez opracowanie sposobów kierowania (rutingu) i transportu strumieni mediów przez domeny, wyważenie QoS z uwzględnieniem właściwości różnych technologii, właściwości urządzeń końcowych i wymagań odnośnie QoS ze strony strumieni mediów;
  - sieci świadome kontekstu w celu zwiększenia efektywności transmisji i umożliwienia nowych aplikacji;
  - wspólne, skalowalne, bezpieczne interfejsy pomiędzy domenami sieci;
  - innowacyjne samo-zarządzanie (*self-management*) nie tylko dla nowych węzłów sieci, ale także niedawno utworzonych sieci.

- Zapewnić komercyjną żywotność przez zidentyfikowanie aspektów biznesowych i koncepcji wdrożenia.
- Sprawdzić różne opracowane rozwiązania techniczne.

Projekt Ambient Networks może mieć zasadnicze znaczenie dla rozwoju sieci ruchomych w przyszłości. Będzie mieć wpływ na rozwój telekomunikacji, usług informatycznych i dostarczania zawartości (*content delivery*). Z tych względów przyczynia się do realizacji wspomnianej na wstępie tego punktu wizji inteligencji otoczenia.

Udział Instytutu Łączności w pracach dotyczących sieci z inteligencją w otoczeniu wymaga właściwego przygotowania kadry. Ze względu na szczupłe środki przeznaczane na prace statutowe związane z rozwojem radiokomunikacji wydaje się, że łatwiejsze jest opanowanie systemów o stosunkowo prostej architekturze, takich jak radiowe sieci lokalne (RLAN, WLAN), radiowe sieci osobiste (WPAN) i radiowe systemy identyfikacji (RFID). Zdaniem autorów pracy, po gruntownym zapoznaniu się ze stanem techniki, w tych obszarach można poszukiwać miejsca dla prac badawczych Instytutu Łączności.

## 1.2. Radiowe sieci lokalne

Radiowe sieci lokalne, nazywane w dokumentach organizacji normalizacyjnych albo: *Radio Local Area Networks*, *RLAN* – określenie stosowane w dokumentach ITU-R, CEPT / ERO, ECC i ETSI, albo: *Wireless Local Area Networks*, *WLAN* – określenie używane w dokumentach IEEE<sup>/2</sup>, często utożsamiane z nazwą *Wi-Fi*, są zaliczane do grupy radiowych systemów dostępowych (*Wireless Access Systems*, *WAS*). Systemy tego rodzaju są stosowane wewnątrz i/lub na zewnątrz pomieszczeń, zwykle na ograniczonym obszarze geograficznym.

Obecnie RLAN znajdują zastosowanie we wszystkich spośród trzech zdefiniowanych przez ITU-R kategoriach dostępu radiowego:

- w stacjonarnym (*Fixed Wireless Access*, *FWA*),
- w ruchomym (*Mobile Wireless Access*, *MWA*),
- w nomadycznym (*Nomadic Wireless Access*, *NWA*).

Przy czym dotychczas mobilność użytkowników RLAN jest ograniczona do obszaru zasięgu pojedynczego punktu dostępu (AP) lub kilku AP zapewniających obsługę przenoszenia połączeń (*handover*) w obrębie tzw. "hotspot".

Do rozpowszechnienia tej technologii przyczyniły się prace standaryzacyjne wykonane i nadal prowadzone przez Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) w ramach Grupy Roboczej 802.11 "Wireless LAN Working Group" [<http://standards.ieee.org/>] (por. rozdział 2) i certyfikacja interoperacyjności sprzętu różnych producentów prowadzona przez Wi-Fi Alliance [<http://www.wi-fi.org/>].

Ze względu na wyjątkowo korzystny stosunek oferowanej szerokości pasma do kosztów sprzętu i eksploatacji sieci oraz powszechną dostępność kanałów radiowych sieci RLAN są używane:

- w budynkach biurowych – jako rozszerzenie lub alternatywa kablowych sieci lokalnych;

---

<sup>/2</sup> Różnica wynika z tradycji językowej, ale jest bardzo istotna. Określenie "Radio LAN, RLAN" wskazuje jednoznacznie, że w systemie wykorzystywane są fale radiowe. W konsekwencji do systemu i stosowanych w nim urządzeń odnoszą się wszystkie przepisy prawa międzynarodowego i krajowego, które dotyczą urządzeń radiowych. Określenie "Wireless LAN, WLAN" jest pojęciem szerszym, obejmuje wszystkie systemy "bezprzewodowe" w zakresie fal radiowych, podczerwieni, światła widzialnego i in. W tym kontekście rozpowszechnione w Polsce określenie "sieci bezprzewodowe" stosowane w odniesieniu do urządzeń radiowych jest niepoprawne.



- do tworzenia radiowych łączy punkt-punkt pomiędzy kilkoma siedzibami firmy;
- w miejscach zgromadzeń, takich jak: centra konferencyjne, sale wykładowe, punkty informacyjne, a także w hotelach, restauracjach i w kawiarniach, gdzie "hotspot" dla potrzeb zainteresowanych osób instalują i udostępniają użytkownicy tych obiektów;
- przez komercyjnych dostawców usług teleinformatycznych, takich jak operatorzy sieci GSM / UMTS, którzy dostęp RLAN traktują jako wzbogacenie ich oferty instalując "hotspot" w różnych masowo uczęszczanych miejscach, takich jak lotniska, centra konferencyjne, dworce kolejowe i hotele;
- przez lokalnych dostawców Internetu (*Local Internet Service Provider, ISP*) jako najtańsza forma radiowej sieci dostępu do Internetu, zwłaszcza na obszarach wiejskich i małych miast;
- w mieszkaniach – jako przedłużenie łączy kablowych ADSL, umożliwiające umieszczenie sprzętu komputerowego w dowolnym pomieszczeniu i współużytkowanie łącza ADSL i wyposażenia, takiego jak drukarki, przez kilku domowników;
- przez lokalne społeczności dla ich potrzeb.

W większości komputerów przenośnych (klasy "laptop"), znajdujących się obecnie w ofercie producentów, moduł RLAN (Wi-Fi) stał się standardowym wyposażeniem. W wielu PDA instalowane są moduły dualne RLAN / GSM-GPRS.

Wg Alcatel Telecommunications Review 4-th Q, 2003, już w 2003 r. ponad 75% osób podróżujących służbowo zabierało ze sobą laptopa, 62% z tej liczby korzystało z Internetu w hotelu, dziennie wykorzystując średnio 2,3 połączenia, każde po 30 min. Osoby takie są potencjalnymi klientami operatorów hotspot (portów lotniczych, sieci hoteli, ...).

W niniejszej pracy skoncentrowano się na wykorzystaniu RLAN przez instytucje i osoby prywatne głównie dla własnych potrzeb. Nie rozwinęto zagadnienia budowy "hotspot" przez operatorów sieci komercyjnych.

### **1.3. Radiowe sieci osobistego otoczenia**

Sieciami osobistego otoczenia (*Personal Area Network, PAN*) są nazywane sieci działające w najbliższym sąsiedztwie użytkownika, typowo w granicach od kilku centymetrów do 10 m. Tym otoczeniem może być np. mieszkanie, dom wraz z przyległym ogrodem, samochód.

Radiowe sieci osobistego otoczenia (*Wireless Personal Area Network, WPAN*) należą do dynamicznie rozwijające się kategorii urządzeń radiowych bliskiego zasięgu. Badania i prace standaryzacyjne w tej dziedzinie są prowadzone przez liczne stowarzyszenia i instytucje, m.in.: Bluetooth Special Interest Group (SIG) [<http://www.bluetooth.com/bluetooth/>]; IEEE w ramach Grupy Roboczej 802.15 "Wireless Personal Area Network (WPAN)" [<http://standards.ieee.org/>]; ZigBee Alliance, Inc. [<http://www.zigbee.org/>] i wiele innych.

Osobiste urządzenia elektroniczne, takie jak telefony komórkowe, komputery kieszonkowe i elektroniczne notesy (PDA), kamery cyfrowe, odtwarzacze MP3, zestawy słuchawkowe, konsole do gier i inne, których popularność rośnie w ślad za tym, jak urządzenia te stają się mniejsze, lżejsze, tańsze, mogą być łączone w sieci między sobą i z urządzeniami zewnętrznymi, takimi jak biurkowy PC. Jednakże połączenie ich za pośrednictwem kabli jest uciążliwe. Przed przesłaniem informacji należy najpierw połączyć ze sobą dwa urządzenia, co oznacza konieczność częstego manipulowania kablami (uszkodzenia mechaniczne) i zabierania ze sobą wszędzie: do domu, do biura i w podróż służbową, wszystkich potrzebnych kabli, złącz i adapterów. Wyposażenie tego rodzaju urządzeń w nadawczo-odbiorcze moduły radiowe bliskiego zasięgu, zgodne z jednym standardem obejmującym

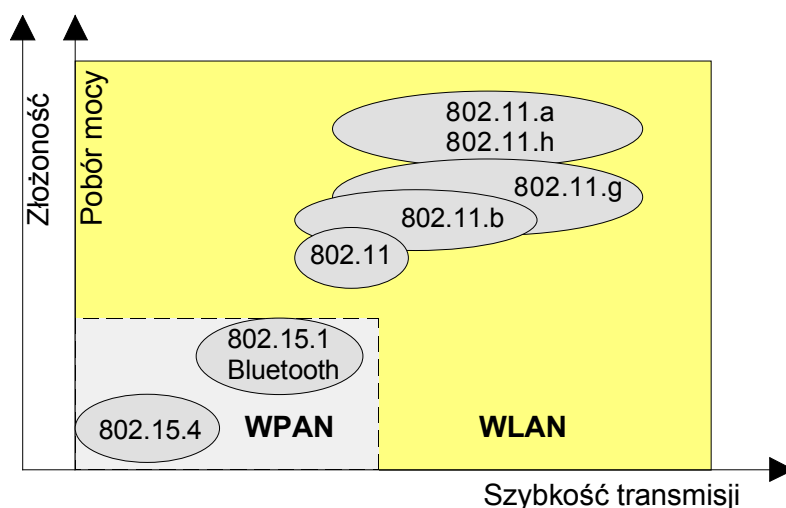
transmisję danych i głosu, pozwalającym na utworzenie w dowolnym miejscu sieci ad-hoc o zasięgu kilku metrów, eliminuje skutecznie problemy okablowania.

Za pomocą łączy radiowych można również połączyć w spójnej sieci domowe urządzenia telemetryczne, sterujące klimatyzacją, alarmowe i inne. Sieć domowa będzie więc siecią wzajemnie połączonych inteligentnych czujników i inteligentnych urządzeń przetwarzających informacje i urządzeń wykonawczych.

Jednym z kluczowych założeń odnośnie WPAN jest włączanie (*plug in*) urządzenia do sieci. W idealnym scenariuszu wymaga się, aby dwa urządzenia tej samej sieci WPAN, które znajdują się odpowiednio blisko siebie (np. w granicach kilku metrów), mogły komunikować się tak, jakby były połączone kablem. Powinna istnieć możliwość rozbudowy i modyfikacji sieci – wprowadzania / usuwania urządzeń oraz modyfikowania programu sterowania. Ze względu na obecność urządzeń należących do innych sieci cechą zapobiegającą nieuprawnionemu dostępowi do informacji oraz wzajemnym zakłóceniom jest selektywne poszukiwanie uprawnionego urządzenia.

Ze względu na środowisko pracy, system radiowy zastosowany w radiowej sieci domowej powinien charakteryzować się wyjątkowo dużą odpornością na zakłócenia propagacyjne występujące w tym środowisku oraz zakłócenia elektromagnetyczne stwarzane przez urządzenia gospodarstwa domowego i inne sieci radiowe.

Granice podziału pomiędzy radiowymi sieciami osobistego otoczenia (WPAN) i radiowymi sieciami lokalnymi (WLAN) są nieostre, rys. 1. Klasyfikacja ma związek z trzema atrybutami urządzeń. Urządzenia WLAN na ogół są przeznaczone do przesyłania danych z większą szybkością i na większe odległości, są bardziej złożone i pobierają większą moc ze źródła zasilania. Ta ostatnia cecha jest krytyczna, ponieważ w wielu zastosowaniach urządzeń WPAN zakłada się wielomiesięczny, a nawet wieloletni okres pracy bez konieczności wymiany baterii. Ponadto WPAN, zgodnie z nazwą, w zasadzie zaspakajają indywidualne potrzeby określonej osoby, natomiast WLAN przeważnie potrzeby zbiorowe o charakterze lokalnym - sieć w biurze, sali konferencyjnej lub publiczny "hotspot".



Rys. 1: Klasyfikacja radiowych sieci bliskiego zasięgu

Uwaga. 802.11 i 802.15 są symbolami norm IEEE [1 ÷ 7, 11 ÷ 15].

Grupa urządzeń zaliczanych do WPAN nie jest jednorodna. Technologie znane od kilku lat, takie jak Bluetooth (IEEE 802.15.1), dla wielu zastosowań są zbyt skomplikowane i za drogie, a w przypadku innych potrzeb nie gwarantują wymaganej przepływności.

Dla potrzeb automatyki domowej i podobnych stworzono podgrupę urządzeń o bardzo małej szybkości transmisji (*Low Rate WPAN, LR-WPAN*) i bardzo małym poborze prądu zasilania. Przykładami specyfikacji technicznych tego rodzaju produktów jest norma IEEE 802.15.4 i specyfikacja produktów o nazwie handlowej "Zigbee", o szybkości do 250 kbit/s. Sieć tego rodzaju może tworzyć dowolną strukturę (gwiazda, drzewo, krata) zawierającą do 255 urządzeń (węzłów).

Dla potrzeb multimedialnych sieci radiowych bliskiego zasięgu opracowano normę IEEE 802.15.3, w której zakłada się możliwość uzyskiwania szybkości transmisji do 55 Mbit/s. Aktualnie w wielu ośrodkach są prowadzone prace dotyczące sieci ultra-szerokopasmowych (*Ultra Wideband, UWB*), m.in. przez IEEE w ramach projektu 802.15.3a.

Zakłada się, że tematyka WPAN będzie przedmiotem kolejnego etapu pracy statutowej prowadzonego w 2006 r.

## **2. Przegląd norm z serii IEEE 802.11**

### **2.1. Wprowadzenie**

W latach dziewięćdziesiątych wiele firm opracowało i promowało własne szerokopasmowe, radiowe systemy transmisji danych przeznaczone do zastąpienia kablowych sieci LAN, albo tak jak w przypadku systemu HomeRF, wspólnej inicjatywy firm Compaq, IBM, HP i in., do zastąpienia okablowania pomiędzy domowymi urządzeniami teleinformatycznymi (laptop, biurowy PC, PDA, telefony), a domowym punktem dostępu do sieci telekomunikacyjnej.

Jednakże faktyczną podstawą masowego rozwoju systemów radiowych sieci lokalnych stały się opracowywane przez Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE) normy z serii 802.11.

Pierwszą normę dotyczącą bezprzewodowych sieci lokalnych w IEEE przyjęto w 1997 r., a jej poprawioną wersję w 1999 r. Dokument IEEE o symbolu 802.11-1999 [1] zawiera opis systemu wykorzystującego podczerwień oraz dwóch wersji systemu radiowego z widmem rozproszonym: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) oraz DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), zaprojektowanych do pracy w paśmie częstotliwości 2,4 GHz. W systemie tym zdefiniowano dwie szybkości transmisji: 1 Mbit/s i 2 Mbit/s. Krótkie opisy technik modulacji FHSS i DSSS stosowanych w tych systemach zawierają punkty 2.2.1 i 2.2.2.

System wykorzystujący podczerwień nie znalazł praktycznych zastosowań.

W latach 1999 ÷ 2005 wprowadzono istotne rozszerzenia i zmiany tego podstawowego standardu zawarte w dokumentach o symbolach kolejno 802.11a, 802.11b, 802.11g, ..., mające na celu zwiększenie szybkości transmisji danych w warstwie fizycznej, dostosowanie systemów do specyficznych wymagań administracyjnych obowiązujących w różnych rejonach świata, wzmocnienie ochrony informacji, uwierzytelnienia użytkowników, kontrolę dostępu do sieci oraz wprowadzenie mechanizmów definiowania jakości usług (*Quality of Service, QoS*). Prace dotyczące dokumentów z tej serii nie są zakończone, dotyczą udoskonalania i koniecznych zmian w ww. zatwierdzonych dokumentach oraz zupełnie nowych zagadnień. Poniżej wymieniono tematy projektów, których dotyczą normy i przewodniki IEEE z serii 802.11<sup>/3</sup>:

- 802.11a [2] norma definiująca RLAN w paśmie 5 GHz z szybkością do 54 Mbit/s, bliższą charakterystykę zawiera punkt 2.2.3, (1999, urządzenia dostępne od 2001);

<sup>/3</sup> Dokumenty – tematy wymieniono w kolejności alfabetycznej. Kolejność ta nie ma związku z kolejnością publikacji, np. normę 802.11b zatwierdzono i opublikowano wcześniej niż normę 802.11a.

- 802.11b [3, 4] norma definiująca RLAN w paśmie 2,4 GHz z szybkością do 11 Mbit/s i opcjonalnie 22 Mbit/s, bliższą charakterystykę zawiera punkt 2.2.3, (1999);
- 802.11c norma dotycząca interoperacyjności w radiowych punktów dostępu lub mostów (*wireless bridge*). Jest uzupełnieniem 802.1D. Prace te są obecnie częścią IEEE 802.1D, polegają na modyfikacji podstawowego standardu 802.11 w części dotyczącej warstwy MAC, (2001);
- 802.11d norma definiująca możliwości zmian konfiguracji sieci na poziomie warstwy MAC (dostępu do medium) w celu dostosowania do wymagań kraju, w którym sieć ma być stosowana, (2001);
- 802.11e [9] norma, która umożliwia definiowanie jakości usług (QoS) i obsługę multimediów w istniejących sieciach 802.11a, 802.11b, 802.11g, (2005);
- 802.11F, zalecenia dotyczące protokołu dostępu między różnymi AP (*Inter Access Point Protocol, IAPP*), istotne ze względu na możliwość roamingu użytkowników między różnymi sieciami, (2003);
- 802.11g [6] norma definiująca RLAN w paśmie 2,4 GHz z szybkością do 54 Mbit/s, bliższą charakterystykę zawiera punkt 2.2.3, (2003);
- 802.11h [7], uzupełnienie 802.11a polegające na uwzględnieniu wymaganych w Europie, mechanizmów obsługi dynamicznego wyboru częstotliwości (DFS) i sterowanie mocą nadajnika (TPC) w celu zapewnienia koegzystencji pomiędzy RLAN i innymi służbami użytkującymi pasmo 5 GHz, bliższą charakterystykę zawiera punkt 2.2.3, (2003);
- 802.11i [8] norma określająca nowe mechanizmy bezpieczeństwa dla sieci 802.11 związane z rozszerzeniami MAC. Stosuje *Advanced Encryption Standard* (AES) i usprawnia zarządzanie kluczami, uwierzytelnienie użytkowników (802.11x) oraz integralność nagłówków, (2004);
- 802.11j specyfikacja obejmująca japońskie wymagania dotyczące mocy nadajnika RF, trybów pracy, rozmieszczenia kanałów i poziomów emisji niepożądanych, (2004);
- IEEE 802.11n, temat dotyczący zdefiniowanie standardu sieci radiowych o dużych przepływnościach, co najmniej 100 Mbit/s;

W ramach diskutowanego projektu pojawiły się propozycje sięgające 540 Mbit/s. Zakłada się wykorzystanie modulacji OFDM i techniki MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*) ze zwielokrotnionymi odbiornikami i zwielokrotnionymi nadajnikami zarówno w urządzeniach klienckich jak i w punktach dostępu. System jest postrzegany jako standard RLAN następnej generacji. Oczekuje się przyjęcie tego standardu w 2007 r.

- IEEE 802.11p, temat nazwany "WAVE" (*Wireless Access for the Vehicular Environment*), dotyczący radiowego środowiska w samochodach osobowych;
- IEEE 802.11r, temat dotyczący szybkiego roamingu;
- IEEE 802.11s, temat odnoszący się do sieci o strukturze kratowej (*Extended Service Set Mesh Networking*);
- IEEE 802.11T, temat dotyczący metod przewidywania i miar wydajności sieci radiowej.
- IEEE 802.11u, temat dotyczący współpracy z innymi sieciami wg standardów serii 802...
- IEEE 802.11v, temat dotyczący zarządzania sieciami radiowymi.

Dla analizy stanu techniki, która jest celem niniejszej pracy, spośród wymienionych istotne są dokumenty o symbolach: 802.11-1999 – podstawowa norma tej serii, 802.11b i 802.11g jej

rozszerzenia dotyczące usprawnień wykorzystania pasma częstotliwości 2,4 GHz, 802.11a jej rozszerzenie dotyczące wykorzystania pasma częstotliwości 5 GHz oraz 802.11e norma definiująca mechanizmy QoS i 802.11i norma wprowadzająca skuteczniejsze zabezpieczenia sieci.

W normach serii IEEE 802.11, podobnie jak w innych normach dotyczących sieci lokalnych z serii IEEE 802.x, zawarto tylko opisy warstwy fizycznej (*Physical layer, PHY*) oraz warstwy dostępu do medium (*Medium Access Control, MAC*), tj. dwóch najniższych z siedmiu warstw modelu OSI. Przy czym we wszystkich normach 802.11 stosowany jest wspólny protokół MAC, a podstawowe różnice dotyczą realizacji warstwy fizycznej, tab. 1 i rys. 2.

Uwaga. W dalszej części opracowania skoncentrowano się na charakterystykach urządzeń radiowych w wersjach przeznaczonych na rynek europejski, w dokumentach IEEE oznaczanych "ETSI" lub "CEPT", które pod względem liczby i częstotliwości kanałów radiowych oraz maksymalnej mocy nadajnika mogą różnić się od wersji przeznaczonych na rynek USA, w dokumentach IEEE oznaczanych "FCC".

W celu uzyskania szybkości transmisji 11 Mbit/s oraz 5,5 Mbit/s w systemie wg specyfikacji 802.11b-1999 zastosowano modulację nazywaną CCK (*Complementary Code Keying*). Zachowano możliwość pracy z modulacją DSSS z szybkościami transmisji 2 Mbit/s oraz 1 Mbit/s zgodnie ze specyfikacją 802.11. Urządzenia dynamicznie dostosowują szybkość transmisji do właściwości wykorzystywanego kanału radiowego (*Adaptive Rate Selection*) w granicach od 11 Mbit/s do 1 Mbit/s. W rozszerzonej specyfikacji 802.11b-1999 zdefiniowano także dodatkowe tryby pracy – opcje PBCC (*Packet Binary Convolutional Code*), jednak nie zyskały one takiej popularności jak wersja podstawowa. Możliwość korzystania z ogólnie dostępnego pasma częstotliwości, uzyskania szybkości transmisji kilkukrotnie większej niż w pierwotnej wersji standardu i jednocześnie znaczna obniżka cen urządzeń zgodnych z 802.11b-1999 spowodowały bardzo szybki rozwój zastosowań tej technologii w lokalnych sieciach wewnątrz i na zewnątrz budynków.

Warstwę fizyczną systemu 802.11a-1999 zaprojektowano do stosowania w paśmie częstotliwości 5 GHz. Wykorzystanie tego pasma umożliwia uzyskanie większej liczby kanałów radiowych. 802.11a od wersji poprzednich różni się również sposobem modulacji i rozpraszania widma częstotliwości radiowych. Zastosowano technikę OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), dzięki której uzyskano możliwość zwiększenia szybkości transmisji do 54 Mbit/s oraz jednocześnie zwiększenia odporności na zakłócenia odbioru spowodowane propagacją wielodrogową. Podstawowe informacje nt. tej techniki modulacji zawiera punkt 2.2.3.

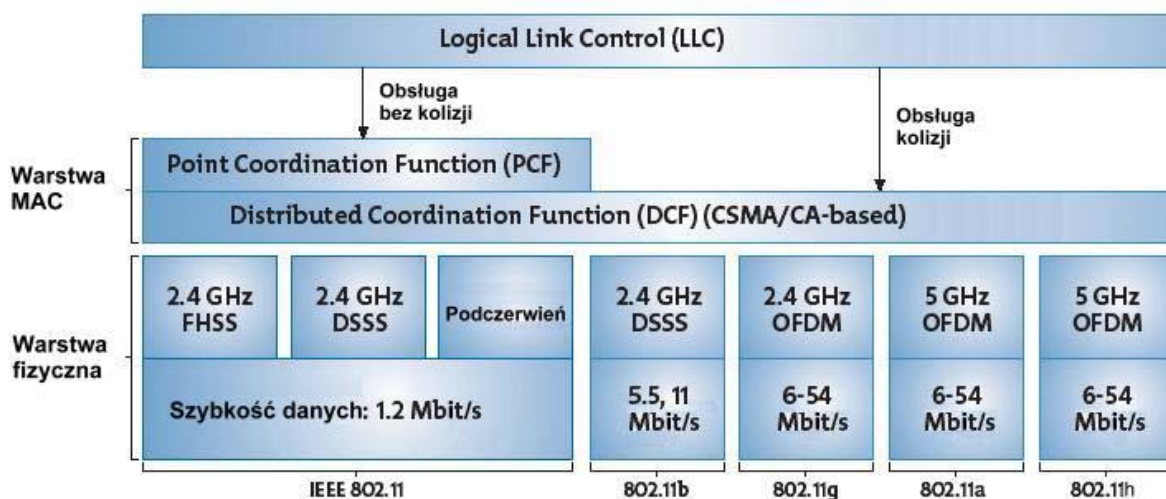
Z kolei w rozszerzeniu standardu o symbolu 802.11g-2003 zdefiniowano warstwę fizyczną z OFDM dla pasma 2,4 GHz z możliwością zachowania kompatybilności wstecz z urządzeniami systemu 802.11b.

W standardzie wersji 802.11h-2003 w porównaniu z 802.11a wprowadzono dodatkowo funkcje dynamicznego wyboru częstotliwości (*Dynamic Frequency Selection, DFS*) i regulacji mocy nadajnika (*Transmitted Power Control, TPC*), wymagane w Europie ze względu na potrzebę współużytkowania pasma częstotliwości z innymi służbami radiokomunikacyjnymi.

Tab. 1: Charakterystyki warstwy fizycznej w normach z serii IEEE 802.11

Wersja normy	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11h
Rozproszenie widma	FHSS; DSSS	DSSS; (CCK)	OFDM	OFDM; DSSS	OFDM
Pasmo częstotliwości [GHz]	2,4	2,4	5	2,4	5
Liczba kanałów Uwaga 1.	3	3	8 + 11 Uwaga 2.	3	8 + 11 Uwaga 2, 3.
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	jak 802.11a

- 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. Z dynamicznym wyborem częstotliwości (DFS) i regulacją mocy nadajnika (TPC).

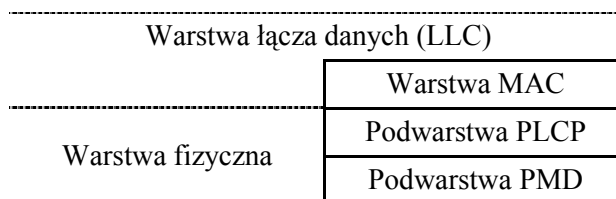


Rys. 2: Warstwy fizyczna i dostępu do medium w normach z serii IEEE 802.11

Warstwa MAC dla wszystkich wymienionych wersji warstwy fizycznej 802.11, ze względu na konieczność sterowania transmisją radiową, różni się od warstwy MAC sieci kablowych opisanej w normie IEEE 802.3 (Ethernetu).

W warstwie fizycznej norm serii 802.11 wyróżnia się dwie podwarstwy, rys. 3:

- podwarstwę fizyczną zależną od medium (*Physical Medium Dependent, PMD*),
- podwarstwę procedury konwergencji warstwy fizycznej (*Physical Layer Convergence Procedure, PLCP*).



Rys. 3: Model odniesienia dla systemów z serii IEEE 802.11

Podwarstwa PMD odpowiada za nadawanie i odbiór danych poprzez medium radiowe między dwoma, lub więcej, urządzeniami pracującymi w tym samym kanale radiowym i używającymi tej samej metody modulacji.

Podwarstwa PLCP dostosowuje możliwości systemu zależne od medium do usług wymaganych od warstwy fizycznej. Definiuje metodę odwzorowania jednostek danych usług podwarstwy fizycznej (*PHY sublayer Service Data Units, PSDU*) w formacie ramek odpowiednim do nadawania i odbioru danych użytkownika. Wskutek istnienia podwarstwy PLCP funkcje warstwy MAC wszystkich systemów 802.11 wymienionych w tab. 1 są w małym stopniu zależne od wersji podwarstwy PMD, czyli od stosowanego zakresu częstotliwości radiowych (pasmo 2,4 GHz lub 5 GHz), techniki modulacji i kodowania (FHSS, DSSS, OFDM).

Norma IEEE 802.11i rozszerza i zastępuje mechanizmy bezpieczeństwa zaprojektowane w warstwie MAC normy 802.11. Ze względu na kompatybilność z tą normą zachowano stosowany poprzednio algorytm kryptograficzny WEP (*Wired Equivalent Privacy*), który jak się okazało ma wiele słabych punktów, lecz ma on obecnie status opcji, której się nie zaleca.

Jako jedno z rozwiązań akceptowano wprowadzony przez Wi-Fi Alliance algorytm WPA (*Wi-Fi Protected Access*). Jego wersją zatwierdzoną przez IEEE nazwa się często WPA2. W 802.11i jako zalecany zastosowano znany z normy 802.1X [10] protokół uwierzytelnienia EAP. Jako sposób zarządzania kluczem i zapewnienia integralności wiadomości wprowadzono protokół nazwany CCMP (oparty na standardowym algorytmie AES), w którym stosuje się dynamiczne negocjacje algorytmu uwierzytelniania i szyfrowania. W protokole tym ważnym elementem procesu uwierzytelniania są cztery etapy wymiany potwierdzeń (*Four-Way Handshake*) pomiędzy stacją ruchoma i punktem dostępu.

Zastosowanie algorytmu WPA2 w starszych urządzeniach RLAN wymaga uaktualnienia wewnętrznego oprogramowania (*firmware*) i/lub sterownika w systemie operacyjnym PC (zwykle dostępne na internetowej stronie producenta).

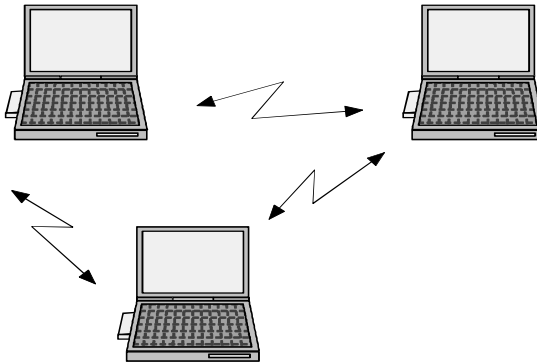
Norma 802.11e, opublikowana w 2005 r., umożliwia definiowanie jakości usług (QoS). Ma istotne znaczenie dla rozszerzenia wykorzystania RLAN zgodnych ze standardami serii 802.11 dla potrzeb aplikacji wrażliwych na opóźnienie, takich jak komunikacja głosowa w radiowej sieci IP (*Voice over Wireless IP, VoWIP*) oraz multimedia. Dotyczy modyfikacji i rozszerzenia funkcji warstwy MAC urządzeń, polegającego na definiowaniu klas priorytetów obsługiwanego ruchu. 802.11e umożliwia realizację wprowadzonej przez Wi-Fi Alliance specyfikacji WMM (*Wi-Fi Multimedia*). WMM wprowadza w sieci RLAN możliwość optymalizacji ich wydajności oraz przyznawania priorytetów, gdy o dostęp do zasobów sieci rywalizuje wiele aplikacji, z których każda ma inne wymagania dotyczące opóźnień i przepływności. Zastosowanie WMM pozwala użytkownikowi sieci domowej lub administratorowi sieci korporacyjnej decydować, który strumień danych jest najważniejszy i przyznawać mu najwyższy priorytet ruchu.

## **2.2. Architektura radiowej sieci lokalnej**

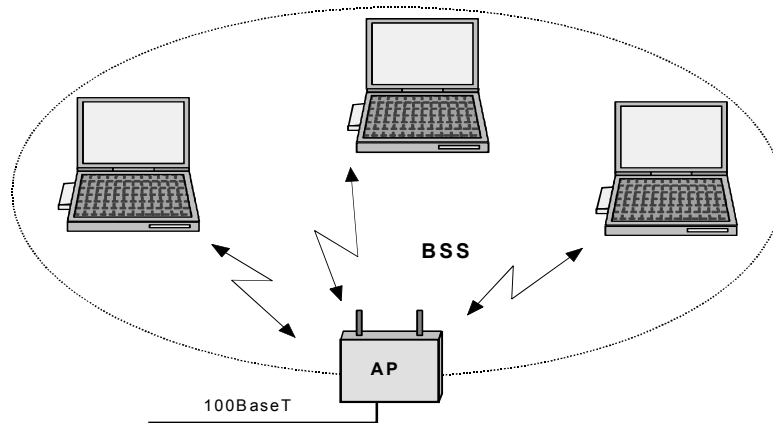
W specyfikacjach z serii 802.11 zakłada się możliwość stosowania dwóch podstawowych konfiguracji sieci radiowej:

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

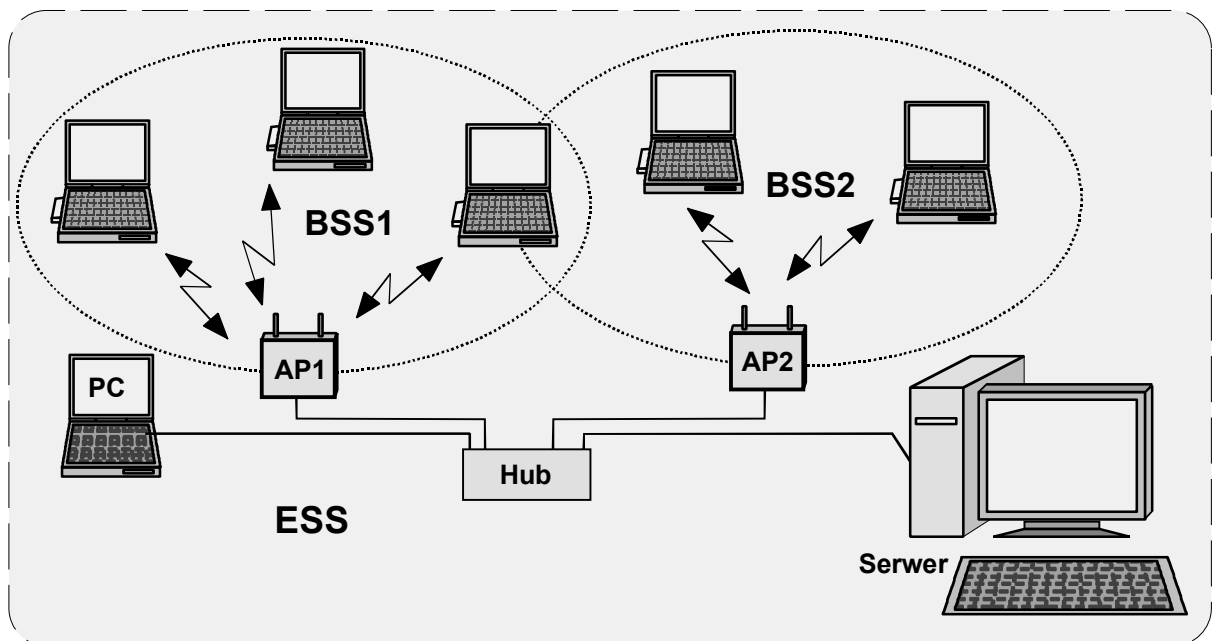
W sieci ad-hoc każde z radiowych urządzeń transmisji danych może komunikować się z dowolnym innym kompatybilnym urządzeniem, które jest w jego zasięgu (sieć peer-to-peer), rys. 4.



Rys. 4: Struktura sieci RLAN zorganizowanej ad-hoc



Rys. 5: Infrastruktura sieci RLAN z jednym punktem dostępu



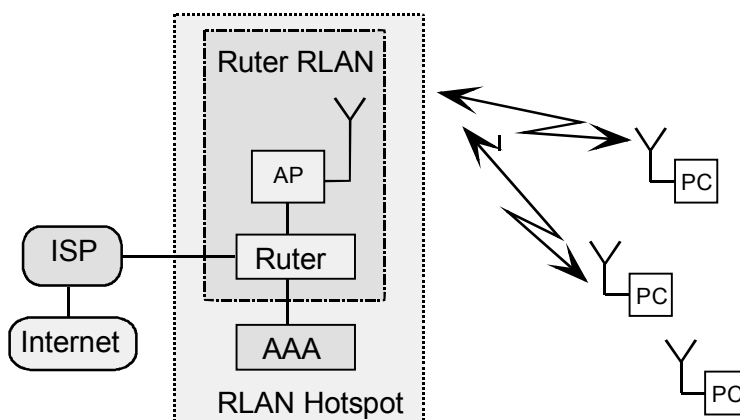
Rys. 6: Infrastruktura sieci RLAN z wieloma punktami dostępu



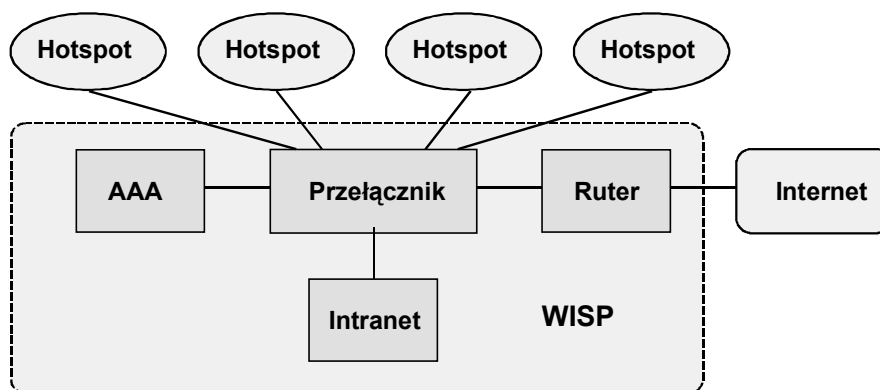
W sieci z infrastrukturą, nazywanej w specyfikacji 802.11 BSS (*Basic Service Set*), są stosowane stacjonarne punkty dostępu (*Access Point, AP*), rys. 5. Wszystkie urządzenia użytkowników sieci (np. stacje robocze, telefony VoIP) muszą znajdować się w zasięgu AP, a komunikują się pomiędzy sobą lub z urządzeniami poza obrębem tej sieci wyłącznie za pośrednictwem AP. AP i wszystkie skojarzone z nim urządzenia użytkowników wykorzystują do nadawania i odbioru ten sam kanał radiowy. Przypadek, gdy RLAN obejmuje więcej niż jeden punkt dostępu, jest nazywany ESS (*Extended Service Set*). W takiej sieci urządzenie użytkownika sieci może komunikować się z każdym AP należącym do ESS, rys. 6.

### 2.3. Hotspot

Hotspot RLAN jest urządzeniem, które umożliwia dostęp do Internetu za pośrednictwem radiowej sieci lokalnej. Hotspot, rys. 7, składa się z rutera RLAN, który z jednej strony ma radiowy punkt dostępu (AP), a z drugiej obsługuje szerokopasmowe połączenie kablowe (np. ADSL) z siecią dostawcy usług internetowych (*Internet Service Provider, ISP*). Za pośrednictwem ISP oferowany jest dostęp do światowej sieci Internet. Obok środków technicznych realizujących dostęp do Internetu ruter może być wyposażony w moduł naliczania opłat realizujący funkcje identyfikacji, autoryzacji i rozliczeń (*Authentication, Authorisation Accounting, AAA*). Dostęp do Internetu może być darmowy lub za opłatą, w tym przypadku dostawca usługi wymaga nazwy użytkownika i hasła, które mogą obowiązywać tylko dla jednego Hotspot i na określony czas.



Rys. 7: Hotspot lokalnego dostawcy Internetu



Rys. 8: Radiowa sieć dostępu do Internetu (WISP)

W przypadku operatora świadczącego usługi internetowe drogą radiową (*Wireless Internet Service Provider, WISP*) kilka hotspot może tworzyć sieć wyposażona w centralną jednostkę AAA, która obsługuje wszystkie hotspot sieci, rys. 8. Użytkownik (abonent usługi) może korzystać na tych samych zasadach z dowolnego hotspot. W sieci WISP rozliczenia są prowadzone centralnie i za okres, np. raz w miesiącu, na podstawie czasu używania lub ilości pobranych danych. Często w ramach promocji usługi wstępny okres jest za darmo.

Ogólnodostępne, lokalne hotspot są instalowane na lotniskach, w hotelach, dworcach i w restauracjach. Dla osób podróżujących istotne jest uzyskiwanie dostępu do RLAN w dowolnym miejscu, bez dodatkowych czynności, = roaming do sieci WISP w innych miejscowościach i krajach i regulacja należności za usługi u własnego operatora.

## **2.4. Sieci kratowe**

Sieć kratowa może być realizowana w oparciu o infrastrukturę i/lub stacje klienckie. Jednakże najkorzystniejsze jest wykorzystanie obu trybów jednocześnie. Szkielet infrastruktury kratowej tworzą stacjonarne punkty dostępowe dołączone do sieci kablowej i stacjonarne routery radiowe.

Radiowe stacje klienckie mogą tworzyć pomiędzy sobą radiowe sieci peer-to-peer nie wymagające żadnej infrastruktury. Tego rodzaju stacje klienckie mogą pośredniczyć w przesyłaniu informacji pomiędzy innymi stacjami klienckimi (przejmują rolę ruterów lub stacji przekąźnikowych).

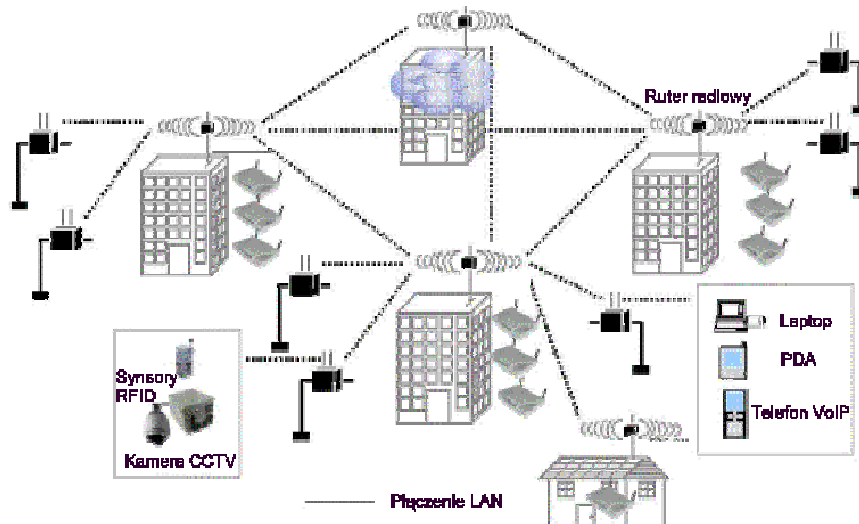
Połączenie w jednej sieci (rys. 9) okablowanych punktów dostępowych, stacjonarnych ruterów radiowych oraz ruchomych stacji klienckich, które mogą przejmować funkcję ruterów, umożliwia stworzenie skalowalnej sieci, w której każda kolejna dołączana stacja kliencka zwiększa pojemność i/lub zasięg sieci.

Wyposażenie urządzeń tego rodzaju sieci w oprogramowanie pozwalające na automatyczną adaptację konfiguracji do aktualnego rozmieszczenia stacji klienckich, pozwala stworzyć sieć odporną na przeciążenia i uszkodzenia węzłów.

Stacje klienckie mogą tworzyć rozległą sieć peer-to-peer praktycznie wszędzie i w dowolnym czasie, bez potrzeby instalowania jakiegokolwiek infrastruktury w miejscu prowadzenia akcji. Technika ta pozwala na tworzenie radiowych sieci LAN lub PAN, również wewnątrz pomieszczeń, w sposób szybki, wg potrzeb, np. w miejscu wypadku. Sieć kratowa może być wykorzystana:

- przez dostawców Internetu do rozszerzenia zakresu usług;
- jako sieć dostarczająca usługi RLAN dla pasażerów komunikacji publicznej;
- przez organizacje zajmujące się bezpieczeństwem i ochroną mienia;
- do monitorowania rejonów zagrożenia za pomocą kamer, czujników itp.;
- podczas organizowanych ad-hoc akcji ratunkowych;
- do lokalizacji i śledzenia osób lub przesyłek;
- do organizowania ruchomej usługi transmisji danych i wideo;
- do szerokopasmowej komunikacji z centrum dyspozytorskim.

Przykładem komercyjnego zastosowania tej koncepcji jest MeshNetworks Enabled Architecture (MEA) firmy Motorola. W rozwiązaniu tym wykorzystano elementy radiowej sieci LAN w paśmie 2,4 GHz. Motorola oferuje maksymalną szybkość 6 Mbit/s wzdłuż trasy pojazdu poruszającego się z szybkością do 180 mil/godz.



Rys. 9: Przykład wykorzystania sieci kratowej

## 2.5. Wielodostęp

We wszystkich systemach zgodnych ze standardami 802.11 jako protokół dostępu do medium zastosowano protokół 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. Brak potwierdzenia odbioru pakietu stanowi dla stacji nadającej informację, że nastąpiła kolizja z transmisją innej stacji. Jeżeli stacja jest skonfigurowana w ten sposób, że powinna uzyskać potwierdzenie każdego przesłanego pakietu, podejmuje kolejną próbę nadawania (retransmisji) nieodebranej ramki. Dodatkowo, oprócz wymiany ramek z potwierdzeniem, aby zmniejszać prawdopodobieństwo kolizji podczas długich transmisji, zdefiniowano opcjonalną sygnalizację gotowości do nadawania i potwierdzanie odbioru. Urządzenie, które uzyskuje możliwość nadawania najpierw wysyła krótką wiadomość sygnalizującą gotowość do nadawania RTS (*Ready To Send*), a urządzenie do którego wiadomość jest adresowana odpowiada komunikatem CTS (*Clear To Send*). Po jego odebraniu urządzenie inicjujące sesję komunikacji może nadawać dane, a urządzenie odbierające powinno potwierdzić odbiór każdego pakietu.

Stosowane wymiany wiadomości RTS / CTS zwiększają odporność protokołu warstwy MAC w środowisku, w którym obok siebie funkcjonuje wiele urządzeń radiowych. Przy zastosowaniu tego mechanizmu kolizja jest wykrywana po wymianie krótkich komunikatów RTS/CTS, a nie po zakończeniu transmisji długiego pakietu.

Wymiana wiadomości RTS / CTS jest konieczna w przypadku problemu tzw. "ukrytego węzła" (*hidden node*), który występuje, gdy urządzenia radiowe użytkowników sieci są od siebie dostatecznie daleko, np. po przeciwnych stronach obszaru zasięgu punktu dostępu, albo są oddzielone jakąś przeszkodą tak, że wzajemnie nie wykrywają swojej transmisji.

Urządzenia, które są wzajemnie ukryte, błędnie oceniają, że kanał jest wolny, podejmują próby transmisji, powodując kolizje z transmisją innego urządzenia. Ukryte węzły mogą być przyczyną bardzo częstych kolizji. Jednakże wymiana RTS / CTS ma sens tylko w sieciach o dużym ruchu, w których są przewidywane długie sesje transmisji przez poszczególne stacje. W przeciwnym wypadku czas oszczędzony wskutek uniknięcia kolizji będzie tracony na wymianę komunikatów RTS / CTS.

W specyfikacji systemu 802.11 zdefiniowano cztery typy odstępu między ramkami (*Inter Frame Space, IFS*):

- krótki IFS (*Short IFS, SIFS*),
- IFS punktu koordynującego (*Point Coordination Function IFS, PIFS*),
- zdecentralizowany IFS (*Distributed (Coordination Function) IFS, DIFS*),
- rozszerzony IFS (*Extended IFS, EIFS*).

IFS określa minimalny czas, jaki urządzenie powinno oczekiwać zanim oceni, że medium jest wolne. Im mniejszy IFS, tym większy priorytet. W przypadku kolizji w konkurowaniu do medium jest stosowany algorytm z wykładniczo ustalonym czasem zakazu nadawania.

Standardowy protokół 802.11 oferuje niewielkie możliwości (opcje) definiowania zasad dostępu do medium. W specyfikacji tej, dla obsługi ruchu wrażliwego na parametry czasowe transmisji, zaprojektowano funkcję koordynacji dla punktu dostępowego (*Point Coordination Function, PCF*), która działa w sposób deterministyczny. AP obsługujący tę funkcję odpytuje urządzenia klienckie i rezerwuje medium dla transmisji zorganizowanych wg określonego harmonogramu. Jednakże opcja ta nie zyskała jak dotąd szerszego uznania i przeważnie cały ruch w sieci jest traktowany tak samo.

Podstawowy protokół MAC ze specyfikacji 802.11 nie obejmuje możliwości definiowania jakości usług (*Quality of Service, QoS*). W rzeczywistości różne rodzaje ruchu wymagają / dopuszczają różne wartości opóźnień i utraty pakietów. Wprowadzenie QoS staje się konieczne dla przypadków, gdy sieć jest wykorzystywana do transmisji głosu, wideo lub innych aplikacji wymagających przesyłania danych z małym i zdefiniowanym opóźnieniem.

W celu uzupełnienia tej luki opisywaną serią norm IEEE uzupełniono dokumentem 802.11e [9]. Protokół 802.11e pozwala zróżnicować wymagania i uzależnia udostępnianie medium od rodzaju ruchu.

W warstwie MAC 802.11e, w celu definiowania jakości usług (QoS), dodano nową funkcję dla koordynacji ruchu w sieci: *Hybrid Coordination Function (HCF)*, działającą w dwóch trybach:

- EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*),
- HCCA (*HCF Controlled Channel Access*).

EDCA jest rozszerzeniem oryginalnej, podstawowej procedury dostępu, która zapewnia zróżnicowanie dostępu do zasobów radiowych poprzez zmiany: czasu, w którym stacja obserwuje, czy kanał jest wolny, czasu, w którym jest wyłączona oraz czasu, w którym po uzyskaniu dostępu do medium stacja może nadawać.

W HCCA usunięto znane niedogodności wcześniejszego protokołu PCF. Jeżeli wymagane jest przesyłanie danych wrażliwych na opóźnienie, AP przejmuje sterowanie dostępem do medium i wysyła zapytania QoS do stacji klienckich oczekując krótki czas pomiędzy transmisjami.

## **2.6. Techniki rozpraszania widma sygnału radiowego**

Techniki modulacji z widmem rozproszonym (*Spread Spectrum*) definiuje się jako techniki, w których:

- szerokość pasma sygnału nadawanego jest znacznie większa niż szerokość pasma wiadomości, która ma być nadana;

oraz

- szerokość pasma sygnału nadawanego jest określona przez szerokość pasma wiadomości, która ma być nadana i pomocniczy sygnał zwany kodem rozpraszającym.

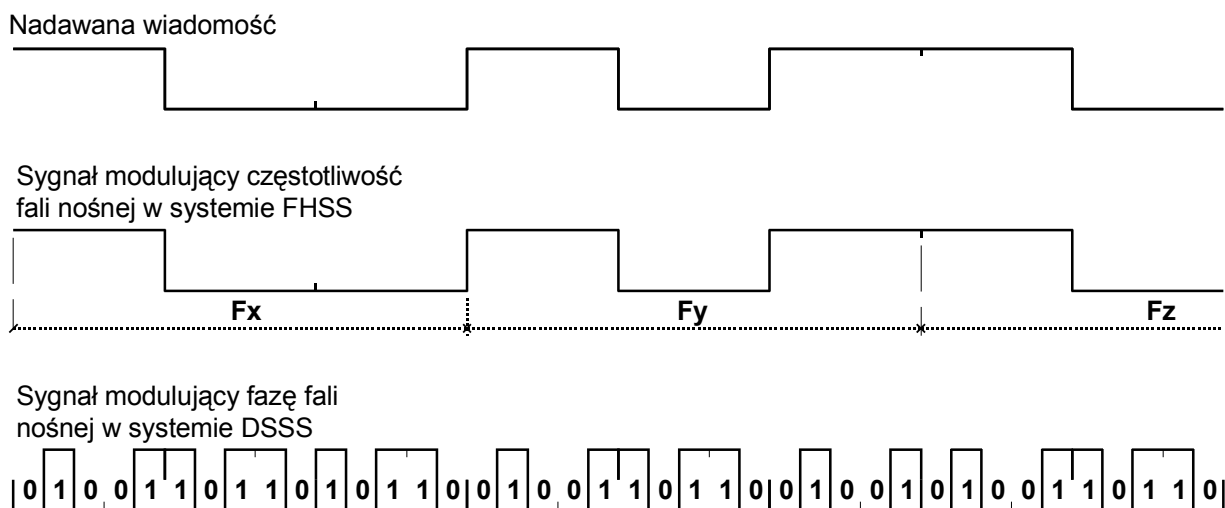
W technikach modulacji z rozproszonym widmem, na skutek nadawania energii wiadomości w paśmie częstotliwości znacznie szerszym niż wymagane minimum, uzyskuje się dwie korzystne cechy sygnału radiowego: małą gęstość mocy w odniesieniu do jednostki pasma i redundancję.

Mała gęstość mocy sygnału radiowego wynika z faktu, że energia sygnału jest rozpraszana w szerokim paśmie, a wskutek tego energia przypadająca na jednostkę pasma jest mała. Sygnał o charakterze zbliżonym do szumu i małej gęstości mocy w mniejszym stopniu zakłóca działanie innych systemów pracujących w tym samym zakresie częstotliwości. Jest to cecha wymagana w przypadku systemów, które mają być używane powszechnie.

Redundancja odnosi się do faktu, że wiadomość może być wysłana równocześnie na różnych częstotliwościach i odtworzona mimo występowania zakłóceń (np. selektywnego zaniku fali) w części wykorzystywanego zakresu częstotliwości.

Zasady transmisji danych wykorzystujące modulację z rozpraszaniem widma w systemach FHSS i DSSS zobrazowano na rys. 10. Na modulację z rozpraszaniem widma składają się dwa procesy: rozpraszanie widma i modulacja danymi wiadomości.

W przypadku systemu FHSS częstotliwość fali nośnej jest zmieniana skokowo w regularnych odstępach czasu. W przykładzie (dla ilustracji) założono, że czas przebywania na jednej częstotliwości (*dwelt time*) reprezentuje czas trzech bitów wiadomości. Częstotliwość fali nośnej jest periodycznie zmieniana. Częstotliwości kolejnych fal nośnych wytwarzanych przez nadajnik na rysunku oznaczono:  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , ... Modulacja fali nośnej polega na kluczowaniu częstotliwości aktualnie wytwarzanej fali nośnej (FSK) i powoduje generację wąskopasmowego sygnału na tej nośnej. Kodem rozpraszającym jest lista częstotliwości, które może mieć fala nośna – ciąg FH. Widmo tego rodzaju sygnału, obserwowane w czasie dłuższym niż okres ciągu FH, zajmuje szerokie pasmo i nie musi być ciągłe, co pozwala na "omijanie" częstotliwości, na których występują zakłócenia.



Rys. 10: Sygnały modulujące falę nośną w systemie z rozpraszaniem widma

Redundancja modulacji w systemie FHSS polega na możliwości retransmisji zakłóconej wiadomości na innej częstotliwości w jednym z kolejnych skoków.

W przypadku systemu DSSS częstotliwość fali nośnej jest stała, a każdy bit wiadomości jest zastępowany ciągiem bitów utworzonych metodą sumowania modulo dwa bitów wiadomości z bitami ciągu rozpraszającego, w celu podkreślenia różnicy między elementami tego ciągu a bitami wiadomości nazywanymi "chips". Następnym tego jest zastąpienie każdego bitu oryginalnej wiadomości ciągiem "chips". Przy czym dla potrzeb transmisji radiowej bit "0" wiadomości jest zastępowany ciągiem identycznym z ciągiem rozpraszającym, a bit "1" wiadomości jest zastępowany inwersją tego ciągu bitów. Ciąg utworzony tym sposobem moduluje fazę (PSK) fali nośnej. W przykładzie (dla ilustracji) założono, że ciąg rozpraszający składa się z pięciu bitów: 10110....

Redundancja modulacji w systemie DSSS polega na tym, że bit wiadomości jest kodowany w wielu bitach kodu rozpraszającego. Nawet jeżeli pojedyncze bity tego kodu zostaną zakłócone, odbiornik rozpoznaje ciąg albo jako "dostatecznie bliski 0", albo jako "dostatecznie bliski 1" i może podjąć właściwą decyzję.

#### **2.6.1. Charakterystyka systemu FHSS wg normy 802.11**

W normie IEEE 802.11 [1] modulację FHSS zdefiniowano w zbiorze 79 częstotliwości nośnych, wyznaczonych co 1 MHz w zakresie od 2402 MHz do 2480 MHz.

Każda z tych nośnych jest modulowana metodą GFSK (*Gaussian FSK*), z szerokością pasma 1 MHz. W standardzie przewidziano dwie szybkości transmisji: 1 Mbit/s i 2 Mbit/s.

W zbiorze 79 częstotliwości nośnych zdefiniowano 78 ciągów skoków częstotliwości, każdy wykorzystujący 79 częstotliwości, zgrupowanych w trzech podzbiorach po 26 ciągów. Ciągi z tego samego podzbioru odznaczają się minimum prawdopodobieństwa kolizji i mogą być przydzielone dla systemów o wspólnej lokalizacji. Teoretycznie 26 systemów może istnieć na tym samym obszarze. Jednak w praktyce, ze względu na liczbę kolizji, liczbę niesynchronizowanych systemów w jednej lokalizacji ogranicza się do ok. 12. Dodatkowym czynnikiem, który należy tu brać pod uwagę, jest minimalne odstrojenie pomiędzy chwilowymi częstotliwościami różnych systemów. Ze względu na selektywność odbiorników odstrojenie powinno być rzędu 6 MHz.

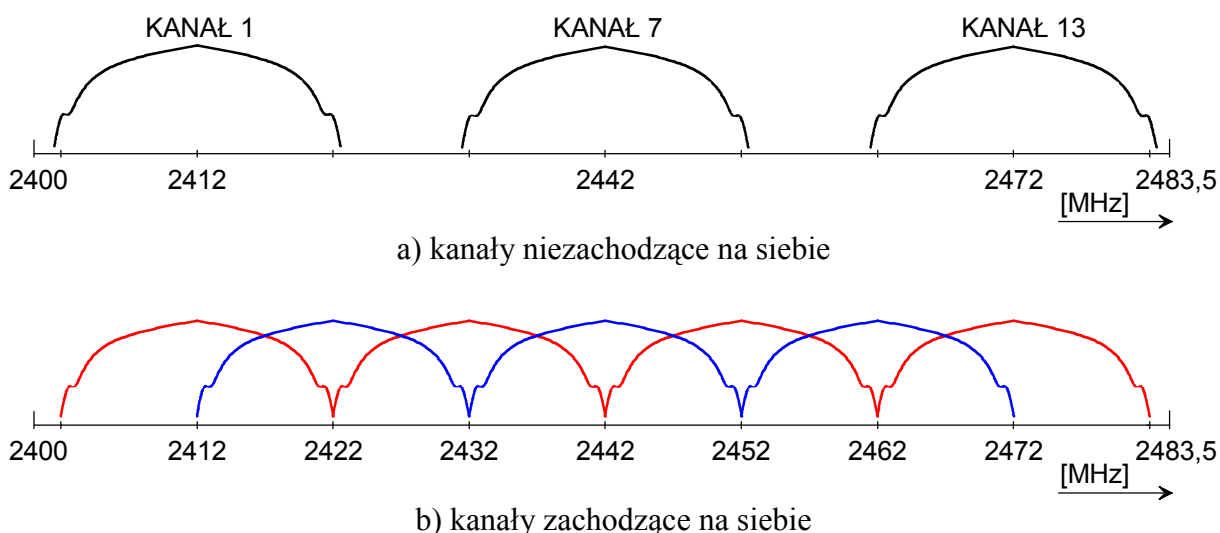
Urządzenia zgodne z systemem 802.11 FHSS zyskały znaczną popularność pod koniec lat dziewięćdziesiątych. Mimo wielu zalet, takich jak możliwość zastosowania kilkunastu systemów na jednym obszarze, odporność na zaniki i wąskopasmowe zakłócenia, głównie ze względu na ograniczoną do 2 Mbit/s szybkość transmisji danych, zostały wyparte przez urządzenia zgodne z systemem 802.11b.

#### **2.6.2. Charakterystyki systemu DSSS wg norm 802.11 i 802.11b**

W specyfikacjach 802.11 i 802.11b znamionowe częstotliwości fal nośnych  $F_c$  wyznaczono z odstępem 5 MHz wg zależności (dotyczy środkowej częstotliwości kanału):  $F_c = 2407 + n \times 5$  [MHz], gdzie  $n$  jest numerem kanału. Nie określono szerokości pasma zajmowanego przez nadajnik, lecz szablon ograniczający poziom emisji pozapasmowych. Szablon ten jest zdefiniowany względem maksimum energii sygnału na poziomie  $-30$  dB przy odstrojeniu poza  $\pm 11$  MHz względem częstotliwości znamionowej  $F_c$  i na poziomie  $-50$  dB przy odstrojeniu poza  $\pm 22$  MHz.

Z wymagań tych wynika faktyczne ograniczenie liczby kanałów możliwych do jednoczesnego wykorzystywania (niezachodzących na siebie) w systemie DSSS wg 802.11b. Przyjmuje się, że zmodulowany sygnał zajmuje pasmo kanału o szerokości 22 MHz. Z tych względów:

- w USA zaleca się wykorzystywanie kanałów:  
n = 1 (2412 MHz), 6 (2437 MHz), 11 (2462 MHz) – trzech niezachodzących na siebie,  
lub opcjonalnie: 1 (2412 MHz), 3 (2422 MHz), 5 (2432 MHz), 7 (2442 MHz),  
9 (2452 MHz), 11 (2462 MHz) – sześciu zachodzących na siebie;
- w Europie, w tym także w Polsce, zaleca się wykorzystywanie kanałów:  
n = 1 (2412 MHz), 7 (2442 MHz), 13 (2472 MHz) – trzech niezachodzących na siebie,  
lub opcjonalnie: 1 (2412 MHz), 3 (2422 MHz), 5 (2432 MHz), 7 (2442 MHz),  
9 (2452 MHz), 11 (2462 MHz), 13 (2472 MHz) – siedmiu zachodzących na siebie, rys. 11.



Rys. 11: Europejskie kanały urządzeń zgodnych z normą IEEE 802.11b

W podstawowej normie IEEE 802.11-1999 dla interfejsu radiowego DSSS zdefiniowano dwie szybkości transmisji 1 Mbit/s i 2 Mbit/s. Przy 1 Mbit/s stosuje się binarne różnicowe kluczowanie fazy (DBPSK). Przy 2 Mbit/s stosuje się kwadraturowe różnicowe kluczowanie fazy (DQPSK). Do rozpraszania widma przy tych szybkościach transmisji stosuje się ciąg 11-chipów (tzw. *Barker code*: +1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1) o szybkości (*chipping rate*) 11 Mchip/s.

W normie rozszerzonej IEEE 802.11b-1999 zdefiniowano dwie dodatkowe szybkości transmisji 5,5 Mbit/s i 11 Mbit/s. Szybkość ciągu rozpraszającego wynosi 11 Mchip/s. Lecz ciąg jest tworzony z kodów komplementarnych (*Complementary Codes, CCK*) o długość 8 chip.

Teoretycznie w przypadku DSSS wspólna lokalizacja wielu systemów (kolokacja) pracujących w tym samym kanale radiowym mogłaby polegać na użyciu różnych ciągów rozpraszających (kodów) dla każdego aktywnego systemu, czyli na wykorzystaniu zasady wielodostępu CDMA (*Code Division Multiple Access*), pod warunkiem ortogonalności zastosowanych ciągów rozpraszających. W takiej sytuacji każdy odbiornik dekodowałby tylko informację dla niego przeznaczoną (odbiornik i nadajnik jednego systemu stosują ten sam kod). Innymi słowy CDMA jest rozwiązaniem problemu kolokacji systemów DSSS, ale pod warunkiem dostępności wielu ortogonalnych pseudolosowych ciągów rozpraszających widmo. Liczba istniejących ciągów ortogonalnych jest ściśle związana z długością ciągu (liczbą "chipów" w ciągu), tab 2.

Tab 2: Teoretyczna liczba możliwych kolokacji systemu DSSS

Długość ciągu [bit]	Liczba ciągów ortogonalnych
15	2
31	6
63	6
255	16
1023	60

Z tablicy tej wynika, że w celu kolokacji np. do 16 systemów DSSS należałoby stosować ciąg rozpraszający o długości 255 bitów.

Jednakże, jeżeli szybkość przesyłania wiadomości ma być 1 Mbit/s, lub większa, to stosowanie techniki DSSS z ciągiem rozpraszającym o długości 255 bitów oznaczałoby konieczność transmisji drogą radiową z szybkością 255 Mbit/s. To przy szerokościach dostępnych kanałów radiowych i wymaganiach dotyczących odporności na opóźnienia sygnału RF sprawia, że zastosowanie wielodostępu CDMA jest nierealne.

Ponieważ w systemie DSSS zdefiniowanym w normie 802.11 jest używany ciąg rozpraszający o długości 11 bit, dlatego zastosowanie wielodostępu kodowego CDMA jest niemożliwe, a kolokacja musi polegać na przydzielach osobnych kanałów radiowych. Dla transmisji z ciągiem rozpraszającym 11 Mbit/s konieczne jest pasmo o szerokości 22 MHz.

Biorąc pod uwagę nierealizowalność "idealnego" procesu modulacji w rzeczywistości należy zakładać potrzebę zwiększenia szerokości pasma rezerwowanego dla każdego systemu o odstępy ochronne, rys. 11 a). Z tego względu w zakresie  $2400 \div 2483,5$  MHz można wyznaczyć maksimum trzy niezachodzące na siebie kanały radiowe dla systemów DSSS, np. dla trzech punktów dostępu. Jeżeli zastosowane kanały nakładają się na siebie, to zachowanie każdego z systemów będzie zależne od mocy zakłóceń przypadających na pasmo jego odbiornika.

Uwaga. W normie 802.11b-1999 zdefiniowano również opcję DSSS tzw. PBCC, polegającą na wykorzystaniu binarnego 64-stanowego kodu splotowego (*Binary Convolutional Code, BCC*), która pozwala uzyskać szybkość transmisji do 22 Mbit/s, jednakże nie zyskała ona większej popularności. Urządzenia obsługujące ten protokół oferuje m.in. firma D-Link.

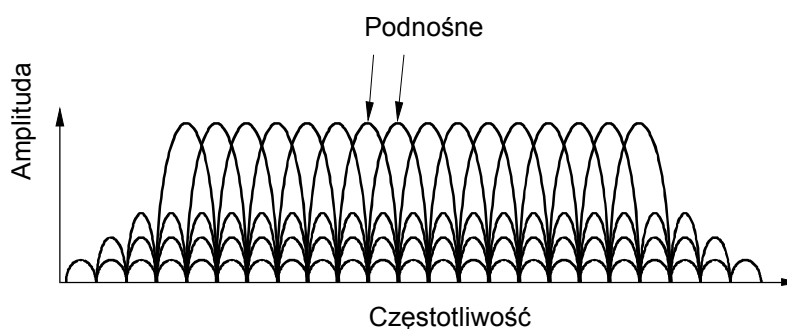
Urządzenia zgodne z systemem 802.11b stanowią obecnie najliczniejszą grupę spośród oferowanych na rynku. Stopniowo są wypierane przez urządzenia zgodne z systemem 802.11g.

### 2.6.3. Charakterystyki systemu OFDM wg norm 802.11a i 802.11g

Sposób rozpraszania widma i modulacji zastosowany najpierw w normie IEEE 802.11a [2], a następnie w specyfikacjach IEEE 802.11g [6] i IEEE 802.11h [7], polega na rozłożeniu strumienia danych na wiele osobnych elementów, którymi moduluje się ortogonalne podnośne (ortogonalność ma na celu eliminację wzajemnych zakłóceń pomiędzy tak wytworzonymi sygnałami), rys. 12. Ze względu na to, że szybkość przesyłania danych na każdej z podnośnych stanowi ułamek całkowitej szybkości transmisji urządzenia, czas trwania pojedynczego bitu modulującego podnośną jest odpowiednio wielokrotnie większy niż czas bitu wiadomości oryginalnej i jest znacznie większy niż dyspersja czasu opóźnienia transmisji spowodowana wielodrogową propagacją fali radiowej. W ten sposób zmiany warunków propagacji wskutek wielokrotnych odbić sygnału i selektywny zanik pojedynczych podnośnych degradują jedynie część strumienia przesyłanych danych. W celu uzyskania



kompromisu pomiędzy wysoką efektywnością modulacji (wyrażaną liczbą bitów / Hz), a odpornością transmisji radiowej na zakłócenia, dla modulacji podnośnych OFDM wprowadzono możliwość stosowania różnych rodzajów modulacji (tab. 3): amplitudowej 64-QAM (6 bitów na symbol modulacji), 16-QAM (4 bity na symbol modulacji) lub fazowej QPSK (2 bity na symbol modulacji), BPSK (1 bit na symbol modulacji) oraz różne stopnie spłotowego kodowania nadmiarowego (1/2, 2/3, 3/4) do korekcji błędów transmisji. Urządzenia zgodne ze specyfikacją 802.11a/g analizując jakość odbioru dobierają największą z możliwych szybkości transmisji.



Rys. 12: Struktura widma sygnału OFDM

Proces modulacji OFDM jest realizowany przy zastosowaniu odwrotnej transformaty Fouriera (IFFT), zaś demodulacji przy zastosowaniu transformaty Fouriera (FFT). Dla transformaty stosuje się następujące parametry:

- częstotliwość próbkowania 20 MHz w 64 punktach,
- długość ramki OFDM 80 chips, z tego 64 chips dla danych, a 16 przeznaczono na prefiks.

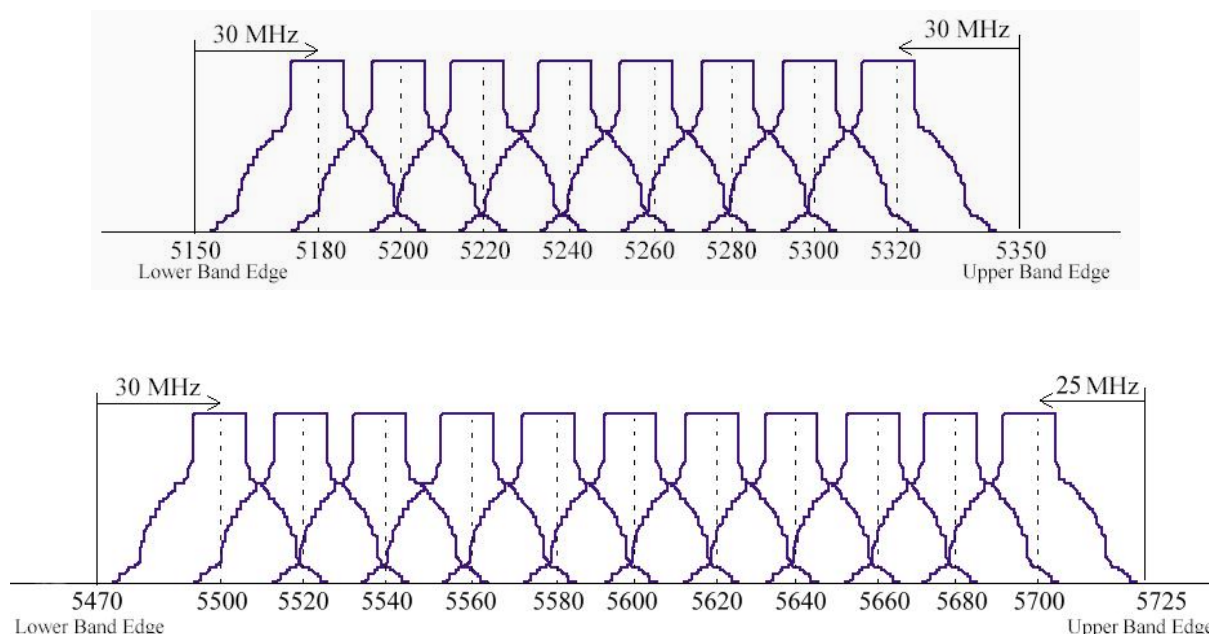
Podstawowe charakterystyki sygnału OFDM stosowanego w systemach 802.11a/g/h są następujące:

- liczba podnośnych dla danych: 48;
- liczba podnośnych sygnałów pilota: 4;
- łączna liczba podnośnych: 52,  
(z 64 teoretycznie możliwych – pozostałe 12 nie jest wykorzystywane);

Uwaga. Podnośne o numerach: -26 do -22, -20 do -8, -6 do -1, 1 do 6, 8 do 20, 22 do 26 są modulowane sygnałem danych, a podnośne: -21, -7, 7, 21 tzw. sygnały pilotujące, są używane do detekcji ramki, oszacowania offsetu częstotliwości fali nośnej i oceny kanału. Podnośna "0", o częstotliwości fali nośnej, jest pomijana.

- odstęp częstotliwości między podnośnymi: 0,3125 MHz (20 MHz / 64),  
odpowiadający w dziedzinie czasu impulsowi prostokątnemu o szerokości 3,2  $\mu$ s;
- czas trwania pojedynczego symbolu BPSK-OFDM: 4,0  $\mu$ s.

Zespolony sygnał OFDM wytwarzany w paśmie podstawowym jest przesuwany drogą przemiany częstotliwości na odpowiednią częstotliwość radiową pasma 5 GHz (system 802.11a), rys. 13, lub pasma 2,4 GHz (system 802.11g).



Rys. 13: Kanały radiowe (wersja ETSI) systemu OFDM wg normy IEEE 802.11a

W Europie dla radiowych sieci lokalnych w paśmie 5 GHz zarezerwowano podzakresy częstotliwości: od 5150 MHz do 5250 MHz, od 5250 MHz do 5350 MHz oraz od 5470 MHz do 5725 MHz. Korzystając z publikacji zagranicznych dotyczących RLAN pracujących w paśmie 5 GHz należy pamiętać, że przepisy dotyczące wykorzystania tego pasma w Europie, por. punkt 3.2, różnią się znacznie od stosowanych w USA.

Znamionowe częstotliwości kanałów radiowych w paśmie 2,4 GHz używanych w systemie 802.11g są takie same, jak w przypadku systemu 802.11b, por. rys. 11.

Tab. 3: Charakterystyki modulacji sygnału OFDM

Szybkość danych [Mbit/s]	Rodzaj modulacji podnośnych	Współczynnik kodu (R)	Liczba bitów kodowanych na podnośną ( $N_{BPSC}$ )	Liczba bitów kodowanych na symbol OFDM ( $N_{CBPS}$ )	Liczba bitów danych na symbol OFDM ( $N_{DBPS}$ )
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Z tab. 3 wynika, że:

- w wersji 6 Mbit/s w procesie kodowania i modulacji bity danych są grupowane po 24 bity, każda grupa jest przekształcana w symbol OFDM zawierający 48 bitów (jest stosowany splotowy kod nadmiarowy umożliwiający korekcję błędów), każdy z symboli jest nadawany na jednej z 48 podnośnych z modulacją BPSK (1 bit na symbol) przy szybkości 250 kHz;  
24 bity danych  $\times$  250 kHz  $\Rightarrow$  6 Mbit/s. Czas przesłania 1472 bajtów jest równy 2012  $\mu$ s.

- w wersji 9 Mbit/s bity danych są grupowane po 36 bitów, każda grupa jest przekształcana w symbol OFDM zawierający 48 bitów, każdy z symboli jest nadawany z modulacją BPSK (1 bit na symbol) przy szybkości 250 kHz;  
 $36 \text{ bitów danych} \times 250 \text{ kHz} \Rightarrow 9 \text{ Mbit/s}$ . Czas przesłania 1472 bajtów jest równy 1344  $\mu\text{s}$ .

... itd.

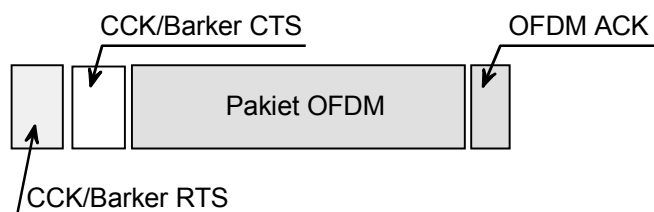
- w wersji 54 Mbit/s bity danych są grupowane po 216 bitów, każda grupa jest przekształcana w symbol OFDM zawierający 288 bitów, każdy z symboli jest nadawany z modulacją 64-QAM przy szybkości 250 kHz;  
 $216 \text{ bitów danych} \times 250 \text{ kHz} \times 6 \text{ bitów} \Rightarrow 54 \text{ Mbit/s}$ .  
Czas przesłania 1472 bajtów jest równy 224  $\mu\text{s}$ .

W systemie 802.11a/g szybkość transmisji danych na każdej podnośnej jest proporcjonalnie mniejsza w porównaniu z systemem, w którym dane są przesyłane na jednej fali nośnej RF, takim jak 802.11b. Umożliwia to wielokrotne zwiększenie czasu pojedynczego symbolu modulacji OFDM, a w konsekwencji zwiększa odporność transmisji na skutki propagacji wielodrogowej, por. punkt 1.4.

System 802.11g różni się od 802.11a nie tylko zakresem częstotliwości RF. W przypadku 802.11g założono konieczność kompatybilności wstecz z urządzeniami systemu 802.11b. Każdy AP i każde urządzenie użytkownika sieci może zmienić tryb pracy z OFDM na DSSS. W ten sposób w paśmie 2,4 GHz "nowe" terminale użytkowników, zgodne z 802.11g, mogą być obsługiwane przez "starą" infrastrukturę, zgodną z 802.11b, a "nowa" infrastruktura może obsługiwać "stare" i "nowe" terminale.

Ze względu na to, że urządzenia 802.11b nie wykrywają obecności radiowego sygnału OFDM, w systemie 802.11g, w którym dopuszcza się używanie urządzeń 802.11b, konieczne jest wykorzystanie sygnałów RTS / CTS nadawanych w trybie DSSS. Zatem każdy terminal, który zamierza nadawać dane najpierw wysyła komunikat RTS w trybie zgodnym z 802.11b. Sygnał ten odbierają: punkt dostępu (AP) i niektóre terminale. W odpowiedzi AP posyła komunikat CTS w trybie zgodnym z 802.11b, który odbierają wszystkie terminale w sieci. Następnie terminal, który zainicjował komunikację, nadaje pakiet w trybie OFDM, a AP potwierdza odbiór także w trybie OFDM, por. rys. 14.

Nadmiar związany z tą dodatkową transmisją powoduje zauważalne zmniejszenie przepustowości w komórce 802.11g pracującej w trybie kompatybilnym z 802.11b.



Rys. 14: System 802.11g wymiana pakietów w trybie zgodnym z 802.11b

Wielu producentów oferuje urządzenia pracujące w dwóch pasmach częstotliwości:

- w paśmie 5 GHz zgodne ze standardem 802.11a,
- w paśmie 2,4 GHz zgodne ze standardem 802.11g/b.

#### 2.6.4. Wersje niestandardowe

Niektórzy producenci zestawów układów scalonych do stosowania w sprężeniu RLAN oferują niestandardowe rozwiązania firmowe bazujące na technologii OFDM wykorzystywanej

w standardach IEEE. Np. firma Atheros Communications ma własne rozwiązanie "Super G", które może być wykorzystywane w punktach dostępu i kartach PC. Formując sygnał OFDM zajmujący pasmo wszystkich kanałów radiowych w paśmie 2,4 GHz, uzyskano możliwość zwiększenia szybkości transmisji do 104 Mbit/s i jednocześnie ok. czterokrotnie zasięgu transmisji. Podobne rozwiązanie pod nazwą handlową "AfterBurner" oferuje również firma Broadcom Corporation.

#### **2.6.5. Znak "Wi-Fi"**

Ze względu na to, że IEEE ustanawia standardy, często z możliwością wyboru opcji, ale nie bada zgodności z tymi standardami, istnieje potrzeba weryfikacji zgodności. Stowarzyszeniem, które stawia sobie za cel certyfikację interoperacyjności produktów RLAN wykorzystujących specyfikacje serii 802.11x, w tym również wprowadzanych ostatnio usprawnień odnoszących się do bezpieczeństwa dostępu: Wi-Fi Protect Access (WPA) zawartych w normie 802.11i oraz jakości usług: Wi-Fi Multimedia Enhancements (WME) zawartych w normie 802.11e jest Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) Alliance, nazywane także WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), patrz <http://www.wi-fi.org/>.

Oznakowanie "Wi-Fi" polega na badaniach zgodności ze specyfikacją opłacanych przez zainteresowanych producentów. Tym samym znak certyfikacji Wi-Fi ma poświadczać zgodność protokołów (warstwy fizycznej i MAC) ze specyfikacjami IEEE i gwarantować, że zakupiony produkt będzie poprawnie współpracował z innymi w ten sposób badanymi i oznakowanymi produktami.

### **2.7. Architektura urządzeń**

Jak wspomniano wcześniej różnice pomiędzy systemami transmisji danych zdefiniowanymi w normach serii 802.11 dotyczą warstwy fizycznej i polegają na stosowaniu różnych sposobów modulacji i rozpraszania widma (FHSS, DSSS, OFDM) i różnych zakresów częstotliwości (pasmo 2,4 GHz i/lub 5 GHz).

W radiowych sieciach lokalnych (RLAN) występują dwa podstawowe rodzaje urządzeń:

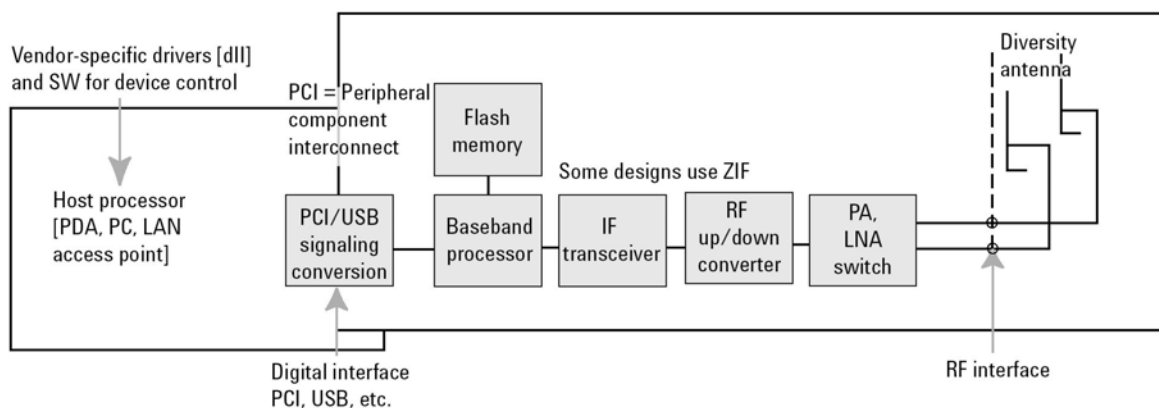
- punkty dostępu (AP), nazywane czasem stacjami bazowymi, zwykle dołączone do kablowej sieci lokalnej (LAN),

oraz

- stacje robocze użytkowników (klientów sieci) komunikujące się z AP w obrębie ich zasięgów radiowych.

Należy podkreślić, że wszystkie urządzenia funkcjonujące w sieci systemu 802.11 wykorzystują do nadawania i odbioru ten sam, wspólny sieciowy kanał radiowy (dupleks w dziedzinie czasu). Tym samym czas wykorzystania tego kanału musi być współdzielony pomiędzy AP i wszystkie aktywne stacje użytkowników, a w danym momencie może nadawać tylko jedno urządzenie: AP lub jedna ze stacji roboczych.

Z punktu widzenia projektanta urządzeń radiowych oznacza to, że pod względem sprzętowym (*hardware*) zespoły radiowe wbudowane do AP i do stacji użytkowników mogą być takie same, a różnice sprowadzają się do funkcji realizowanych programowo (*software*). Schemat blokowy uniwersalnego modułu radiowego RLAN przedstawiono na rys. 15.



Rys. 15: Schemat blokowy typowego modułu RLAN

Moduł radiowy jest dołączany do jednostki głównej (host processor), którą może być np. PC (biurkowy lub laptop), PDA lub punkt dostępu, za pośrednictwem interfejsu jednego ze standardów stosowanych w technice komputerowej, takiego jak PCI, mini PCI, USB, PC (PCMCIA) i in. Ten interfejs jest specyficzny dla producenta modułu radiowego i wymaga instalowania specyficznych sterowników (driver, = w systemie Windows pliki \*.dll). Poprzez ten interfejs z jednostki głównej przesyłane są dane i polecenia sterujące pracą modułu radiowego. Moduł radiowy może być zaprojektowany jako wyposażenie dodatkowe dołączane na zewnątrz PC, albo jego elementy mogą być wprost umieszczone na płycie obwodu drukowanego jednostki głównej (zintegrowane).

W torze nadawczym modułu radiowego dane pasma podstawowego (baseband) są przetwarzane, modulują częstotliwość pośrednią (IF), następnie wskutek przemiany częstotliwości są przesuwane do odpowiedniego kanału radiowego (RF) w paśmie 2,4 GHz lub 5 GHz i przez wzmacniacz mocy (PA) i przełącznik antenowy (switch) sterują anteną nadawczą.

W torze odbiorczym modułu sygnał radiowy z jednej lub dwóch anten (gdy stosowany jest odbiór zbiorczy – diversity), jest poprzez przełączniki podawany na wejście niskoszumnego wzmacniacza (LNA), następnie po przemianie częstotliwości jest wzmacniany i po demodulacji przesuwany do pasma podstawowego.

Spotyka się również urządzenia z tzw. zerową częstotliwością pośrednią (ZIF), gdzie po stronie nadajnika przetworzony sygnał pasma podstawowego moduluje bezpośrednio falę RF, a po stronie odbiornika sygnał radiowy podlega przemianie na sygnał wzmacniany i przetwarzany w paśmie podstawowym.

Antena, a w przypadku stosowania odbioru zbiorczego dwie anteny, por. punkt 4.5, jest przełączana pomiędzy wejściem odbiornika a wyjściem nadajnika.

Interfejs radiowy modułu RLAN może być zgodny z jednym, lub więcej, standardem z serii IEEE 802.11. Istnieją urządzenia przeznaczone do pracy tylko w paśmie częstotliwości 2,4 GHz (802.11b lub 802.11g), tylko w pasmach częstotliwości 5 GHz (802.11a) oraz dwupasmowe (stanowiące kombinację 802.11g i 802.11a).

Zwłaszcza w przypadku terminali noszonych zasilanych z wbudowanej baterii, istotne jest ograniczenie poboru prądu przez moduł radiowy, który nie jest zaangażowany w aktywnym połączeniu radiowym. W specyfikacji systemu 802.11 [1] przewidziano specjalny tryb oszczędzania energii (*power-save mode*), który polega na tym, że AP może zarządzać listą terminali użytkowników pracujących w trybie oszczędzania energii i może buforować pakiety wysłane do tych urządzeń. AP wysyła te pakiety do urządzeń, jeżeli terminal użytkownika

sieci żąda otrzymania pakietów wysyłając zapytanie, albo gdy zmienia swój tryb pracy. AP okresowo wysyła informacje o tym, dla których urządzeń będących w trybie oszczędzania energii buforuje pakiety. Urządzenia powinny się okresowo włączać w trybie odbioru na czas nadawania tej informacji. Jeżeli terminal uzyska informację o oczekujących adresowanych do niego pakietach, to pozostaje włączony i w celu uzyskania swoich pakietów powinien wysłać zapytanie do AP.

## 2.8. Związek z charakterystykami kanału radiowego

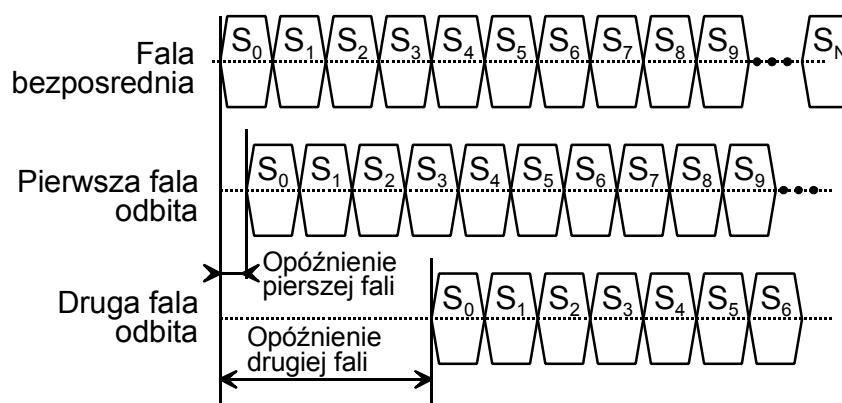
Kanał radiowy jest medium, w którym następują zmiany spowodowane równocześnie wieloma zjawiskami fizycznymi. W drodze pomiędzy anteną nadajnika i anteną odbiornika fale radiowe są tłumione, ulegają rozproszeniu i wielokrotnym odbiciom. Zjawiska te omówiono szerzej w punkcie 4.

### 2.8.1. Wielodrogowość – skutki w dziedzinie czasu

W środowisku, w którym następują odbicia fali radiowej, do anteny odbiorczej różnymi drogami dociera wiele składowych tego samego sygnału nadajnika (echo). Ze względu na różnice długości przebytych tras składowe sygnału odbieranego są względem siebie opóźnione. Opóźnienie jest funkcją losową o parametrach charakterystycznych dla środowiska propagacji fali. Rozrzut opóźnienia fali wewnątrz pomieszczeń wynosi  $20 \div 30$  ns, a na dłuższej trasie w przestrzeni nad powierzchnią przewodzącą nawet  $200 \div 400$  ns<sup>/4</sup>. Jeżeli czas opóźnienia kolejnej składowej jest porównywalny lub większy niż czas jednego elementu sygnału cyfrowego, a jej amplituda dostatecznie duża, to wskutek interferencji pomiędzy symbolami sygnału odbieranego określona ich liczba może zostać zniekształcona, jak pokazano na rys. 16.

W systemie 802.11b pracującym z szybkością transmisji 11 Mbit/s jest wytwarzany sygnał CCK nałożony na kwadraturową fazową modulację fali nośnej QPSK z szybkością 11 Megasymboli/s, a więc czas pojedynczego symbolu wynosi  $\approx 91$  ns.

W systemie FHSS zdefiniowanym w 802.11 przy 1 Mbit/s symbole sygnału mają czas 1  $\mu$ s, ok. 11 razy dłuższy niż symbole CCK transmisji 802.11b. W tym przypadku opóźnienie wynoszące kilkadziesiąt ns praktycznie nie ma znaczenia.



Rys. 16: Interferencje symboli spowodowane odbiorem wielodrogowym

W systemie OFDM zdefiniowanym w 802.11a/g czas jednego symbolu wynosi 4  $\mu$ s, jest ok. 44 razy dłuższy niż symbole CCK transmisji 802.11b. Ponadto symbol OFDM zawiera

<sup>/4</sup> Różnica dróg o 10 m powoduje opóźnienie  $\approx 33$  ns, o 100 m powoduje opóźnienie  $\approx 333$  ns.

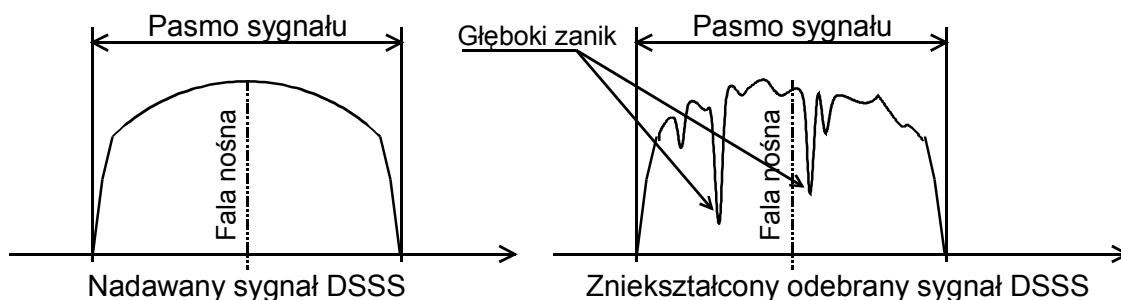
odstęp ochronny (*guard interval*) o długości 800 ns, a więc większej niż największy oczekiwany czas opóźnienia. Odstęp ten jest wypełniony informacją, która ułatwia synchronizację odbiornika i jest pomijana przy dekodowaniu. Pozostałe 3200 ns jest traktowane jako symbol danych (tej szerokości impulsu OFDM w dziedzinie częstotliwości odpowiada  $1/3200 \text{ ns} = 312,5 \text{ kHz}$  – odstęp pomiędzy podnośnymi).

Z tej prostej analizy wynikają oczywiste wnioski odnośnie środowiska stosowania systemów DSSS. Ze względu na wielodrogowość sygnału radiowego systemy DSSS mogą być stosowane:

- na niewielkich obszarach / odległościach, np. RLAN w pomieszczeniu (opóźnienia mniejsze niż czas symbolu CCK),
- w łączach punkt-punkt wyposażonych w anteny o dużej kierunkowości, skutecznie dyskryminujące składowe sygnały przychodzące z kierunków innych niż pożądany.

### 2.8.2. Wielodrogowość – skutki w dziedzinie częstotliwości

Sumowanie się składowych sygnału radiowego o różnych fazach i amplitudach powoduje, że niektóre wzajemnie się znoszą, a inne sumują w fazie zgodnej. Skutkiem tego zjawiska jest selektywny zanik obserwowany na niektórych częstotliwościach używanego pasma, rys. 17.



Rys. 17: Głębokie zaniki spowodowane odbiorem wielodrogowym

Jeżeli w następstwie zaniku sygnału średnia moc sygnału odbieranego w systemie DSSS będzie mniejsza niż wartość progowa, to odbiornik ten przestanie pracować. Ze względu na wymaganą energię sygnału względem poziomu szumu transmisja 11 Mbit/s jest najbardziej, a 1 Mbit/s najmniej podatna na zakłócenia spowodowane odbiorem wielodrogowym.

Jeżeli zanik dotyczy selektywnie jednej lub kilku częstotliwości nośnych w systemie FHSS, to emisja może być powtórzona na innych częstotliwościach.

W systemie OFDM, por. tab. 3, w trakcie kodowania bity informacji są grupowane, a następnie rozkładane jednocześnie w sygnałach modulujących wielu podnośnych. Jeżeli zanik dotyczy selektywnie jednej lub kilku podnośnych, to ze względu na stosowany nadmiar kodowy istnieje duże prawdopodobieństwo odtworzenia utraconej informacji.

Zatem systemy FHSS i OFDM (przy szybkościach 18 Mbit/s i niższych) wykazują większą odporność na selektywne zaniki sygnału niż DSSS. Przy tym FHSS zgodnie ze standardem zapewnia maks. szybkość 2 Mbit/s, a system OFDM znacznie większą i powinien być preferowany.

Podobną analizę można przeprowadzić dla przypadku występowania w paśmie kanału radiowego RLAN wąskopasmowego sygnału zakłócającego o dużym poziomie. Występowanie takiego długotrwałego zakłócenia w zasadzie eliminuje system DSSS. W przypadku systemu FHSS blokowana będzie jedna, najwyżej kilka sąsiednich nośnych, co przeważnie tylko zmniejsza jego przepływność.

System FHSS do poprawnej pracy wymaga stosunku sygnału do szumu SNR (*Signal to Noise Ratio*) rzędu 18 dB. DSSS z modulacją BPSK może pracować przy SNR nie mniejszym niż 12 dB. Oznacza to, że przy identycznej mocy nadajnika system DSSS powinien osiągać większy zasięg transmisji.

Jednakże z drugiej strony szerokopasmowe zakłócenie w paśmie o szerokości 22 MHz, np. pochodzące z innej sieci RLAN, może całkowicie zablokować urządzenie wykorzystujące kanał DSSS lub OFDM, a w przypadku FHSS zablokuje tylko ok. 1/3 pojemności systemu i system taki powinien nadal pracować, chociaż z mniejszą przepływnością.

### 3. Podstawowe wymagania

Pasmo częstotliwości 2,4 GHz, w którym pracują najbardziej dziś popularne urządzenia RLAN zgodne z normami IEEE 802.11b/g [3, 6], jest jednym z pasm częstotliwości przeznaczonych w Regulaminie Radiokomunikacyjnym dla potrzeb urządzeń przemysłowych, naukowych i medycznych (*Industry, Scientific, Medical, ISM*). Pasma częstotliwości ISM z definicji nie są pasmami chronionymi. Oznacza to, że użytkownicy systemów pracujących w paśmie ISM muszą się liczyć z występowaniem zakłóceń radioelektrycznych, których konsekwencją może być znaczne obniżenie jakości transmisji radiowej, a nawet przerwy w łączności. Natomiast istotną zaletą pasma 2,4 GHz jest fakt, że jest ono udostępnione w większości uprzemysłowionych krajów świata. Z tego powodu urządzenia zgodne z normami IEEE 802.11b/g stanowią jeden z nielicznych przykładów produktów radiowych, które mogą być dostarczane zarówno na rynek europejski jak i amerykański. Ta zbieżność regionalnych wymagań przyczyniła się do masowego rozwoju rynku tych produktów.

Ze względu na potrzebę uzyskania bardziej niezawodnych łączy radiowych, zwiększenia szybkości przesyłania danych i pojemności tworzonych radiowych sieci lokalnych, konieczne stało się uzgodnienie i przydzielenie w skali międzynarodowej dla wspólnego użytkowania przez systemy RLAN innych zakresów częstotliwości, bardziej przydatnych do tego celu niż pasmo częstotliwości ISM.

Z tego powodu w trakcie Światowej Konferencji Radiokomunikacyjnej (WRC-03) w 2003 r. przyjęto rezolucję ITU-R Resolution 229 o wykorzystaniu zakresów częstotliwości: 5150 ÷ 5250 MHz, 5250 ÷ 5350 MHz oraz 5470 ÷ 5725 MHz przez służby ruchome dla realizacji radiowych systemów dostępowych (*Wireless Access Systems, WAS*), w tym radiowych sieci lokalnych (*Radio Local Area Networks, RLAN*).

#### 3.1. Wykorzystanie pasma 2,4 GHz

Podstawowe ustalenia dotyczące przeznaczenia zakresu częstotliwości 2400 ÷ 2483,5 MHz, nazywanego pasmem 2,4 GHz, dla radiowych sieci lokalnych (RLAN) zawiera decyzja Europejskiego Komitetu Radiokomunikacyjnego ERC/DEC/(01)07 [16]. Jednym ze skutków tej decyzji jest zobligowanie krajów CEPT do odstąpienia od indywidualnego licencjonowania urządzeń RLAN pracujących w tym zakresie częstotliwości, które spełniają podstawowe wymagania podane w tej decyzji.

Wymagania określone w ww. decyzji powołuje się również w Zaleceniu ERC Rec. 70-03 [17] dotyczącym urządzeń radiowych bliskiego zasięgu oraz w normie ETSI EN 300 328 [18]. Wymagania te stawiają następujące ograniczenia:

- moc nadajnika RF:
  - 100 mW e.i.r.p.,
  - maksymalna gęstość mocy urządzeń z modulacją DSSS: –20 dBW/1 MHz,



- maksymalna gęstość mocy urządzeń z modulacją FHSS:  $-10$  dBW/100 kHz;
- rodzaj anteny: zintegrowana (bez złącza antenowego) lub dedykowana;
- odstęp międzykanałowy: brak ograniczeń, system może wykorzystywać cały zakres częstotliwości.
- minimalna szybkość transmisji: 250 kbit/s;
- współczynnik aktywności nadawania (*Duty cycle*) [%]: brak ograniczeń.

Urządzenia spełniające podane wymagania zgodnie z decyzją Komisji Europejskiej 2000/299/WE (*Commission Decision 2000/299/EC*) są zaliczane do urządzeń klasy 1, tzn. mogą być bez ograniczeń sprzedawane i stosowane na obszarze UE. Należy zwrócić uwagę, że w tych wymaganiach ERC/CEPT nie ma żadnego odniesienia do standardów IEEE omówionych w punkcie 1. W konsekwencji, każde urządzenie, które spełnia podane wyżej kryteria powinno być traktowane jako szerokopasmowe, radiowe urządzenie do transmisji danych i jako takie może być swobodnie stosowane na obszarze UE.

Należy także pamiętać, że wymagania wymienione powyżej nie wyczerpują kwestii tzw. wymagań zasadniczych w rozumieniu dyrektywy 1999/5/EC.

### 3.2. Wykorzystanie pasma 5 GHz

Aktualne ustalenie odnośnie rezerwacji podzakresów częstotliwości  $5150 \div 5350$  MHz oraz  $5470 \div 5725$  MHz dla potrzeb szerokopasmowych radiowych systemów dostępowych, w tym RLAN, wynikają z decyzji ECC/DEC/(04)08 [19].

Wymagania zawarte w decyzji znajdują się również w Zaleceniu ERC Rec. 70-03 [17], dotyczącym urządzeń radiowych bliskiego zasięgu oraz w normie ETSI EN 301 893 [20], dotyczącej urządzeń RLAN przeznaczonych do pracy w tych zakresach częstotliwości. Ustalenia te opierają się na wynikach prac studialnych dotyczących kompatybilności RLAN z innymi służbami radiokomunikacyjnymi.<sup>/5</sup>

Podstawowe wymagania dotyczące RLAN wykorzystujących podzakresy pasma 5 GHz są następujące.

- Podzakres częstotliwości  $5150 \div 5350$  MHz jest przeznaczony tylko dla urządzeń pracujących w pomieszczeniach, moc promieniowana do 200 mW e.i.r.p. W podzakresie częstotliwości powyżej 5250 MHz jest wymagane stosowanie dynamicznego wyboru częstotliwości (DFS) oraz sterowania mocą nadajnika (TPC).
- Podzakres częstotliwości  $5470 \div 5725$  MHz jest przeznaczony dla urządzeń pracujących w pomieszczeniach lub na otwartym powietrzu, moc promieniowana do 1 W e.i.r.p. Jest wymagane stosowanie dynamicznego wyboru częstotliwości (DFS) oraz sterowania mocą nadajnika (TPC).

Dopuszczenie stosowania urządzeń tylko wewnątrz pomieszczeń odnosi się do budynków mieszkalnych lub wykorzystywanych komercyjnie, których konstrukcja zapewnia tłumienie potrzebne do ochrony innych służb radiowych wykorzystujących to samo pasmo. Obowiązek stosowania DFS i TPC dotyczący urządzeń WAS/RLAN pracujących w paśmie 5 GHz, które wykorzystują zakres częstotliwości powyżej 5250 MHz.

---

<sup>/5</sup> W wielu krajach zakres częstotliwości  $5250 \div 5850$  MHz jest wykorzystywany przez radary meteorologiczne i wojskowe. Natomiast zakres pomiędzy  $5250 \div 5350$  MHz rezerwowano dla satelitarnych systemów eksploracji Ziemi i kosmosu.

Podane wyżej wymagania, dotyczące mocy e.i.r.p., odnoszą się do pojedynczego systemu WAS/RLAN. W zasadzie możliwe są dwa typy konfiguracji sieci:

- system zcentralizowany, w którym wiele urządzeń łączy się drogą radiową za pośrednictwem urządzenia nadrzędnego – punktu dostępu,
- system niezcentralizowany, w którym wiele urządzeń znajdujących się na małym obszarze komunikuje się ze sobą bezpośrednio (ad-hoc) bez udziału stacji centralnej.

Systemy WAS/RLAN przeważnie mają architekturę punkt do wielu punktów ze stacjonarnym punktem dostępu (AP) i z przenośnymi lub noszonymi urządzeniami użytkowników, takimi jak PC, PDA, telefony VoIP. W przypadku AP stosuje się przeważnie anteny z sektorową charakterystyką promieniowania o maksimum leżącym w płaszczyźnie poziomej. Sieci wewnątrz pomieszczeń składają się przeważnie z małych komórek o promieniu rzędu 50 m lub mniejszym. Komórki na zewnątrz pomieszczeń powinny zazwyczaj mieć większy promień, z tego względu dla tego rodzaju sieci dopuszczono moc 1 W e.i.r.p.

Warunek dotyczący wykorzystania częstotliwości w zakresie 5150 ÷ 5350 MHz tylko wewnątrz pomieszczeń wprowadzono dla ochrony służb satelitarnych.

Każde urządzenie WAS/RLAN pracujące w zakresach częstotliwości 5150 ÷ 5350 MHz oraz 5470 ÷ 5725 MHz powinno wykorzystywać mechanizm DFS z funkcją detekcji zakłóceń radarowych (*Radar Interference Detection*) o poziomie przewyższającym wartość progową ustaloną w zaleceniu ITU-R M.1652 [21].

DFS powinien gwarantować równomierne wykorzystanie pasma co najmniej 330 MHz (w przypadku urządzeń wykorzystujących oba podzakresy), lub 255 MHz (w przypadku urządzeń wykorzystujących wyłącznie podzakres 5470 ÷ 5725 MHz).

Ze względu na stosowanie mechanizmu DFS urządzenie WAS/RLAN może pracować albo w trybie "master" (jako sterujące), albo w trybie "slave" (jako sterowane). Urządzenia pracujące w trybie "slave" mogą pracować tylko w sieci sterowanej przez urządzenia WAS/RLAN pracujące w trybie "master".

Każde urządzenie w trybie "master" powinno w czasie normalnej pracy wykorzystywać funkcję detekcji zakłóceń radarowych w celu wykrywania każdego wspólnokanałowego sygnału radarowego, oraz mechanizm wyboru kanału zapewniający równomierny rozkład obciążenia w dostępnym zakresie częstotliwości. Urządzenie w trybie "slave" nie powinno nadawać zanim nie odbierze odpowiedniego sygnału zezwalającego ze strony właściwego urządzenia pracującego w trybie "master". Urządzenia "slave" o mocy 200 mW e.i.r.p., lub większej, powinny mieć własną funkcję detekcji zakłóceń radarowych.

Z punktu widzenia potrzeby stosowania DFS wymagania dla sieci ad-hoc są takie same, a urządzenia stosowane w zakresach 5250 ÷ 5350 MHz oraz 5470 ÷ 5725 MHz powinny używać DFS. Tylko w zakresie 5150 ÷ 5250 MHz urządzenia pracujące w trybie ad-hoc nie muszą wykorzystywać DFS.

Należy dodać, że w zakresie częstotliwości 5150 ÷ 5250 MHz maksymalna średnia gęstość mocy e.i.r.p. nie powinna przekraczać 0,25 mW / 25 kHz w każdym 25 kHz pasma. W zakresie częstotliwości 5250 ÷ 5350 MHz maksymalna średnia gęstość mocy e.i.r.p. nie powinna przekraczać 10 mW / 1 MHz w każdym 1 MHz pasma. W zakresie częstotliwości 5470 ÷ 5725 MHz maksymalna średnia gęstość mocy e.i.r.p. nie powinna przekraczać 50 mW / 1 MHz w każdym 1 MHz pasma.

W zakresach 5250 ÷ 5350 MHz i 5470 ÷ 5725 MHz w urządzeniach należy stosować regulację mocy nadajnika TPC (*Transmitted Power Control*), co najmniej o 3 dB względem maksymalnej, dopuszczalnej mocy e.i.r.p. Jeżeli TCP nie jest stosowana, to maksymalna

dopuszczalna moc e.i.r.p. i odpowiednie podane wyżej wartości graniczne średniej gęstości mocy e.i.r.p. powinny być zredukowane o 3 dB.

### **3.3. Dołączanie anten zewnętrznych**

#### **3.3.1. Problemy prawno-administracyjne**

Jak podano w punktach 3.1. i 3.2. w wymaganiach europejskich określono maksymalną moc promieniowaną (e.i.r.p.) urządzeń RLAN.

Jeżeli urządzenie RLAN jest fabrycznie wyposażone tylko w antenę zintegrowaną (lub dwie anteny zintegrowane), to maksymalna moc promieniowana przez urządzenie jest ustawiana przez producenta, a instalator i/lub użytkownik urządzenia nie może ustawić mocy większej. Kwestia zgodności z wymaganiami zasadniczymi jest gwarantowana w procesie produkcji i potwierdzana w formie deklaracji zgodności wystawionej przez producenta.

W przypadku, gdy urządzenie RLAN jest wyposażone w złącza antenowe, umożliwiające dołączenia anteny zewnętrznej, pojawia się problem zgodności maksymalnej mocy promieniowanej z wymaganiami zasadniczymi. Ponieważ moc promieniowaną (e.i.r.p.) określa zależność:  $P_{EIRP} = P_T - L_T + G_t$ , gdzie:

$P_T$  [dBm] moc na złączu antenowym nadajnika,

$L_T$  [dB] tłumienie połączenia nadajnika z anteną nadawczą,

$G_t$  [dBi] zysk anteny nadawczej,

to spełnienie wymagań dotyczących ograniczenia mocy promieniowanej jest związane z koniecznością określenia co najmniej trzech parametrów. Poziom  $P_T$  może gwarantować producent urządzenia RLAN. Pozostałe dwa faktycznie pozostają do dyspozycji instalatora / użytkownika, o którym należy sądzić, że z reguły nie dysponuje aparaturą do pomiaru mocy promieniowanej. Ten może polegać na informacjach w dokumentacji: anteny, złącz i kabla, i starać się wykonać instalację tak, aby zapewnić zgodność z wymaganiami.

Producent może wykonać badania urządzenia RLAN z określonym typem anteny dołączanej (tzw. anteną dedykowaną) i oferować zestaw złożony z urządzenia RLAN i dedykowanej anteny, zwykle wyposażonej w kabel o ustalonej długości, potwierdzając w formie deklaracji zgodności, że wymagania zasadnicze są spełnione. Jeżeli instalator / użytkownik tego zestawu zastosuje się do instrukcji instalacji zestawu można domniemywać, że sprzęt spełnia wymagania dotyczące ograniczenia mocy promieniowanej.

Jeżeli urządzenie RLAN ma złącze antenowe dostępne dla użytkownika, to jest oczywiste, że praktycznie istnieje możliwość dołączenia dowolnej anteny zewnętrznej i utworzenia zestawu, którego moc promieniowana wielokrotnie przekracza moc dopuszczalną. W konsekwencji takich praktyk wzrasta nie tylko zasięg użytkowy, ale także zasięg zakłóceńowy wykonanych instalacji, co skutkuje wzrostem poziomu zakłóceń w pasmach częstotliwości RLAN i obniża jakość transmisji we wszystkich sieciach. Jest to problem, z którym spotykają się wszystkie europejskie administracje łączności i ich służby kontrolne.

#### **3.3.2. Problemy techniczne**

Produkowane obecnie moduły radiowe RLAN, por. punkt 2.3, są zwykle wyposażone w miniaturowe lub subminiaturowe złącza RF o impedancji 50  $\Omega$ . Natomiast w instalacjach zewnętrznych (w celu uzyskania małego tłumienia na jednostkę długości) stosuje się kable antenowe o znacznie większej średnicy, zwykle zakończone złączem typu N. Ze względu na wymiary, sztywność i dopuszczalny promień gięcia nie jest możliwe bezpośrednie dołączenia kabli antenowych do modułu radiowego RLAN. Połączenie takie wykonuje się za pośrednictwem elastycznego kabla (tzw. pigtail), zakończonego z jednej strony odpowiednim

miniaturowym złączem RF dołączanym do modułu radiowego, a z drugiej złączem kompatybilnym ze złączem kabla antenowego. W instalacjach, w których używa się kabli o średnicy większej niż 3/8", pomiędzy urządzeniem radiowym a tego rodzaju kablem stosuje się dodatkowo odcinek kabla elastycznego (tzw. jumper). Należy jednak pamiętać, że każdy dodatkowy adapter-łącznik zastosowany w celu zmiany standardu złącza (np. SMA / N), każde dodatkowe złącze wprowadza do toru antenowego niejednorodność, pogarsza wypadkowy współczynnik fali stojącej (VSWR) i zwiększa wypadkowe tłumienie połączenia urządzenia z anteną. To dodatkowe tłumienie powinno być uwzględnione w bilansie energetycznym projektowanego łącza.

Wybór charakterystyki kierunkowej, zysku i innych parametrów anteny zależy od przeznaczenia łącza radiowego. Odnośnie wszystkich anten zewnętrznych wymaga się, aby znamionowa impedancja wynosiła 50  $\Omega$  i zaleca wartość VSWR < 1,9.

W przypadku anten przeznaczonych do stosowania w instalacjach profesjonalnych, zwłaszcza instalowanych na otwartym powietrzu, oprócz podstawowych parametrów elektrycznych, takich jak:

- zysk w kierunku maksimum promieniowania,
- szerokość wiązki promieniowania na poziomie połowy mocy (HPBW),
- polaryzacja,
- współczynnik fali stojącej (VSWR),
- uziemienie,

należy zwrócić uwagę na wymagania dodatkowe związane z odpornością na wpływy środowiska pracy, takie jak:

- stopień ochrony obudowy przed wnikaniem wody i pyłu (kod IP), nie gorszy niż IP 64,
- wytrzymałość mechaniczna (wiatr, oblodzenie),
- odporność powłok ochronnych lub osłony anteny na promieniowanie słoneczne, zwłaszcza ultrafiolet.

Oferta anten do stosowania w łączach RLAN jest bardzo szeroka, jednakże doświadczenia Laboratorium Badań Radiokomunikacyjnych Instytutu Łączności wskazują, że wiele oferowanych produktów ma w rzeczywistości parametry znacznie gorsze niż przedstawione w karcie katalogowej wyrobu, jest wykonana niezgodnie z dobrymi praktykami inżynierskimi, nieprofesjonalnie i niestarannie.

### **3.3.3. Lokalizacja anten zewnętrznych**

Jeżeli stacje bazowe różnych systemów, pracujących na różnych częstotliwościach, współużytkują lokalizację lub infrastrukturę (wspólny maszt, instalacja na tym samym dachu) lub znajdują się w bliskim sąsiedztwie, pojawia się ryzyko wzajemnych zakłóceń. Przyczyną zakłóceń może być: emisja pozapasmowa nadajnika, intermodulacja lub tzw. blokowanie odbiornika stacji.

Emisje niepożądane nadajnika jednego systemu (harmoniczne i intermodulacyjne kombinacje nośnych) mogą znaleźć się w paśmie odbiornika stacji innego systemu, powodując pogorszenie czułości lub zrywanie połączeń, a w konsekwencji obniżenie jakości usług.

Blokowanie odbiornika stacji ma miejsce, gdy na wejściu tego odbiornika pojawia się sygnał stacji pracującej w innym paśmie, którego poziom przekracza wartość tolerowaną przez odbiornik.

Oba wymienione rodzaje zakłóceń powodują degradację jakości łącza radiowego dla kierunku od nadajników stacji klienckich do odbiornika stacji bazowej (*uplink*). Niebezpieczeństwo zakłóceń jest tym większe, im odstęp pomiędzy zakresami częstotliwości jest mniejszy.

W większości norm ETSI zakłada się, że pomiędzy dwoma systemami antenowymi o wspólnej lokalizacji (oddzielne torry antenowe, oddzielne anteny) minimalna separacja wynosi 30 dB. Jednakże wymagania te zmieniają się ze względu na faktyczne zagęszczenie stacji różnych systemów.

Środki zaradcze:

- wybór rodzajów anten, polaryzacji, sposobu montażu i/lub odległości między antenami różnych systemów w sposób zapewniający wymaganą separację;
- planowanie częstotliwości pozwalające uniknąć kombinacyjnych zakłóceń w paśmie odbiornika każdej ze stacji wskutek intermodulacji nadajników,
- stosowanie filtrów pasmowo-przepustowych lub pasmowo-zaporowych zaprojektowanych dla konkretnej lokalizacji.

Faktycznie wymagana separacja pomiędzy dwoma systemami zależy od dwóch parametrów:

- maksymalnego dopuszczalnego poziomu emisji zakłóceń w paśmie odbiorczym, które toleruje odbiornik,
- maksymalnego dopuszczalnego poziomu sygnału poza pasmem odbiorczym, który nie powoduje blokowania odbiornika.

#### **3.3.4. Wybór kabli antenowych**

Jednym z podstawowych składników bilansu łącza radiowego jest tłumienie kabli łączących anteny z urządzeniami nadawczo-odbiorczymi. W pasmach częstotliwości wykorzystywanych w radiowych sieciach lokalnych: 2,4 GHz, a zwłaszcza 5 GHz, wybór odpowiedniego kabla wymaga dużej uwagi. Po pierwsze przy tych częstotliwościach zarówno w przewodach, jak też materiałach dielektrycznych kabla, straty mocy są wielokrotnie większe niż np. przy częstotliwości 150 MHz.

Kable produkowane dla stacji bazowych sieci komórkowych GSM (pasma 900 MHz lub 1800 MHz) nie są odpowiednie ze względu na sztywność i wymiary, a także zwłaszcza w przypadku stosowania pasma 5 GHz z powodu istnienia tzw. częstotliwości odcięcia kabla (*cut-off frequency*).

Normalnie w kablu współosiowym energia jest przenoszona przez falę TEM, w której wektory pola elektrycznego i magnetycznego są prostopadłe do kierunku fali (osi kabla). Przy zwiększaniu częstotliwości pojawia się punkt, w którym połowa długości fali w dielektryku izolującym przewody jest równa średniemu obwodowi wewnętrznego i zewnętrznego przewodu. Na tej częstotliwości i wyższych w kablu mogą powstawać fale innych modów (TE i TM). Te niepożądane rezonanse, występujące na określonych częstotliwościach, zwiększają gwałtownie tłumienie kabla na tych częstotliwościach powodując, że kabel staje się nieprzydatny.

Ze względu na opisane zjawiska należy wybierać kable z dielektrykiem piankowym (*foam dielectric*) lub z dielektrykiem powietrznym (*air dielectric*).

Oprócz tłumienia na częstotliwości roboczej istotnym parametrem kabli antenowych jest napięciowy współczynnik fali stojącej VSWR. VSWR jest miarą dopasowania do impedancji znamionowej. Im jest większy od 1 tym większe są odbicia w kablu antenowym i rośnie prawdopodobieństwo, że mniejsza moc będzie dostarczana do obciążenia (anteny nadajnika / wejścia odbiornika).

#### **3.4. Anteny urządzeń przenośnych**

Środowisko pracy anten urządzeń przenośnych i noszonych, a także w wielu przypadkach dotyczących anten montowanych w pomieszczeniach, różni się od środowiska anteny

urządzenia przewoźnego lub stacji bazowej. Zasada działania, dostrojenia do częstotliwości roboczej, charakterystyka promieniowania, zysk itd. mogą być również zdefiniowane dla tych anten, ale należy pamiętać o związku charakterystyk anteny z takimi czynnikami jak:

- materiał, z którego wykonano obudowę urządzenia (metal, plastik),
- wymiary obudowy urządzenia (wyrażone w funkcji długości fali) i kształt obudowy (krótka i szeroka, długa i wąska),
- otoczenie, w którym antena jest stosowana (bliskość ścian lub elementów metalowych),
- oddziaływanie osoby obsługującej urządzenie na antenę, zwłaszcza antenę zintegrowaną.

Wszystkie wymienione czynniki mają wpływ na właściwości anteny i dlatego powinny być brane pod uwagę w trakcie projektowania urządzeń, instalowania i użytkowania.

W zakresie częstotliwości pracy antena powinna być dostrojona do rezonansu, a poza tym zakresem częstotliwości w zasadzie impedancja może być dowolna. Współczynnik fali stojącej (VSWR), w Polsce używa się również skrótu WFS, lub tłumienie niedopasowania określają część mocy, która ulega odbiciu od anteny.

Jeżeli używanym parametrem jest VSWR, to idealne dopasowanie ma miejsce, gdy współczynnik fali stojącej wynosi 1,0:1. Np. jeżeli VSWR ma wartość 2,0:1, to moc promieniowana jest mniejsza o ok. 10% ( $\sim 0,5$  dB).

Moc promieniowana jest częścią mocy doprowadzonej do anteny. W przypadku urządzeń noszonych antena jest zwykle nieodłącznym elementem urządzenia i w zasadzie elementem promieniującym energię RF staje się cała konstrukcja urządzenia.

Podczas projektowania anteny istotne jest uzyskanie charakterystyki kierującej promieniowaną energią do anteny urządzenia odbiorczego. Anteny urządzeń noszonych i przenośnych powinny mieć charakterystyki kierunkowe i polaryzację dostosowaną do typowego położenia urządzenia w czasie pracy i zorientowane w kierunku urządzenia, z którym mają się komunikować. Jednakże w odniesieniu do urządzeń z anteną zintegrowaną wymieniane warunki bardzo często nie są spełnione.

Miejsce montażu anteny może mieć zasadniczy wpływ na te charakterystyki. Każda metalowa powierzchnia w pobliżu anteny będzie zniekształcać charakterystykę promieniowania, dlatego antena musi znajdować się poza ekranowaną obudową urządzenia, np. w części karty PCI wystającej poza obrys obudowy komputera.

Należy również uwzględniać oddziaływanie ciała użytkownika na charakterystykę anteny. Ciało użytkownika może rozstrajać antenę, a także pochłaniać część energii RF.

Anteny zewnętrzne urządzeń noszonych są montowane do obudowy za pośrednictwem złącza RF lub w sposób uniemożliwiający odłączenie. Najczęściej używanymi antenami zewnętrznymi takich urządzeń są:

- dipol ćwierćfalowy ( $\lambda/4$ ), jest często wykonany jako ćwierćfalowa antena helikalna. Antena helikalna ma spośród anten stosowanych do urządzeń przenośnych i noszonych charakterystykę najbardziej zbliżoną do izotropowej.

Antena helikalna jest wykonana z przewodu zwiniętego spiralnie. Właściwości zależą od stosunku długości uzwojenia do jego średnicy.

Jeżeli długość uzwojenia jest duża w stosunku do średnicy antena promieniuje w kierunku poprzecznym (*broadside mode*). Jeżeli długość uzwojenia w stosunku do średnicy jest mała to antena promieniuje osiowo (*axial mode*) od strony przeciwległej do punktu zasilania, z polaryzacją kołową o kierunku zależnym od kierunku wykonania zwojów (prawoskrętna lub lewoskrętna).

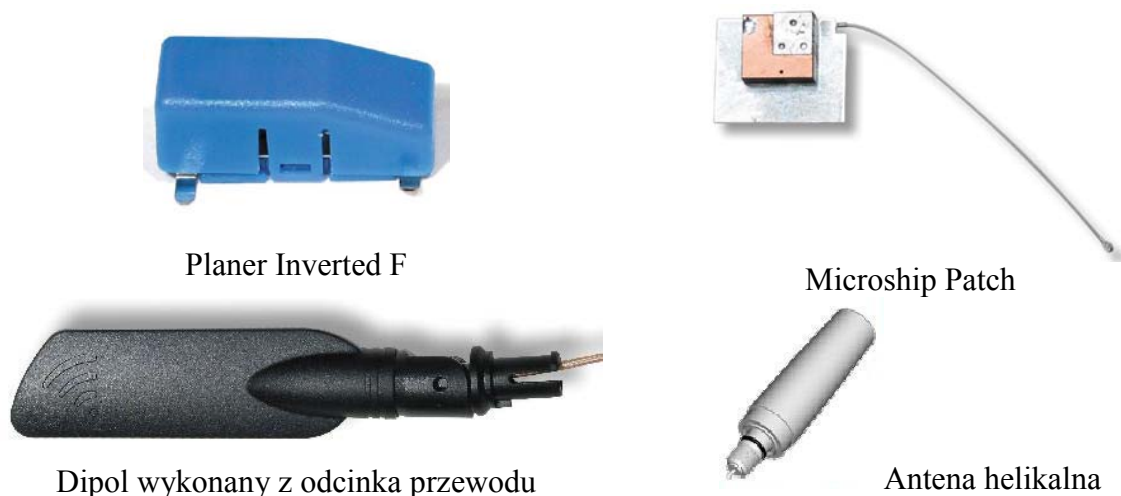
Uwaga. Anteny ćwierćfalowe muszą mieć "ziemię odniesienia" w postaci metalowej płaszczyzny, obudowy itp.

- dipol półfalowy ( $\lambda/2$ ) – konstrukcja stosowana, gdy antena jest dołączana za pomocą odcinka kabla współosiowego.

Teoretycznie antena ta ma zysk 2,15 dBi (1,64 W/W). Jednakże w praktyce należy zakładać nie więcej niż 1,0 – 2,0 dBi. Dipol półfalowy tłumi emisję niepożądane nadajnika, które często są problemem przy stosowaniu anten krótszych.

Anteny wewnętrzne muszą mieć nie tylko właściwe parametry (często w dwóch pasmach częstotliwości np. 2,4 GHz i 5 GHz), ale także kształt i wymiary dostosowane do obudowy urządzenia, np. komputera kieszonkowego (PDA). W tym celu opracowano i opatentowano wiele rozwiązań, np. [23], rys. 18:

- Planer Inverted F Antenna (PIFA), szerokopasmowa antena ukształtowana z cienkiej blachy, często stosowana w komputerach przenośnych. Zajmuje małą powierzchnię (dla RLAN w paśmie 2,4 GHz  $\sim 43 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ ), ale jest stosunkowo wysoka ( $\sim 10 \text{ mm}$ );
- Microship Patch Antenna, płaska antena o kształcie zbliżonym do kwadratu. Jej zaletą są małe wymiary ( $43 \text{ mm} \times 43 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ), ale wymaga dużej przeciwwagi (którą może być metalowy ekran);
- Meander Line Antenna, aktywny przewód antenowy wykonany jako meander bezpośrednio na płytce obwodu drukowanego. Nie powinien znajdować się w pobliżu dużych metalowych powierzchni.



Rys. 18: Przykłady anten urządzeń przenośnych [23]

### 3.5. Wymagane parametry odbiornika

Wymagania odnośnie parametrów odbiornika omówione w tym punkcie nie wchodzą w zakres wymagań zasadniczych w sensie dyrektywy 1999/5/EC i jako takie nie znalazły się we wspomnianych normach ETSI dotyczących parametrów RLAN: EN 300 328 [18] i EN 301 893 [20] oraz w wymaganiach krajowych [22]. Jednakże czułość odbiornika (wartość progowa poziomu sygnału użytecznego), selektywność sąsiedniokanałowa odbiornika i odporność odbiornika na blokowanie sygnałami pozapasmowymi są parametrami podstawowymi z punktu widzenia potrzeb planowania sieci radiowej. Przyjęto następujące określenia, por. publikacje ETSI [24] oraz CEPT [25]:

### 1. Czulość odbiornika

Czulość odbiornika jest to minimalny poziom mocy zmodulowanego sygnału fali nośnej, o częstotliwości znamionowej, na wejściu urządzenia, który przy braku zakłócenia wytwarza po zdemodulowaniu sygnał danych z określoną wartością BER lub FER.

Minimalne wymagania odnośnie czulości podano w punkcie 4.

### 2. Blokowanie

Blokowanie (lub odczulenie) jest miarą zdolności odbiornika do odbioru pożądanego sygnału zmodulowanego, w obecności sygnału niepożądanego występującego poza pasmem systemu odpowiednio 2,4 GHz lub 5 GHz, bez przekroczenia zadanego poziomu degradacji tego sygnału.

Blokowanie, wyznaczone jako stosunek poziomów, dla wszystkich częstotliwości wewnątrz określonego zakresu, z pominięciem tych częstotliwości, dla których zlokalizowano odbiór niepożądany, nie powinno być mniejsze niż wartości odniesienia podane w punkcie 4.

### 3. Selektowność sąsiedniokanałowa

Selektowność sąsiedniokanałowa jest miarą zdolności urządzenia do odbioru pożądanego sygnału zmodulowanego, w obecności sygnału niepożądanego, którego częstotliwość różni się od częstotliwości sygnału pożądanego o wartość odstepu międzykanałowego, z którym pracuje dane urządzenie, bez przekroczenia zadanego poziomu degradacji tego sygnału.

Dla systemu IEEE 802.11 wykorzystującego DSSS, kanał sąsiedni jest definiowany jako nienakładający się kanał, który jest odległy co najmniej o 30 MHz od kanału sygnału pożądanego.

Dla systemów IEEE 802.11b/g kanał sąsiedni jest definiowany jako nienakładający się kanał, który jest odległy co najmniej o 25 MHz od kanału sygnału pożądanego.

Dla systemów IEEE 802.11a/h kanał sąsiedni jest definiowany jako kanał, który jest odległy o 20 MHz od kanału sygnału pożądanego.

Selektowność sąsiedniokanałowa nie powinna być mniejsza niż wartości odniesienia podane w punkcie 4.

### 4. Standardowe wartości parametrów odbiornika

Minimalne wymagania dotyczące parametrów odbiornika dla poszczególnych wersji systemu 802.11 podano w tablicach, gdzie: PSDU oznacza jednostkę danych (SDU) protokołu warstwy fizycznej (PLCP).

Te wartości graniczne można zastosować dla potrzeb obliczania zasięgów użytkowych i zakłóceń projektowanej sieci. Należy jednak zauważyć, że w rzeczywistości czulość odbiornika urządzeń dostępnych na rynku jest o kilka dB lepsza niż wymagana w specyfikacjach IEEE. Dlatego w środowisku bez zakłóceń wspólnokanałowych i natłoku w sieci uzyskiwane zasięgi mogą być większe niż szacowane na podstawie bilansu łącza, do którego wstawiono parametry odbiornika wg specyfikacji IEEE.

#### a) System IEEE 802.11 wersja FHSS

Parametr	Szybkość transmisji	Wartość dla FER $\leq 3\%$ przy PSDU o długości 400 bajtów
Czulość odbiornika	1 Mbit/s	$< -80$ dBm
	2 Mbit/s	$< -75$ dBm
Blokowanie	1 Mbit/s	40 dB
	2 Mbit/s	30 dB
Selektowność sąsiedniokanałowa		nie dotyczy



b) Systemy IEEE 802.11 wersja DSSS oraz IEEE 802.11b

Parametr	Szybkość transmisji	Wartość dla FER $\leq 8\%$ przy PSDU o długości 1024 bajtów
Czułość odbiornika	2 Mbit/s	$< -80$ dBm
	11 Mbit/s	$< -76$ dBm
Blokowanie	2 Mbit/s	50 dB
	11 Mbit/s	50 dB
Selektywność sąsiedniokanałowa	2 Mbit/s	$> 35$ dB
	11 Mbit/s	$> 35$ dB

c) System IEEE 802.11g – praca OFDM

Parametr	Szybkość transmisji	Wartość dla FER $\leq 10\%$ przy PSDU o długości 1000 bajtów
Czułość odbiornika	6 Mbit/s	-82 dBm
	9 Mbit/s	-81 dBm
	12 Mbit/s	-79 dBm
	18 Mbit/s	-77 dBm
	24 Mbit/s	-74 dBm
	36 Mbit/s	-70 dBm
	48 Mbit/s	-66 dBm
	54 Mbit/s	-65 dBm
Blokowanie	6 Mbit/s	47 dB
	54 Mbit/s	30 dB
Selektywność sąsiedniokanałowa	6 Mbit/s	16 dB
	9 Mbit/s	15 dB
	12 Mbit/s	13 dB
	18 Mbit/s	11 dB
	24 Mbit/s	8 dB
	36 Mbit/s	4 dB
	48 Mbit/s	0 dB
	54 Mbit/s	-1 dB

Uwaga. Selektywność sąsiedniokanałowa  $\leq 0$  dB (w trybie OFDM przy szybkości  $\geq 48$  Mbit/s) oznacza, że występujący w sąsiednim kanale sygnał zakłócający, o poziomie takim samym jak sygnał użyteczny, będzie powodował błędy transmisji.

d) Systemy IEEE 802.11a i IEEE 802.11h

Parametr	Szybkość transmisji	Wartość dla FER $\leq 10\%$ przy PSDU o długości 1000 bajtów
Czułość odbiornika	6 Mbit/s	-82 dBm
	9 Mbit/s	-81 dBm
	12 Mbit/s	-79 dBm
	18 Mbit/s	-77 dBm
	24 Mbit/s	-74 dBm
	36 Mbit/s	-70 dBm
	48 Mbit/s	-66 dBm
	54 Mbit/s	-65 dBm
Blokowanie	6 Mbit/s	45 dB
	54 Mbit/s	27 dB
Selektywność sąsiedniokanałowa	6 Mbit/s	16 dB
	9 Mbit/s	15 dB
	12 Mbit/s	13 dB
	18 Mbit/s	11 dB
	24 Mbit/s	8 dB
	36 Mbit/s	4 dB
	48 Mbit/s	0 dB
	54 Mbit/s	-1 dB

Uwaga. Selektywność sąsiedniokanałowa  $\leq 0$  dB (w trybie OFDM przy szybkości  $\geq 48$  Mbit/s) oznacza, że występujący w sąsiednim kanale sygnał zakłócający, o poziomie takim samym jak sygnał użyteczny, będzie powodował błędy transmisji.

5. Rzeczywista czułość odbiornika

W kilku tablicach poniżej zestawiono przykłady czułości odbiornika urządzeń dostępnych na rynku, deklarowane w dokumentacji przez producentów.

Broadcom, Wireless LAN 802.11abg mini-PCI Card,  
model BCM94309MP

Szybkość transmisji [Mbit/s]	Czułość [dBm]
54	-69
48	-72
36	-77
24	-81
18	-85
12	-87
11	-84
9	-88
6	-88
5,5	-88
2	-90
1	-92

Ambit Microsystems Corp.,  
Mini PCI type IIIB 802.11b/g WLAN Card, model T60H786,

Szybkość transmisji [Mbit/s]	Czułość [dBm]
54	-70
48	-72
36	-78
24	-81
18	-81
12	-81
11	-83
9	-81
6	-81
5,5	-85
2	-86
1	-90

Hewlett Packard Company,  
Access Point 420, p.n. J8131A,

Szybkość transmisji [Mbit/s]	Czułość [dBm]
54	-70
48	-73
36	-75
24	-80
18	-82
12	-85
11	-87
9	-85
6	-87
5,5	-90
2	-90
1	-93

#### 4. Propagacja fal radiowych

Dla potrzeb obliczeń propagacyjnych w systemach RLAN można wyróżnić trzy podstawowe scenariusze:

- łącza radiowe punkt-punkt, stosowane np. pomiędzy dwoma budynkami do połączenia ich sieci kablowych, wyposażone w anteny o wąskiej charakterystyce promieniowania, umieszczone na otwartym powietrzu;
- łącza radiowe punkt do wielu punktów, stosowane np. jako osiedlowa sieć dostępu do Internetu, pomiędzy stacją bazową (punktem dostępu), a stacjami indywidualnych użytkowników, przeważnie stacjonarnymi; w tym przypadku stacje klienckie mają zwykle anteny kierunkowe, a stacja bazowa dookólna lub sektorowe;
- sieć punkt do obszaru, przeważnie wewnątrz budynku, przeznaczona do obsługi terminali przenośnych (np. laptop lub PDA) lub ruchomych (np. telefon VoIP) przez jeden, lub więcej, radiowy punkt dostępowy.

Przy tym dla obliczeń tłumienia trasy każde z łączy wymienionych w punkcie b) można potraktować jako stacjonarne łącze punkt do punktu.

## 4.1. Łączy radiowe punkt do punktu

### 4.1.1. Propagacja fal radiowych w otwartej przestrzeni

W otwartej przestrzeni fala emitowana przez źródło punktowe będzie rozchodzić się promieniście we wszystkich kierunkach, a tego rodzaju źródło nazywane jest anteną izotropową.

Jeżeli antena ta promieniuje moc  $P_{rad}$  [W], to w odległości  $d$  [m] od źródła gęstość mocy  $P_{fs}$  wynosi:

$$P_{fs} = \frac{P_{rad}}{4\pi d^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

Jeżeli antena nadawcza nie jest izotropowa, to w dostatecznie dużej odległości od tej anteny, w porównaniu z jej rozmiarem, moc promieniowana  $P_{rad}$  może być zastąpiona iloczynem zysku anteny nadawczej  $G_t$  i mocy dostarczonej do anteny  $P_t$ :

$$P_{rad} = G_t P_t \quad [\text{W}]$$

zatem gęstość mocy:

$$P_{fs} = \frac{G_t P_t}{4\pi d^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

Uwaga. Zysk dipola półfalowego ( $\lambda/2$ ) względem anteny izotropowej w kierunku prostopadłym do dipola wynosi 1,64 (2,15 dB).

Czasem zamiast gęstości mocy sygnału radiowego  $P_{fs}$  [W/m<sup>2</sup>] wygodniej jest stosować natężenie pola elektrycznego  $E_{fs}$  [V/m]:

$$E_{fs} = \sqrt{Z_{fs} P_{fs}}, \text{ gdzie: } Z_{fs} = 120\pi \approx 377 \Omega \text{ jest impedancją otwartej przestrzeni.}$$

W dostatecznie dużej odległości od nieizotropowej anteny nadawczej natężenie pola elektrycznego w otwartej przestrzeni wynosi:

$$E_{fs} = \sqrt{120\pi \frac{P_t G_t}{4\pi d^2}} = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{d} \quad [\text{V/m}]$$

Moc nadajnika wymagana do wytworzenia natężenia pola o tej wartości wynosi:

$$P_t = \frac{(E_{fs} d)^2}{30 G_t} \quad [\text{W}]$$

Jeżeli w miejscu, gdzie znajduje się antena odbiorcza natężenie pola elektrycznego wynosi  $E_{rec}$  lub gęstość mocy sygnału radiowego wynosi  $P_{rec}$ , to maksymalna moc jaką może przechwycić w tym miejscu antena izotropowa wynosi:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} P_{rec} \quad [\text{W}], \text{ gdzie: } \lambda \text{ jest długością fali, a } P_{rec} = \frac{E_{rec}^2}{Z_{fs}}$$

W przypadku nieizotropowej anteny odbiorczej o zysku  $G_r$  moc doprowadzona do dopasowanego odbiornika wynosi:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot P_{rec} G_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{E_{rec}^2}{Z_{fs}} \cdot G_r = \left( \frac{E_{rec} \lambda}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{G_r}{120} \quad [\text{W}]$$

Stosunek mocy odbieranej ( $P_r$ ) do nadawanej ( $P_t$ ) można wyznaczyć z zależności:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{E_{rec} \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \div \frac{(E_{fs} d)^2}{30 G_t} = \left( \frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r$$

Ponieważ w otwartej przestrzeni w miejscu odbioru  $E_{rec} = E_{fs}$ , to:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \quad \text{albo} \quad P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \quad [\text{W}]$$

Formuła ta określa sposób obliczania mocy na wejściu odbiornika, jeżeli fala radiowa rozchodzi się w otwartej przestrzeni.

Ze względów praktycznych tłumienie trasy pomiędzy anteną nadawczą i anteną odbiorczą jest zwykle wyrażane w decybelach [dB] i w otwartej przestrzeni wynosi:

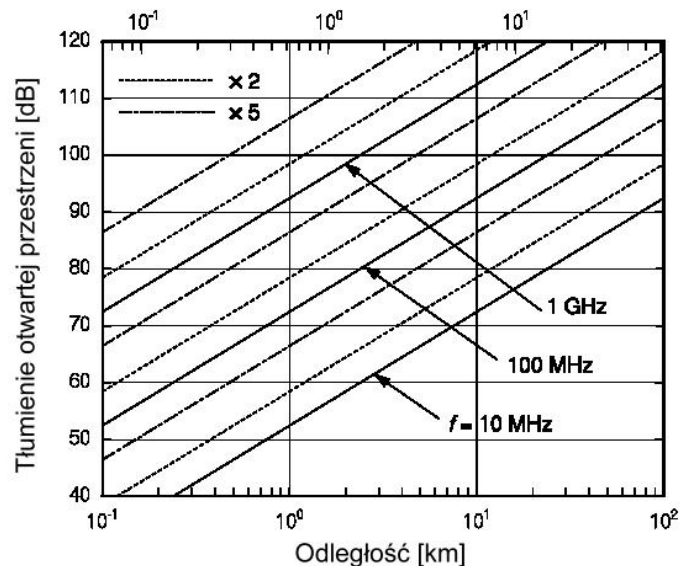
$$L_{fs} = -10 \log \left( \frac{P_r}{P_t G_r G_t} \right) = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad [\text{dB}],$$

a po przekształceniu do postaci wygodnej dla obliczeń inżynierskich:

$$L_{fs} = 20 \log \left( \frac{40\pi d \text{ [km]} \cdot f \text{ [MHz]}}{3} \right), \quad \text{albo w decybelach:}$$

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

gdzie: odległość między antenami  $d$  jest wyrażona w km,  
a częstotliwość sygnału radiowego  $f$  w MHz, por. rys. 19.



Rys. 19: Tłumienie trasy w otwartej przestrzeni w funkcji odległości i częstotliwości fali

Przykłady. 1. Obliczone wg podanego wzoru średnie tłumienie fali w paśmie 2,4 GHz na trasie 100 m w otwartej przestrzeni ( $f = 2450$  MHz,  $d = 0,1$  km) wynosi:

$L_{fs} = 32,44 + 47,78 \approx 80,2$  dB, z nierównomiernością na krańcach zakresu  $-0,18/+0,12$  dB, którą dla celów praktycznych można pominąć.

W tym samym paśmie na trasie 1 km  $L_{fs} \approx 100,2$  dB.

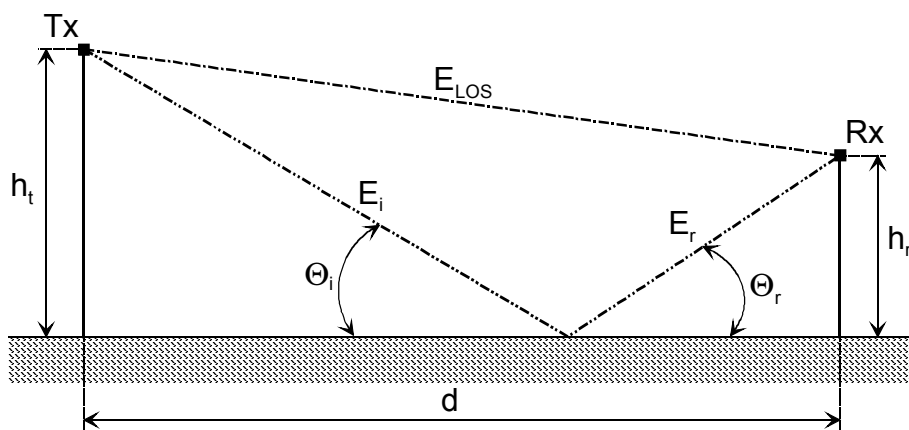
2. W pasmach 5 GHz obliczone wg podanego wzoru średnie tłumienie fali w otwartej przestrzeni wynosi odpowiednio:

- ( $f = 5250$  MHz,  $d = 100$  m)  $\approx 86,8$  dB,
- ( $f = 5600$  MHz,  $d = 100$  m)  $\approx 87,4$  dB,

a więc jest o 6,6 dB / 7,2 dB większe niż w paśmie 2,4 GHz.

#### 4.1.2. Propagacja fal radiowych nad ziemią

W rzeczywistym środowisku w radiokomunikacji lądowej, w odróżnieniu od otwartej przestrzeni, fale radiowe na drodze pomiędzy anteną nadawczą i anteną odbiorczą napotykają na przeszkody, które zmieniają ich bieg, wskutek zjawisk takich jak: odbicia, dyfrakcja (ugięcie), refrakcja (rozpraszanie), propagacja duktowa, które wnoszą dodatkowe tłumienie i powodują zaniki sygnału. Zatem faktyczne tłumienie trasy fali radiowej pomiędzy anteną nadawczą a anteną odbiorczą jest zależne od charakterystyk środowiska i różni się znacznie od obliczonego wyżej dla przypadku przestrzeni otwartej.



Rys. 20: Propagacja fali nad powierzchnią przewodzącą

gdzie:  $E_{LOS}$  – składowa bezpośrednia (LOS),  
 $E_i$  – składowa padająca na ziemię pod kątem  $\Theta_i$ ,  
 $E_r$  – składowa odbita od ziemi pod kątem  $\Theta_r$ .

Nawet w najprostszym modelu polegającym na analizowaniu propagacji fali w terenie otwartym, bez jakichkolwiek przeszkód nad płaską powierzchnią ziemi, do anteny odbiorczej dociera fala bezpośrednia (po linii widoczności optycznej) o natężeniu pola  $E_{LOS}$  i fala odbita od powierzchni ziemi o natężeniu pola  $E_R$ , por. rys. 20. Można wykazać [26], że dla odległości  $d$ , dużej w porównaniu z wysokością zawieszania anteny nadawczej  $h_t$  i odbiorczej  $h_r$ , czyli przy założeniu, że  $d \gg \sqrt{h_t h_r}$  stosunek mocy odbieranej ( $P_r$ ) do nadawanej ( $P_t$ ) wynosi:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \right) G_t G_r, \text{ a więc jest zależny od czwartej potęgi odległości pomiędzy antenami.}$$

Należy przyjąć, że charakter pokrycia terenu (zbiorniki wodne, zabudowania, las, istnienie i rodzaj zabudowy) różnicuje lokalne warunki propagacji i może być uwzględniany jako charakterystyczne tłumienie (uśrednione) trasy przebiegającej nad/przez tego rodzaju środowisko.

Ogólnie dla potrzeb modelowania warunków propagacji z uwzględnieniem zmiany tłumienia trasy w określonych środowiskach moc sygnału odbieranego  $P_r$  w funkcji długości trasy  $d$  można wyrazić zastępując w podanym wcześniej wzorze na tłumienie trasy w wykładniku potęgi liczbę 2 (otwarta przestrzeń), albo 4 (propagacja nad powierzchnią przewodzącą odbijającą fale) liczbą charakterystyczną dla danego środowiska, czyli:

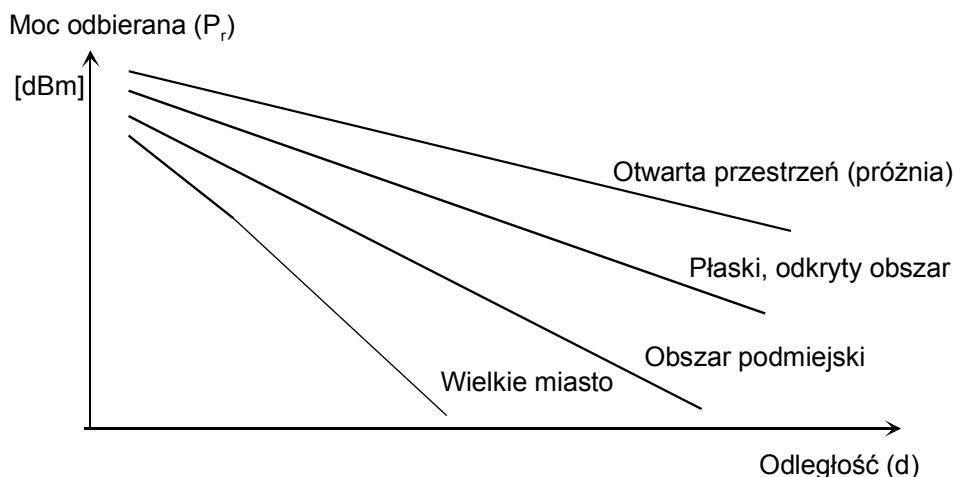
$$P_r = \frac{K}{d^n}, \text{ gdzie:}$$

$n = 2$  dla otwartej przestrzeni (próżni),

$3 \leq n \leq 4$  typowo w sieciach komórkowych radiokomunikacji ruchomej,

$4 \leq n \leq 6$  w wysokiej zabudowie dużych miast i wewnątrz budynków.

Zależności te przedstawiono poglądowo na rys. 21. Niektórzy autorzy stosując taki uproszczony model propagacji stosują dwie różne wartości  $n$ : mniejszą w strefie, gdzie występuje fala bezpośrednia i drugą większą w części trasy, gdzie nie występuje fala bezpośrednia.



Rys. 21: Wpływ charakterystyki terenu na zasięg sieci radiowej

Oczywiście oszacowanie tłumienia trasy za pomocą tak prostych modeli jest obarczone bardzo dużymi błędami. Z tego powodu do projektowania sieci radiokomunikacji ruchomej i łącz radiowych pomiędzy określonymi punktami, w różnych zakresach częstotliwości, opracowano i zaleca się wiele modeli:

- empirycznych – opartych na wnioskach z danych pomiarowych, w których uwzględnia się zróżnicowane, statystyczne charakterystyki terenu,
- semi-empirycznych, w których częściowo wykorzystuje się modele empiryczne, ale uwzględnia również wiele innych informacji charakteryzujących trasę.

Stosowanie tych modeli wymaga bardzo wielu obliczeń, toteż w praktyce do projektowania sieci komórkowych i tras linii punkt-punkt i punkt do wielu punktów oferowane są specjalne pakiety oprogramowania, ich praktyczna użyteczność i równocześnie stopień komplikacji rośnie, gdy są powiązane z cyfrowymi mapami terenu, w tym z mapami trójwymiarowymi.

Większość empirycznych i semi-empirycznych metod obliczania tłumienia trasy opisanych w literaturze dotyczy zakresów częstotliwości pomiędzy 160 MHz a 1900 MHz, stosowanych w sieciach ruchomych dyspozytorskich i publicznych. Brak zaleceń odnośnie prognozowania w zakresach 2,4 GHz i 5 GHz w mikro- i pikokomórkach.

Uwaga. Modele te mają charakter probabilistyczny, pozwalają na obliczanie średniej wartości natężenia pola z określonym prawdopodobieństwem. W rzeczywistości lokalna wartość natężenia pola może znacznie różnić się od obliczonej średniej. Odchylenie średniokwadratowe  $\sigma$  może wynosić od kilku do kilkunastu decybeli.

#### 4.1.3. Modelowanie trasy LOS

W przypadku częstotliwości mikrofalowych linia bezpośredniej widoczności (LOS) jest pojęciem, które obejmuje obszar tzw. stref Fresnela. Strefy Fresnela są elipsoidami otaczającymi linię widoczności optycznej poprowadzoną od anteny nadawczej do anteny odbiorczej. Strefy Fresnela reprezentują w przestrzeni obszary, gdzie długość drogi fal od anteny nadawczej do odbiorczej jest o  $n \times \lambda/2$  większa od całkowitej długości trasy wzdłuż linii widoczności optycznej. (Składowe fale, których trasy różnią się o  $n \times \lambda/2$  sumują się albo

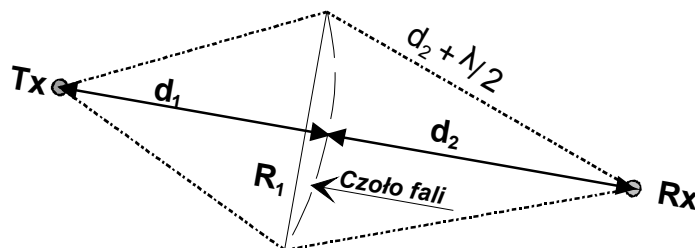
w fazie zgodnej albo przeciwnej, wzmacniając lub obniżając natężenie pola w miejscu umieszczenia anteny odbiorczej).

Zasadnicza część energii fali radiowej skupia się w pierwszej strefie Fresnela ( $n = 1$ ), a jej promień można obliczyć z zależności:

$$R_1 = \sqrt{\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \lambda}$$

gdzie:  $d_1$ ,  $d_2$  są odległościami czoła fali odpowiednio od anteny nadajnika (Tx) i anteny odbiornika (Rx), a  $\lambda$  jest długością fali, por. rys. 22.

Promień  $R_1$  przyjmuje największą wartość w połowie trasy i zgodnie z podanym wzorem bliżej końców trasy jest mniejszy. Należy jednak pamiętać, że wzór ten wyprowadzono przy założeniu, że  $d_1, d_2 \gg R_1$ . I nie należy sądzić, że przy  $d_1$  lub  $d_2 = 0$  promień strefy Fresnela wynosi zero.

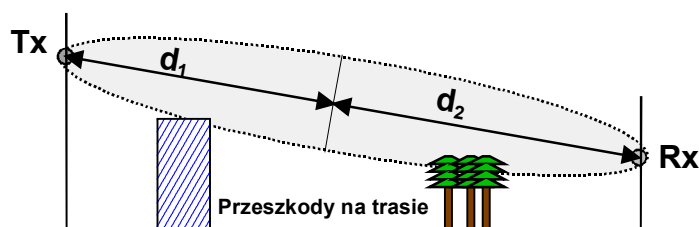


Rys. 22: Obliczanie promienia pierwszej strefy Fresnela

Przykład. Dla łącza punkt-punkt o długości 1 km maksymalny promień pierwszej strefy Fresnela wynosi:

- przy częstotliwości 2,4 GHz: ~5,6 m,
- przy częstotliwości 5,5 GHz: ~3,7 m.

Każdy obiekt na trasie między anteną nadawczą a anteną odbiorczą, który przesłania pierwszą strefę Fresnela, rys. 23, powoduje dyfrakcję fali radiowej i wprowadza dodatkowe tłumienie. Wielkość tłumienia dyfrakcyjnego zależy od stosunku powierzchni wiązki przesłoniętej przez przeszkodę do całkowitej powierzchni wiązki (strefy) oraz rodzaju samej przeszkody. Jeżeli łącze pomiędzy dwoma punktami ma być traktowane jako łącze bez przeszkód, to zaleca się by co najmniej 60% promienia pierwszej strefy Fresnela pozostawało wolne od przeszkód. W podręcznikach i zaleceniach ITU-R [26 ÷ 30] można znaleźć wzory i nomogramy umożliwiające obliczenie tego rodzaju tłumienia dla pojedynczych przeszkód modelowanych klinem lub powierzchnią walca.



Rys. 23: Potrzeba lokalizacji przeszkód w pierwszej strefie Fresnela

Należy przy tym pamiętać, że przekrój poprzeczny strefy Fresnela jest kołem, innymi słowy że należy ją rozpatrywać w trzech wymiarach, a to oznacza, że nie tylko obiekty pod i nad



linią bezpośredniej widoczności, ale także znajdujące się po obu stronach tej linii, mogą przesłonić trasę fali radiowej.

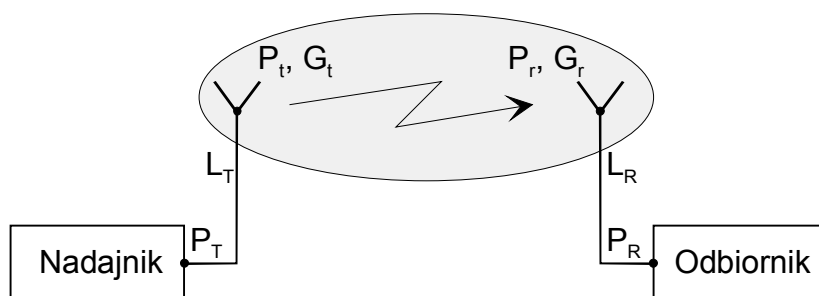
Ten aspekt projektowania łącza radiowego należy również uwzględniać w sytuacji, gdy antena montowana na dachu musi być odsunięta od jego krawędzi. W określonych sytuacjach (np. łącza radiowe RLAN do sąsiadujących niskich budynków) część strefy Fresnela może zostać przesłonięta przez krawędź dachu.

Tym samym projektując łącze RLAN, np. punkt do punktu pomiędzy dwoma budynkami, jako łącze dostępu do Internetu, należy brać pod uwagę nie tylko linię widoczności optycznej, ale także wszystkie przeszkody znajdujące się w strefie Fresnela.

#### 4.2. Obliczanie bilansu łącza radiowego

Poziom sygnału dostarczanego na wejście odbiornika  $P_R$  [dBm] powinien być odpowiednio wyższy od progu czułości tego odbiornika (dla danej częstotliwości, szybkości transmisji i rodzaju modulacji), por. punkt 3.5. Margines pomiędzy wartością progową czułości odbiornika a poziomem sygnału odbieranego ma zapewniać wymagane prawdopodobieństwo dostępności łącza z uwzględnieniem, zależnie od przyjętego modelu, jednego lub więcej spośród z następujących czynników, por. rys. 24:

- szum własny odbiornika,
- losowe zmiany tłumienia fali między anteną nadajnika i anteną odbiornika,
- zakłócenia wspólnokanałowe (od innych RLAN lub z innych źródeł),
- stałości parametrów nadajnika i odbiornika oraz tolerancji wykonania (różnice między egzemplarzami tego samego typu).



Rys. 24: Podstawowe parametry bilansu łącza radiowego

Moc promieniowaną (e.i.r.p.) przez stację nadawczą wyraża zależność:

$$P_t + G_t, \text{ a przy tym } P_t = P_T - L_T,$$

gdzie:

- $P_t$  [dBm] – moc doprowadzona do anteny nadawczej,
- $G_t$  [dBi] – zysk anteny nadawczej,
- $P_T$  [dBm] – moc dysponowana na złączu antenowym nadajnika,
- $L_T$  [dB] – tłumienie połączenia nadajnika z anteną nadawczą,

zatem moc wypromieniowana (e.i.r.p.) wynosi:  $P_T - L_T + G_t$  [dBm].

Moc doprowadzoną do wejścia odbiornika  $P_R$  [dBm] wyraża zależność:

$$P_R = P_r + G_r - L_R,$$

gdzie:

- $P_r$  [dBm] – moc odbierana przez antenę izotropową,
- $G_r$  [dBi] – zysk anteny odbiorczej względem izotropowej,
- $L_R$  [dB] – tłumienie połączenia anteny odbiorczej z odbiornikiem.

Jeżeli tłumienie trasy pomiędzy antenami wynosi  $L_P$  [dB], to po przekształceniu:

$$P_R = P_T - L_T + G_t - L_P + G_r - L_R \text{ [dB]}$$

To równanie jest nazywane bilansem lub budżetem łącza radiowego (*link budget*). Obejmuje parametry sprzętu, które można uzyskać z dokumentacji technicznej urządzeń RLAN, kabli, złącz RF i anten oraz składnik  $L_P$ , o charakterze zmiennej losowej, por. punkty 3.1 oraz 3.3 i 3.4. Łącze powinno być zrównoważone, tzn. marginesy  $P_R$  w stosunku do wartości progowej obliczone dla obu kierunków transmisji (*downlink i uplink*) powinny być takie same.

#### 4.2.1. Projektowanie łącza punkt-punkt

Poza wyborem wersji systemu projektowanie łącza punkt-punkt polega na obliczeniach bilansu energetycznego łącza i optymalizacji parametrów zastosowanego sprzętu.

Podstawy teoretyczne do przeprowadzenia tego rodzaju obliczeń w zwartej formie znajdują się w Zaleceniach ITU-R serii P, spośród których dla projektowania zasięgów użytecznych podstawowym jest Zalecenie ITU-R P.530 [31], a dla projektowania zasięgów zakłóceńowych Zalecenie ITU-R P.452 [32].

Oprócz lokalizacji stacji końcowych wyjściowymi parametrami do każdego projektu są:

- istniejące ograniczenia:
  - administracyjne – dotyczące np. maksymalnej mocy promieniowanej, umieszczania masztów na budynkach i in.;
  - techniczne – określające akceptowalne charakterystyki sprzętu w powiązaniu z kosztem instalacji, np. rozmiar i masa anteny;
  - techniczne – związane z ograniczeniami fizycznymi, np. wartość progowa poziomu na wejściu odbiornika dla określonego rodzaju modulacji.
- zakładana dostępność (*availability*) łącza.

Uwaga. Dostępność zalecana dla łączy profesjonalnych nie powinna być mniejsza niż 99,995% w roku dla jednego kierunku transmisji.

Projektanci mogą korzystać z różnych narzędzi wspomagających obliczanie. Proste programy bazujące na obliczaniu tłumienia trasy w otwartej przestrzeni udostępnia na swoich stronach wiele firm oferujących sprzęt dla radiowych sieci dostępowych.

Bardziej zaawansowane, jak opracowany w Instytucie Łączności "TrasaZ" [33], umożliwiają obliczenie tłumienia trasy z uwzględnieniem: wysokości zawieszenia anten, tłumienia trasy wynikającego z wielodrogowości i rodzaju terenu, tłumienia dyfrakcyjnego związanego z przeszkodami w pierwszej strefie Fresnela i wpływu zjawisk atmosferycznych specyficznych dla klimatu Polski, oraz obliczenie statystycznej dostępności łącza w okresie najgorszego miesiąca i średnio w skali roku. W przypadku najbardziej zaawansowanych programów profil trasy uzyskuje się z cyfrowych map terenu po wprowadzeniu współrzędnych punktów końcowych trasy.

### Przykład 1.

*Wykorzystano program dostępny pod adresem:*

*[http://www.antennspecialisten.se/en/support/WDT\\_linkbudget.html](http://www.antennspecialisten.se/en/support/WDT_linkbudget.html)*

### Założenia:

Obliczanie bilansu łącza dla trasy w paśmie 2,4 GHz.

Długość trasy: 1 km.

System: 802.11g, standardowe wartości czułości odbiornika (por. punkt 3.5).

Margines dla zaników: 3 dB.

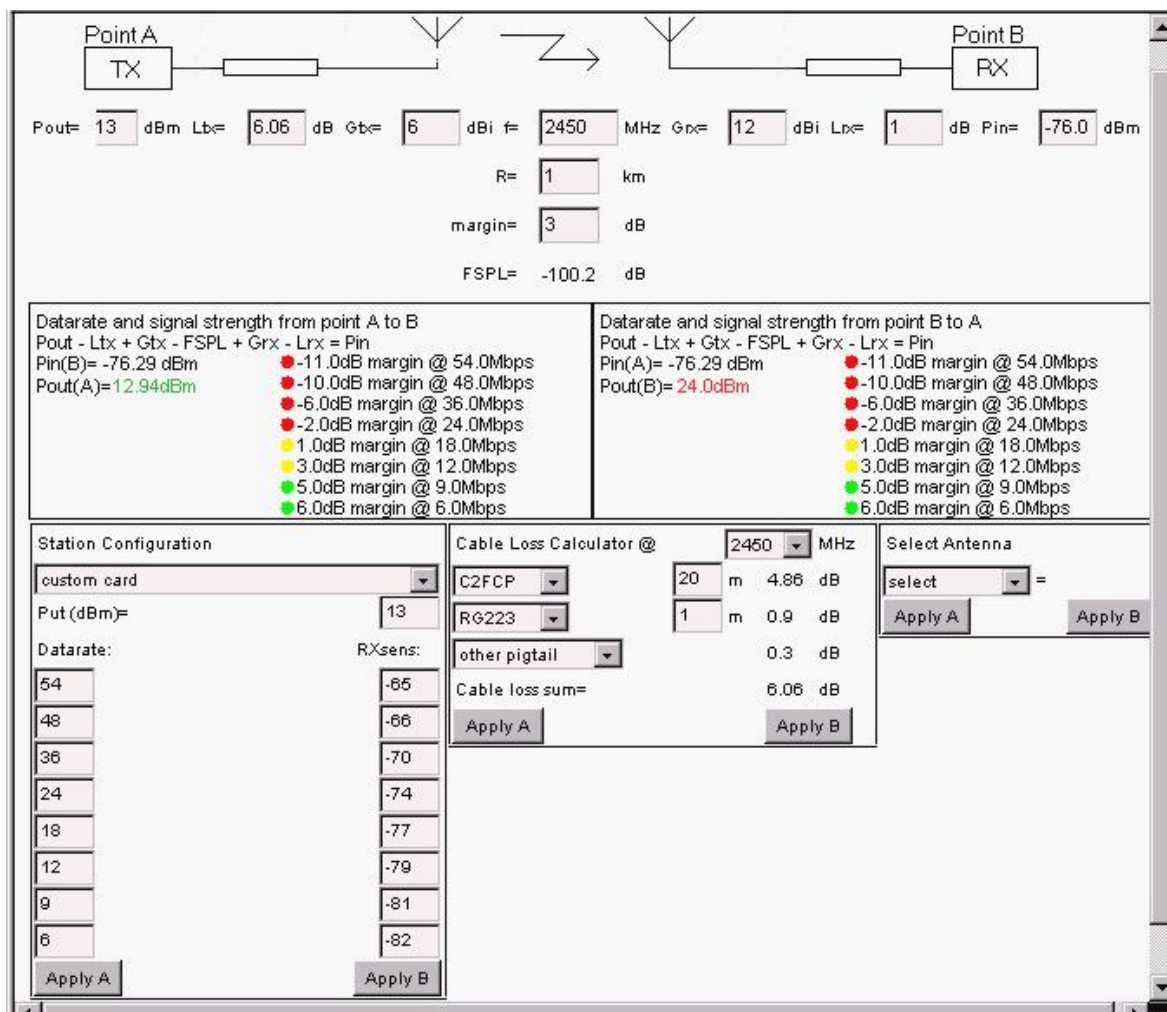
Uwaga. Program oblicza tłumienie trasy jako tłumienie w otwartej przestrzeni (por. punkt 4.1.1, przykład dla 2,45 GHz & 1 km => FSPL = 100,2 dB).

### Punkt A:

- moc na złączu nadajnika: 13 dBm,
- antena dookólna o zysku: 6 dBi,
- kabel główny typu C2FCP o dł. 20 m: 4,86 dB  
+ jumper z kabla RG223 o dł. 1 m: 0,9 dB  
+ pigtail: 0,3 dB,
- razem połączenie kablowe: 6,06 dB.

### Punkt B:

- moc na złączu nadajnika: 13 dBm,
- antena panelowa o zysku: 12 dBi,
- razem połączenie kablowe: 1 dB.



Rys. 25: Przykład ekranu programu wspomagającego projektowanie łącza RLAN

Legenda:

- kolor zielony – warunki właściwe,
- kolor żółty – zbyt małe marginesy dla zakłóceń,
- kolor czerwony – warunki niewłaściwe, brak komunikacji.

Wyniki symulacji przedstawione na rys. 25 wskazują na:

- przekroczenie dopuszczalnej mocy promieniowanej w punkcie B (24 dBm),
- poziom wejściowy gwarantujący pracę z szybkością transmisji 6 i 9 Mbit/s,
- zbyt mały margines tłumienia łącza do pracy z szybkością 12 i 18 Mbit/s,
- poziom wejściowy poniżej progu czułości dla większych szybkości transmisji.

Wniosek. Należy zmienić założenia projektu.

Przykład 2.

Wykorzystano: program firmy TIL-TEK:

Założenia:

Projektowanie łącza punkt-punkt między budynkami odległymi w linii prostej o 300 m.

System 802.11b.

Oszacowane tłumienie spowodowane dyfrakcją: 5 dB.

Pozostałe założenie i wyniki na wydruku ekranu (rys. 26), a objaśnienia w tablicy na następnej stronie.

Ref.	Description	Data	Data
1	Site Name	Punkt dostępu	Klient nr xx
2	Antenna Type	Omni 1	Panel 1
3	Antenna Gain (dBi)	9	9
4	Transmission Line Type	LMR-400	LMR-400
5	<b>Transmission Line Loss (dB/100m)</b>	21,950	21,950
6	Transmission Line Length (m)	20	10
7	<b>Transmission Line Loss (dB)</b>	<b>4,39</b>	<b>2,20</b>
8	Connector Loss (dB)	0,5	0,5
9	Divider / Combiner Loss (dB)	0	0
10	Equipment Tolerances (dB)	0,5	0,5
11	Path Length (Km)	0,30	
12	Frequency (GHz)	2,45	
13	<b>Free Space Attenuation (dB)</b>	<b>89,78</b>	
14	Diffraction Loss (dB)	5	
15	Radio Type	Access Point	Terminal
16	Transmitter Power (dBm)	16	13
17	<b>Free Space Receive Signal Level (dBm)</b>	<b>-72,36</b>	<b>-69,36</b>
18	<b>Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) (dBm)</b>	<b>19,61</b>	<b>18,81</b>
19	Receiver Threshold Criteria (BER)	BER 10 EXP-6	BER 10 EXP-6
20	Receiver Threshold Level (dBm)	-76	-76
21	<b>Thermal Fade Margin (dB)</b>	<b>3,64</b>	<b>6,64</b>
22	Refractivity Gradient Below -100N/km PL (%)	5	
23	Site A Altitude (ASL) (m)	600	605
24	Site B Altitude (ASL) (m)	605	600
25	Site Latitude (dN or dS)	52	
26	Longitudinal Coefficient Clon (dB)	3	
27	Site A Antenna Height (AGL) (m)	20	12
28	Site B Antenna Height (AGL) (m)	12	20
29	<b>Worst Month Availability (%)</b>	<b>99,999194</b>	<b>99,999998</b>
30	<b>Worst Month Outage Time (sec.)</b>	<b>21,18</b>	<b>0,04</b>
31	<b>One Way Annual Availability (%)</b>	<b>99,999971</b>	<b>100,000000</b>
32	<b>One Way Annual Outage Time (sec.)</b>	<b>9,13</b>	<b>0,02</b>

Rys. 26: Przykład ekranu programu wspomagającego projektowanie łącza punkt-punkt

Objaśnienia do rys. 26.

Ref.	Description	Opis
1	Site Name	Nazwa obiektu dla potrzeb identyfikacji
2	Antenna Type	Typ zastosowanej anteny, dla potrzeb identyfikacji
3	Antenna Gain [dBi]	Znamionowy zysk anteny zastosowanej w danym obiekcie
4	Transmission Line Type	Rodzaj kabla antenowego, który ma być użyty do połączenia anteny nadawczej / odbiorczej
5	Transmission Line Loss [dB/100m]	Tłumienie kabla antenowego [dB/100 m] na częstotliwości roboczej (wg danych producenta)
6	Transmission Line Length [m]	Długość kabla antenowego [m] użytego do połączenia nadajnika / odbiornika z anteną
7	Transmission Line Loss [dB]	Tłumienie kabla antenowego obliczone wg wzoru: $\frac{T_L \cdot L_T}{100}$ , gdzie: $T_L$ tłumienie [dB/100 m], $L_T$ długość kabla [m].
8	Connector Loss [dB]	Oszacowane tłumienie złącza RF użytego do połączenia kabla z nadajnikiem / odbiornikiem, – jeżeli brak danych producenta. Należy przyjąć nie mniej niż 0,25 dB / złącze.
9	Divider / Combiner Loss [dB]	Jeżeli w systemie jest układ rozdzielający moc na dwie anteny lub sumujący moc dwóch urządzeń radiowych należy wpisać tłumienie pomiędzy jego portami wejścia / wyjścia wg danych producenta.
10	Equipment Tolerances [dB]	Parametr obejmuje tolerancje parametrów zależnie od egzemplarza ( $\pm\Delta$ względem wartości znamionowej) oraz nie uwzględnione tłumienie innych elementów.
11	Path Length [km]	Długość trasy [km]
12	Frequency [GHz]	Częstotliwość [GHz] zwykle środkowa częstotliwość pasma.
13	Free Space Attenuation [dB]	Tłumienie w otwartej przestrzeni [dB]: $92,4 + 20\log(d) + 20\log(F)$ , gdzie: d – długość trasy [km] F – częstotliwość [GHz]
14	Diffraction Loss [dB]	Jeżeli trasa jest przesłonięta należy oszacować i wpisać tłumienie wnoszone wskutek dyfrakcji. Jeżeli pierwsza strefa Fresnela jest wolna w co najmniej 60% wpisać 0.
15	Radio Type	Miejsce na wpisanie typu urządzenia (opcja)
16	Transmitter Power	Moc wyjściowa nadajnika [dBm]
17	Free Space Receive Signal Level	Poziom sygnału oczekiwany na wejściu odbiornika [dBm] przy uwzględnieniu następujących składników budżetu łącza: – mocy nadajnika [dBm], – sumy zysków anteny nadawczej i odbiorczej [dBi], – sumy tłumienia kabli antenowych [dB], – sumy tłumienia wszystkich złącz kablowych [dB], – sumy tłumienia dzielników / sumatorów mocy [dB], – tłumienie otwartej przestrzeni [dB], – tłumienie wskutek dyfrakcji [dB].
18	Effective Isotropic Radiated Power [EIRP]	Równoważna moc promieniowana izotropowo przez antenę. Parametr istotny ze względu na istniejące ograniczenia administracyjne. P (e.i.r.p.) [dBm] jest obliczana jako suma mocy nadajnika [dBm] i zysku anteny [dBi] minus suma tłumienia wszystkich

		złącz kablowych, kabli, dzielników / sumatorów mocy i tolerancji wykonania [dB].
19	Receiver Threshold Criteria [BER]	Wartość progowa poziomu sygnału [dBm] przyjęta dla danego BER jako czułość odbiornika.
20	Receiver Threshold Level [dBm]	Wartość progowa poziomu sygnału [dBm] przyjęta jako czułość odbiornika dla danego BER
21	Thermal Fade Margin [dB]	Różnica pomiędzy poziomem sygnału oczekiwanym na wejściu odbiornika, a wartością progową określa margines poziomu sygnału [dB] ponad wartością wymaganą pozostawiony dla uniknięcia skutków sporadycznych zaników.
22	Refractivity Gradient Below $-100\text{N/km}$ (PL) [%]	Określa procent czasu, pomiędzy 0 a 100%, gdy względny współczynnik refrakcji w danym rejonie geograficznym jest poniżej $-100\text{ N/km}$ . Parametr konieczny dla obliczenia dostępności wg zalec. ITU-R P.530.
23	Site A Altitude (AMSL) [m]	Wysokość ponad poziomem morza stacji A. Parametr potrzebny do policzenia kąta nachylenia trasy i kąta padania wg zalec. ITU-R P.530.
24	Site B Altitude (AMSL) [m]	Wysokość ponad poziomem morza stacji B. Parametr potrzebny do policzenia kąta nachylenia trasy i kąta padania wg zalec. ITU-R P.530.
25	Site Latitude [ $^{\circ}\text{N}$ or $^{\circ}\text{S}$ ]	Szerokość geograficzna w stopniach. Parametr potrzebny do obliczenia dostępności wg zalec. ITU-R P.530.
26	Longitudinal Coefficient (Clon) [dB]	Współczynnik zależny od lokalizacji geograficznej [dB], w Europie 3 dB. Parametr potrzebny do obliczenia dostępności wg zalec. ITU-R P.530.
27	Site A Antenna Height (AGL) [m]	Wysokość zawieszenia anteny A nad poziomem gruntu Parametr potrzebny do obliczenia dostępności wg zalec. ITU-R P.530.
28	Site B Antenna Height (AGL) [m]	Wysokość zawieszenia anteny B nad poziomem gruntu Parametr potrzebny do obliczenia dostępności wg zalec. ITU-R P.530.
29	Worst Month Availability [%]	Procent czasu [%], w którym poziom sygnału oczekiwany na wejściu odbiornika, dla danej lokalizacji stacji, jest powyżej wartości progowej podczas zaników najgorszego miesiąca Obliczenie wg zalec. ITU-R P.530.
30	Worst Month Outage Time [sec]	Czas niedyspozycji w najgorszym miesiącu [sek]. Oszacowany czas w sekundach, w którym poziom sygnału oczekiwany na wejściu odbiornika podczas zaników najgorszego miesiąca jest poniżej wartości progowej.
31	One Way Annual Availability [%]	Roczna dostępność w jednym kierunku. Procent czasu [%], w którym poziom sygnału oczekiwany na wejściu odbiornika, dla danej lokalizacji stacji, jest powyżej wartości progowej wskutek zaników w okresie roku Obliczenie wg zalec. ITU-R P.530.
32	One Way Annual Outage Time [sec]	Łączny czas niedyspozycji w ciągu roku dla jednego kierunku. Oszacowany czas [sek], w którym poziom sygnału oczekiwany na wejściu odbiornika wskutek zaników w ciągu roku jest poniżej wartości progowej.

#### 4.2.2. Projektowanie łącza punkt do wielu punktów

Każde łącze w sieci punkt do wielu punktów (PMP) można traktować jako osobne łącze punkt-punkt i obliczyć dla niego bilans energetyczny. W tym sensie proces projektowania takiej sieci nie różni się od opisanego w punkcie 3.2.1 projektowania łącza punkt-punkt.

Istotna różnica w stosunku do obliczeń stosowanych dla łącza punkt-punkt polega na tym, że należy uwzględnić charakterystykę kierunkową promieniowania anteny punktu dostępowego, ponieważ w przypadku stosowania anteny sektorowej azymuty stacji użytkowników mogą nie pokrywać się z kierunkiem maksymalnego promieniowania anteny. Zatem jeżeli AP jest wyposażony w antenę kierunkową, to do bilansu każdego łącza sieci PMP należy wprowadzić dodatkowe tłumienie  $L_{\theta}$  związane z kątem  $\theta$  pomiędzy azymutem stacji użytkownika, a kierunkiem, dla którego wyznaczono zysk anteny.

W Instytucie Łączności w Warszawie opracowano program [33] do obliczania tras naziemnych mikrofalowych linii radiowych o nazwie "TrasaZ". Program ten może być wykorzystany do obliczania tłumienia trasy w łączach punkt-punkt i punkt do wielu punktów.

Ze względu na szerszy kąt promieniowania anten trudniejsza staje się koordynacja zasięgów zakłóceń.

W przypadku sieci punkt do wielu punktów ze stacjami wyposażonymi w anteny montowane na zewnątrz budynków może być konieczne wyznaczenie całkowitej mocy zakłóceń (*Total Interfering Power, TIP*), obliczonej dla pasma odbiornika z uwzględnieniem jego selektywności wg Zalecenia ECC/REC 01-05 [34] wg formuły:

$$TIP = 10 \log \left( \sum_{i=1}^{i=n} 10^{(Pc_i / 10)} + \sum_{j=1}^{j=m} 10^{(Pa_j / 10)} \right) \text{ [dBm]}, \text{ gdzie:}$$

$Pc_i$  [dBm] całkowita moc "i-tego" zakłócenia wspólnokanałowego spośród  $n$  uwzględnianych,

$Pa_j$  [dBm] całkowita moc "j-tego" zakłócenia sąsiedniokanałowego spośród  $m$  uwzględnianych.

Zaleca się analizowanie wpływu wszystkich źródeł zakłóceń w zakresie częstotliwości  $\pm 250\%$  odstepu kanałowego odbiornika metodą określania gęstości mocy osobno dla każdego 1 MHz pasma.

#### 4.3. Zasięg na zewnątrz budynków dla terminali noszonych

Przykładem modelu semi-empirycznego opracowanego do obliczeń tłumienia tras w małych komórkach w warunkach rzeczywistych [27, 28] jest model COST 231 – Walfisch-Ikegami (COST 231-WI),<sup>6</sup> w którym uwzględnia się charakterystyki zabudowy miejskiej, wysokość budynków, szerokość ulic, odległość między budynkami i kierunek dróg względem kierunku trasy radiowej, przy wysokości zawieszenia anteny nadawczej między 4 a 50 m, odbiorczej między 1 a 3 m, odległość między nadajnikiem i odbiornikiem 0,02 do 5 km.

W modelu COST 231-WI wyróżnia się dwa przypadki:

- bezpośredniej widoczności anten (LOS), dla takiej trasy tłumienie oblicza się według zależności:

$$L_{LOS} [\text{dB}] = 42,6 + 26 \log d [\text{km}] + 20 \log f [\text{MHz}]$$

<sup>6</sup> Model optymalizowany dla zakresu częstotliwości 800 MHz do 2000 MHz. Tu wskazany jako jeden z możliwych do wykorzystania modeli semi-empirycznych.



- braku bezpośredniej widoczności anten (NLOS), dla takiej trasy tłumienie oblicza się według zależności:

$$L_{NLOS} [\text{dB}] = L_{fs} + L_{rts} + L_{MSD}, \text{ gdzie:}$$

$L_{fs} [\text{dB}] = 32,44 + 20 \log d [\text{km}] + 20 \log f [\text{MHz}]$  jest tłumieniem w otwartej przestrzeni,

a  $L_{rts}$ ,  $L_{MSD}$  są funkcjami wielu parametrów, por Zalecenie ITU-R P.1411 [30], przy czym:

$L_{rts}$  – opisuje tłumienie między anteną stacji bazowej (na dachu), a poziomem ulicy (*roof-to-street loss*),

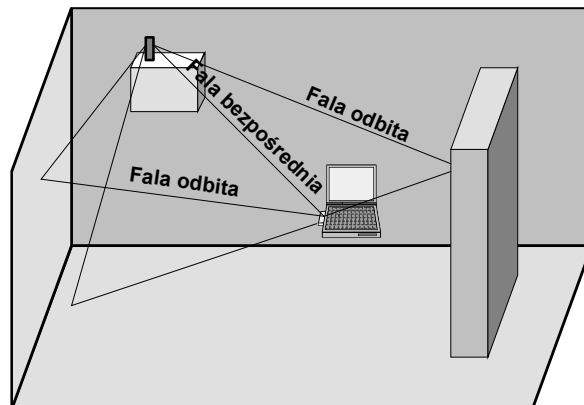
$L_{MSD}$  – opisuje tłumienie wskutek wielokrotnej dyfrakcji (*multi-diffraction loss*).

#### 4.4. Tłumienie fali w pomieszczeniach

Propagację fal radiowych wewnątrz budynków charakteryzują [35]:

- na ogół małe odległości pomiędzy przeszkodami, różnorodność i zmienność przeszkód (ściany, stropy, meble i inne wyposażenie),
- zmienność sytuacji (drzwi otwarte / zamknięte, przechodzące osoby),
- zmienność otoczenia na małej odległości,
- małe odległości między komunikującymi się urządzeniami.

Ze względu na wielokrotne odbicia sygnału radiowego od podłogi, sufitu, ścian i wyposażenia pomieszczeń, rys. 27, jest to środowisko "niepowtarzalne", trudne do odwzorowania za pomocą uniwersalnych modeli propagacji fal radiowych, które dają się stosować w postaci formuł przydatnych do obliczeń inżynierskich.



Rys. 27: Odbicia sygnału od ścian i wyposażenia pomieszczeń

W dostępnej literaturze przedstawiono kilka metod oszacowania tłumienia trasy wewnątrz pomieszczeń.

W zaleceniu ITU-R P.1238-3 [35] zakłada się, że AP i terminal znajdują się w tym samym budynku. Uwzględnia się tłumienie fal pomiędzy piętrami, co pozwala planować wykorzystanie częstotliwości na poszczególnych piętrach. Każdą ścianę można traktować jako dodatkowe tłumienie. Do obliczania tłumienia trasy podano formułę:

$$L_t = 20 \log f + 10 n \log D + L_f(N) - 28 [\text{dB}], \text{ gdzie:}$$

$L_t$  – całkowite tłumienie trasy [dB],

$f$  – częstotliwość fali [MHz],

$D$  – odległość terminal – AP [m],

- $n$  - współczynnik charakteryzujący środowisko propagacji, przy czym:  
 $n = 3,2$  dla pomieszczeń biurowych,  
 $n = 2,8$  dla wnętrza domowego,  
 $N$  - liczba pięter,  
 $L_f(N)$  - tłumienie pięter [dB].

Dla typowych zakresów częstotliwości stosowanych w RLAN wzór można uprościć do postaci:

$$L_i(2,45 \text{ GHz}) \cong 40 + 10 n \log D + L_f(N) \text{ [dB]},$$

$$L_i(5,2 \text{ GHz}) \cong 46 + 10 n \log D + L_f(N) \text{ [dB]}.$$

Dla budynku biurowego:  $L_f = 15 + 4(N - 1)$  [dB] przy częstotliwości rzędu 2 GHz,  
 $L_f = 16$  dB dla piętra przy częstotliwości 5,2 GHz.

Zwrócono uwagę na to, że:

- na trasach, gdzie do terminala dochodzi i dominuje składowa bezpośrednia (LOS), np. w halach, dużych sklepach detalicznych, można przyjąć  $n \approx 2$ ;  
 Niektórzy autorzy stosują tę zasadę w odległości do 8 m.
- korytarze wykazują tłumienie mniejsze niż obserwowane w otwartej przestrzeni, można przyjąć  $n \approx 1,8$ ;
- propagacja na długiej trasie z występującymi przeszkodami, zaburzającymi pierwszą strefę Fresnela  $n \approx 2$  do 4;
- przy propagacji przez przeszkody, np. z pokoju do pokoju, należy przyjmować  $n \approx 4$ ;
- wszystkie kanały nawiewu powietrza, instalacje elektryczne i podwieszane sufity zwiększają wypadkowe tłumienie piętra.

Standardowa dewiacja tłumienia trasy w pomieszczeniach wynosi ok. 10 dB dla pasma 2,4 GHz i ok. 12 dB dla pasma 5,2 GHz.

Znany producent urządzeń RLAN Atheros Communications [37] zaleca inną formułę szacowania tłumienia sygnału o częstotliwości 2,4 GHz w pomieszczeniach:

$$L_i[\text{dB}] = L(1) + 10 \log[D^n] = L(1) + 10 n \log(D) \text{ gdzie:}$$

$L(1)$  – tłumienie w odległości 1 m od AP, wynoszące 41 dB,

$D$  – odległość [m],

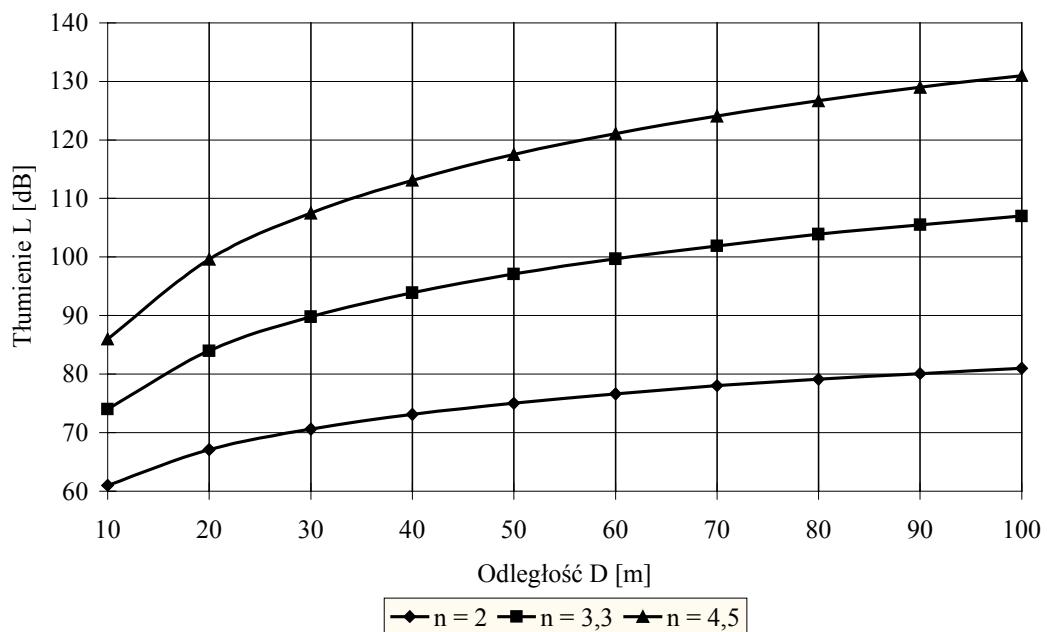
$n$  – wykładnik charakteryzujący tłumienie środowiska, równy:

- $n = 2$  dla otwartej przestrzeni,  
 $n = 3,3$  dla otwartej przestrzeni biurowej,  
 $n = 4,5$  dla domu.

Posługując się tą zależnością można wyznaczyć tłumienie trasy pomiędzy pierwszym punktem znajdującym się np. w odległości 10 m, a kolejnymi punktami odległymi od siebie np. o 10 m. Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 4 oraz w formie wykresów na rys. 28.

Tab. 4: Tłumienie trasy o długości do 100 m w różnych ośrodkach

D [m]		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
n	2	61,0	67,1	70,6	73,1	75,0	76,6	78,0	79,1	80,1	81,0
	3,3	74,0	84,0	89,8	93,9	97,1	99,7	101,9	103,9	105,5	107,0
	4,5	86,0	99,6	107,5	113,1	117,5	121,1	124,1	126,7	129,0	131,0



Rys. 28: Tłumienie fali 2,4 GHz na odcinku pomiędzy 10 m i 100 m od źródła

Wyniki zestawione w tablicy dowodzą, że im dalej od AP znajduje się terminal użytkownika, tym bardziej krytyczna dla uzyskiwania zasięgu większego o następne 10 m staje się obecność na drodze fali obiektu wprowadzającego dodatkowe tłumienie.

Należy przy tym pamiętać, że nawet w przypadku, gdy nadajnik i odbiornik są stacjonarne kanał radiowy w pomieszczeniu ma charakter dynamiczny, ze względu na to, że obiekty rozpraszające i odbijające fale mogą się przemieszczać.

Z tego względu odniesieniem do projektów propagacyjnych w pomieszczeniach stają się zwykle wstępne pomiary wykonywane w obiekcie z użyciem znanego nadajnika umieszczanego w projektowanej lokalizacji AP i przenośnej aparatury pomiarowej monitorującej poziom sygnału odbieranego i ewentualnie występowanie zakłóceń wspólnokanałowych.

#### 4.5. Stosowanie odbioru zbiorczego

Jedną z metod kompensacji zaników sygnału powodowanych propagacją wielodrogową fali między AP i urządzeniami przenośnymi lub noszonymi jest stosowanie odbioru zbiorczego.

W systemach antenowych RLAN stosuje się trzy sposoby realizacji odbioru zbiorczego:

- przestrzenny (*special diversity*),
- polaryzacyjny (*polarisation diversity*),
- kątowy, realizowany za pomocą kształtowania charakterystyki promieniowania anteny, (*pattern or angle diversity*).

Zastosowanie odbioru zbiorczego może zwiększyć dynamiczną czułość odbiornika (tj. czułość definiowaną w warunkach zaników sygnału) o kilka dB. W obliczeniach dotyczących bilansu energetycznego łącza, por. punkt 3.2, efekt odbioru zbiorczego można uwzględnić jako zmniejszenie marginesu poziomu sygnału, wymaganego ze względu na zaniki sygnału, względem wartości progowej.

Odbiór przestrzenny polega na zastosowaniu co najmniej dwóch anten tego samego typu umieszczonych od siebie w odległości kilku długości fali, takiej by prawdopodobieństwo

korelacji zaników w obu punktach odbioru było jak najmniejsze. W najprostszym przypadku urządzenie odbiorcze przełącza się na tę antenę, która w danym momencie wytwarza sygnał o wyższym poziomie. W systemach bardziej złożonych stosuje się sposoby wyboru toru odbiorczego (anten) polegające na pomiarze stosunku sygnału do szumu i wyborze toru zapewniającego jego większą wartość.

Dwie anteny i dwa tory przestrzennego odbioru zbiorczego spotyka się często zarówno w fabrycznym wyposażeniu stacjonarnych punktów dostępu, jak i wewnątrz przenośnych komputerów.

Odbiór polaryzacyjny polega na stosowaniu dwóch anten odbiorczych, które mają zarówno polaryzację pionową i poziomą. Ze względu na to, że na skutek wielokrotnych odbić może następować również zmiana polaryzacji fali, stosowanie anten, które mają zarówno polaryzację pionową i poziomą może dać do 3 dB zysku w porównaniu z systemem, w którym są stosowane anteny spolaryzowane liniowo tylko w jednym kierunku.

Odbiór kątowy dotyczy przenośnych terminali stosowanych w sieciach RLAN instalowanych w pomieszczeniach. Wskutek przenoszenia z miejsca na miejsce w czasie komunikacji z AP urządzenie użytkownika może znajdować się pod dowolnym kątem względem anteny AP, nawet bezpośrednio pod nią. Z tego względu optymalna charakterystyka anteny urządzenia przenośnego powinna mieć kształt półkuli, pozwalający na odbiór sygnału z dowolnego punktu powyżej płaszczyzny ziemi.

Problem ten jest rozwiązywany różnymi sposobami, np. przez zastosowanie dwóch anten, z których jedna ma charakterystykę dookólną z maksimum zysku leżącym w płaszczyźnie poziomej (w płaszczyźnie urządzenia), a druga charakterystykę kierunkową o kształcie stożka z maksimum zysku w kierunku prostopadłym do kierunku urządzenia. Odbiornik może przełączyć się na tą antenę, która w danym momencie wytwarza sygnał o większym poziomie.

#### **4.6. Zakłócenia wspólnokanałowe**

Jeżeli zachodzi potrzeba pokrycia obszaru, gdzie ze względu na jego rozmiar, przeszkody propagacyjne lub wymaganą pojemność sieci nie wystarcza jeden AP, należy zastosować większą liczbę AP wykorzystując zasady planowania częstotliwości znane z teorii radiowych sieci komórkowych. W przypadku pasma 2,4 GHz istotnym ograniczeniem jest liczba dostępnych kanałów, jak podano w punkcie 2.6.2.

Jeżeli wymagana liczba AP jest większa niż liczba dostępnych kanałów i zachodzi potrzeba ponownego wykorzystywania tych samych częstotliwości, to transmisje w innych komórkach wykorzystujących te same częstotliwości spowodują wzrost poziomu zakłóceń w kanałach radiowych używanych wielokrotnie w bliskich lokalizacjach. Przyrost poziomu zakłóceń zależy od obciążenia ruchem w komórkach zakłócających i planu wykorzystania częstotliwości.

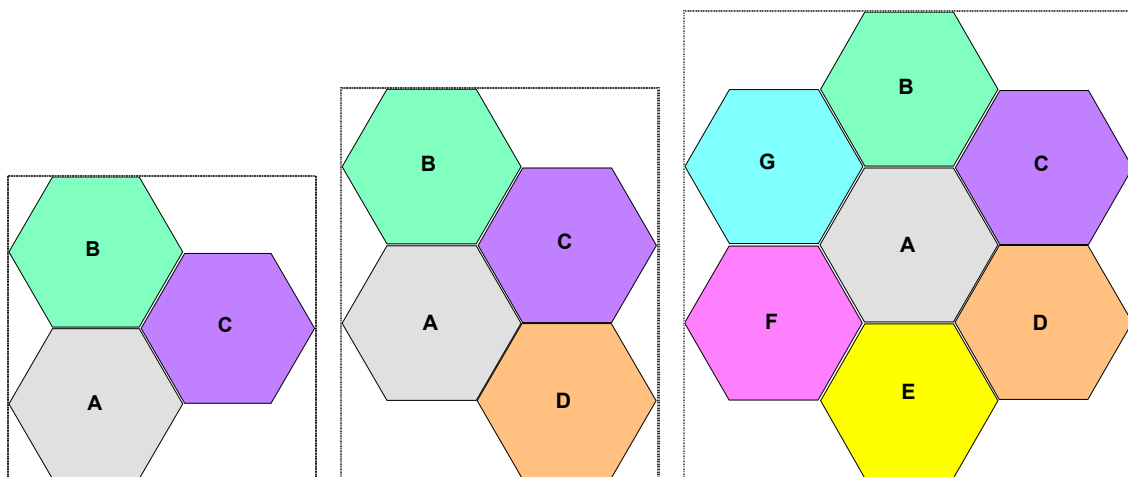
Dla uzyskania wymaganej jakości transmisji radiowej stosunek  $C/I$  sygnału użytecznego  $C$  do poziomu zakłóceń  $I$  na wejściu odbiornika powinien być większy niż wartość progowa, wymagana dla stosowanych szybkości transmisji i rodzaju modulacji, punkt 3.5.

W idealizowanym modelu dwuwymiarowej sieci radiowej, w której komórki radiowych punktów dostępu (AP) tworzą regularną siatkę sześciokątną lub czworokątną, w której  $M$  sąsiadujących komórek, tworzących tzw. klastery, wykorzystuje różne częstotliwości fal nośnych (kanały radiowe), poziom zakłóceń wspólnokanałowych jest funkcją stosunku  $D/R$ , gdzie:

- $D$  jest minimalną odległością pomiędzy środkami komórek używających tej samej częstotliwości (zakłócanym AP i zakłócającym AP znajdującym się w najbliższej komórce wykorzystującej ten sam kanał radiowy);
- $R$  oznacza promień (zasięg) komórki.

Można wykazać, że dla komórek o kształcie sześciokąta  $D/R = \sqrt{3M}$ , dla każdej dopuszczalnej wartości  $M$ , która wynika z formuły:  $M = i^2 + ij + j^2$ , gdzie:  $i, j = 0, 1, 2, 3 \dots$ , a stąd  $M = \{1, 3, 4, 7, 9, 12 \dots\}$ .

Jak powiedziano w punkcie 2.6.2. w sąsiadujących komórkach RLAN standardów 802.11 należy stosować różne częstotliwości, stąd praktycznie dla potrzeb planowania siatki częstotliwości RLAN można brać pod uwagę:  $M = \{3, 4 \text{ i } 7\}$ , rys. 29.



Rys. 29: Użycie częstotliwości w komórkach sąsiednich  $M = \{3, 4 \text{ i } 7\}$

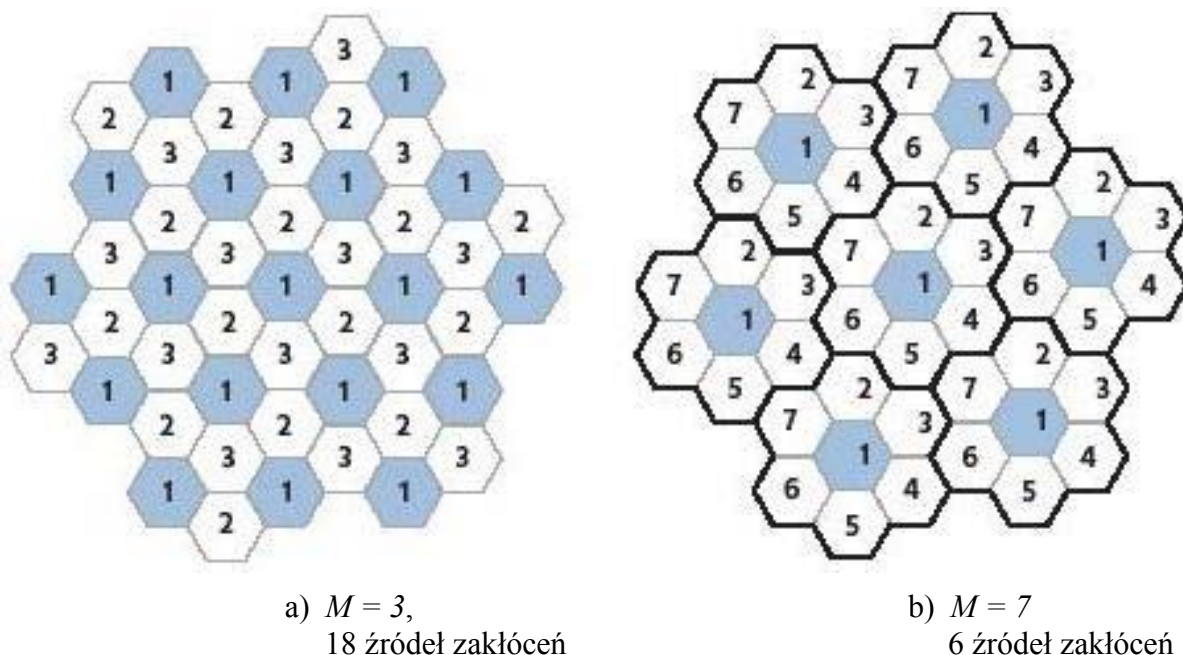
Większa liczba dostępnych częstotliwości pozwala na planowanie większych odległości między AP wykorzystującymi te same kanały radiowe. Na rys. 30 pokazano dwa sposoby pokrycia tego samego obszaru za pomocą tej samej liczby idealizowanych sześciokątnych komórek. W przypadku sieci tworzonej w trzech kanałach, pokazanej po lewej stronie tego rysunku, AP po środku sieci otaczają dwa pierścienie komórek z AP pracującymi w tym samym kanale, liczące razem  $6 + 12 = 18$  źródeł zakłóceń wspólnokanałowych.

W przypadku sieci z użyciem siedmiu częstotliwości, pokazanej po prawej stronie rysunku, na tym samym obszarze będzie tylko 6 źródeł zakłóceń wspólnokanałowych, leżących dalej od zakłócanego AP niż 6 źródeł zakłóceń pierwszego pierścienia występujących w sieci z trzema częstotliwościami.

Jak widać wykorzystanie do planowania sieci siedmiu kanałów zmniejsza poziom zakłóceń wspólnokanałowych w porównaniu do sieci, w której zastosowano trzy kanały. Daje to możliwość korzystania z większych przepływności kanału radiowego i w efekcie zwiększa pojemność sieci.<sup>77</sup>

Zwiększenie  $D/R$ , czyli przestrzennej separacji między komórkami względem zasięgu komórki, przy danym  $M$  powoduje zmniejszenie poziomu zakłóceń wspólnokanałowych, ale także zmniejszenie przepływności i w efekcie zmniejszenie pojemności sieci.

<sup>77</sup> Tego rodzaju optymalizację można przeprowadzić w paśmie 5 GHz, gdyż w paśmie 2,4 GHz dostępne są tylko trzy niezachodząca na siebie kanały radiowe.



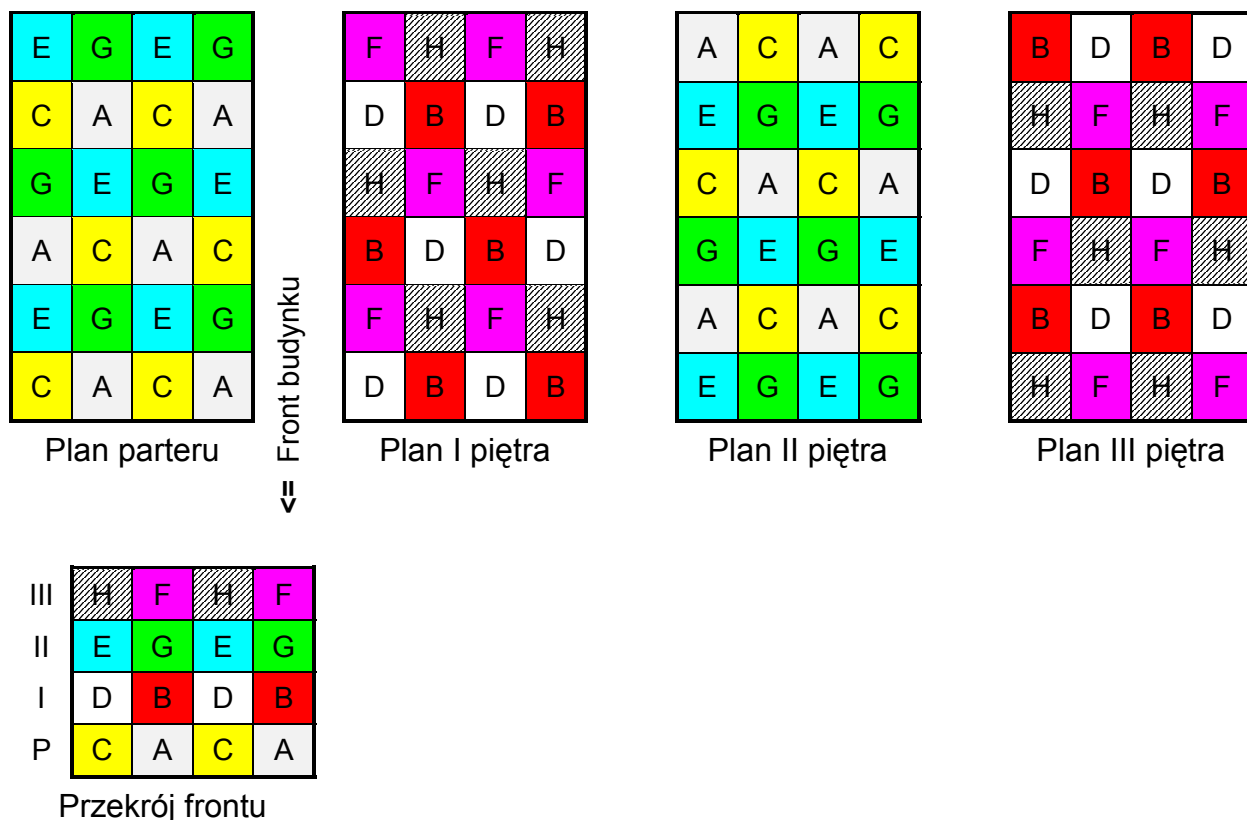
Rys. 30: Wpływ  $M$  na liczbę źródeł zakłóceń wspólnokanałowych na danym obszarze

Zakłócenia wspólnokanałowe mogą także pochodzić od nadajników innych systemów radiowych wykorzystujących to samo pasmo częstotliwości. Zwłaszcza w paśmie 2,4 GHz prawdopodobieństwo tego rodzaju zakłóceń jest duże, gdyż oprócz urządzeń standardów 802.11b/g w paśmie tym mogą pracować także inne radiowe urządzenia bliskiego zasięgu [11 ÷ 15, 17, 22] np. systemu Bluetooth, por. punkt 6.1.3, domowe łącza wideo, a w Polsce w niektórych regionach także stacjonarne radiowe systemy dostępne eksploatowane przez operatorów publicznych sieci telefonicznych, pracujące z FHSS. Nie należy również zapominać, że pasmo 2,4 GHz jest pasmem ISM wykorzystywanym także do celów niezwiązanych z telekomunikacją, w radiowych systemach identyfikacji, automatycznym sterowaniu procesami przemysłowymi i w kuchenkach mikrofalowych.

W przypadku sieci RLAN instalowanych w budynkach piętrowych należy się liczyć również z zakłóceniami powstającymi na kondygnacjach poniżej i powyżej.

W takich instalacjach można przyjąć zasadę polegającą na utworzeniu dwóch różnych podzbiorów kanałów radiowych: jeden jest stosowany na piętrach o numerach nieparzystych, a drugi na piętrach o numerach parzystych. Należy przygotować plany częstotliwości dla każdego piętra, skoordynowane z planami dla przekrojów pionowych. Schemat takiego planu pokazano na rys.31. W modelu trójwymiarowym odległość między komórkami wykorzystującymi ten sam kanał jest proporcjonalna do pierwiastka trzeciego stopnia ze współczynnika ponownego wykorzystania częstotliwości  $M$  (podczas gdy w modelu dwuwymiarowym proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego). Innymi słowy jeżeli w dwóch wymiarach wystarczał współczynnik wykorzystania równy 4 (cztery częstotliwości), to w modelu trójwymiarowym dla zachowania tej samej odległości koordynacyjnych potrzeba ośmiu częstotliwości.

W wielopiętrowym budynku liczba komórek zakłócających wzrasta. O ile dla jednej kondygnacji, jak pokazano wcześniej na rys.30, w pierwszym pierścieniu wokół analizowanej stacji może się znajdować do sześciu źródeł zakłóceń wspólnokanałowych, to w modelu trójwymiarowym względnie blisko mogą znajdować się po trzy źródła na kondygnacjach  $\pm 1$  względem rozważanej, a więc razem 6 kolejnych. Zatem należy się liczyć ze wzrostem mocy zakłóceń wspólnokanałowych o co najmniej 3 dB.



gdzie: A, B, C, D, E, F, G, H oznacza osiem częstotliwości nienakładających się na siebie kanałów radiowych

Rys. 31: Przykład planowania częstotliwości w budynku wielopiętrowym

W praktyce bardziej odległe komórki nie mają wpływu, gdyż betonowe stropy oddzielające piętra tłumią sygnał o kilka dB. Istotne jest również takie dobranie charakterystyk promieniowania anten AP by promieniowały falę z pochyleniem w kierunku podłogi piętra na którym są instalowane. Nie zmienia to faktu, że charakterystyki promieniowania anten terminali, zwłaszcza użytkowników nomadycznych, mogą być zasadniczo różne od zakładanych i w konsekwencji sporadycznie w sieci będą pojawiać się zakłócenia.

#### 4.7. Zakłócenia w sieci kratowej

Analizę sieci kratowej można przeprowadzić posługując się modelem z rys. 32 przedstawiającym regularną siatkę sześciokątną. W każdym wierzchołku każdego z sześciokątów znajduje się jeden węzeł sieci. Ustalając odległość pomiędzy sąsiednimi węzłami można analizować różne scenariusze budowy sieci. Jeżeli odległość pomiędzy sąsiednimi węzłami wynosi  $r$ , to względem każdego z węzłów znajdują się:

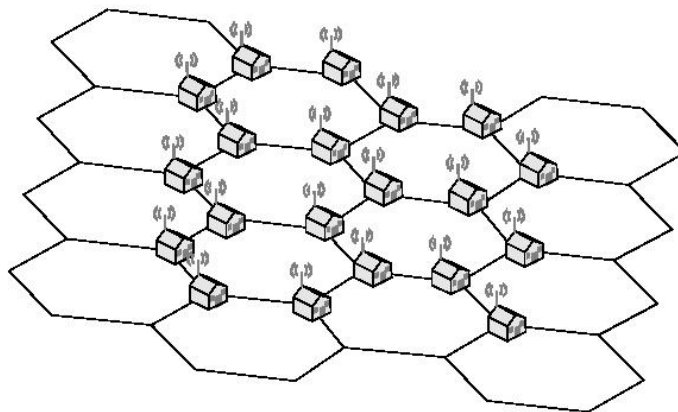
- 3 węzły w odległości  $r$ ,
- 6 węzłów w odległości  $r\sqrt{3}$ ,
- 3 węzły w odległości  $2r$ ,
- 6 węzłów w odległości  $\frac{3r\sqrt{3}}{2}$ ,
- 6 węzłów w odległości  $3r$ ,
- itd.

Urządzenia, które są blisko siebie nie mogą nadawać w tym samym czasie, w tym samym kanale. Można przyjąć, że zasada ta dotyczy wszystkich węzłów w odległości  $\leq 2r$ , z czego wynika, że gdy dany węzeł nadaje, to wszystkie węzły leżące w wierzchołkach trzech sześciokątów stykających się z danym węzłem nie mogą nadawać, a więc dotyczy to 12 węzłów.

Aktywność nadajnika w węźle w znacznym stopniu będzie zależeć od jego miejsca w sieci, tj. od ilości ruchu, który będzie kierowany za jego pośrednictwem z innych / do innych węzłów.

Dla uproszczenia analizy można przyjąć średnią aktywność węzła oraz średnią liczbę etapów (skoków) dla pakietu. Np. 3 skoki angażują nadajnik źródła danych i dwa pośredniczące. Jeżeli średnia aktywność jednego węzła wynosi 5%, to średnie obciążenie sieci będzie wynosić 15%.

Anteny powinny zapewniać łączność z właściwymi węzłami. Stosowanie anten kierunkowych (sektorowych) umożliwi unikanie zakłóceń na skutek promieniowania energii w kierunkach innych niż pożądany.



Rys. 32 Model sieci kratowej do obliczeń zakłóceń wspólnokanałowych

## 5. Obsługa ruchu w radiowej sieci lokalnej

Są dwie podstawowe, współzależne miary charakteryzujące każdą radiową sieć dostępową, a więc i RLAN: pojemność sieci i pokrycie sieci. Obie są ściśle związane z odległościami pomiędzy AP (gęstością AP na danym obszarze). Jeżeli założyć, że parametry urządzeń, takie jak moc nadawana / promieniowana, czułość odbiornika i inne są stałe, to liczba dostępnych kanałów radiowych i trzy wymienione parametry określają możliwości zaprojektowania sieci.

Pojemność jest sumą przepływności, które radiowa sieć lokalna może zapewnić użytkownikom, z uwzględnieniem wszystkich zjawisk, które w rzeczywistości mogą oddziaływać na pojemność pojedynczego AP i wielu AP.

Pokrycie odnosi się do obszaru, na którym sygnał radiowy jest emitowany i jest definiowane jako prawdopodobieństwo, że użytkownik w danej lokalizacji będzie miał możliwość komunikowania się z AP. Pojemność i pokrycie są współzależne i związane z odległościami pomiędzy AP, które pośrednio są związane z wielkością obszaru, na którym sieć ma zapewniać połączenia.



## 5.1. Pojemność sieci RLAN

### 5.1.1. Uwarunkowania systemowe

Przystępując do analizy pojemności sieci i przepływności udostępnianej pojedynczemu terminalowi użytkownika należy zdawać sobie sprawę z ograniczeń związanych z mechanizmami transmisji zaprojektowanymi w normach serii 802.11. Z wielu względów, które wymieniono w tym punkcie, przepływności dostępne i osiągane przez użytkownika RLAN są mniejsze od maksymalnej szybkości transmisji radiowej wynikającej ze specyfikacji IEEE serii 802.11, por. punkty 2.6.2 i 2.6.3.

Systemy z serii 802.11 wykorzystują duplex w dziedzinie czasu, tzn. nadawanie i odbiór następują na przemian w tym samym paśmie częstotliwości, ale nie jednocześnie. Oznacza to, że przepływność kanału radiowego jest dzielona pomiędzy oba kierunki transmisji, czyli jest dzielona pomiędzy nadajnikiem punktu dostępu (*downlink*) a nadajnikami wszystkich aktywnych terminali (*uplink*). Im większa liczba aktywnych terminali, tym mniejsza średnia przepływność przypadająca na jeden terminal.

Ponadto, ze wzrostem liczby terminali jednocześnie aktywnych w sieci, rośnie prawdopodobieństwo kolizji w wyniku prób uzyskania dostępu do wspólnego kanału radiowego. Standardowy protokół CSMA/CA porządkuje zasady dostępu do medium, ale nie eliminuje wszystkich kolizji. Bo jeżeli z punktu lokalizacji terminala kanał wydaje się wolny, to rozpoczęcie nadawania może spowodować kolizję, gdyż terminale nie odbierają wszystkich sygnałów innych terminali klienckich (wszystkie terminale muszą być w zasięgu AP, ale nie muszą być w zasięgu wzajemnie). Jeżeli nastąpi kolizja powstaje dodatkowe opóźnienie w przesłaniu pakietu, wynikające z konieczności oczekiwania na ponowny dostęp do kanału, powtórzenia transmisji pakietu i odbiór potwierdzenia przesłania, obserwowane jako zmniejszenie przepływności, związane z czasem oczekiwania i powtarzaniem zakłóconych pakietów.

Dlatego prawdopodobieństwo kolizji powinno być małe, a to oznacza, że liczba terminali aktywnych w komórce obsługiwanej przez AP musi być ograniczona.

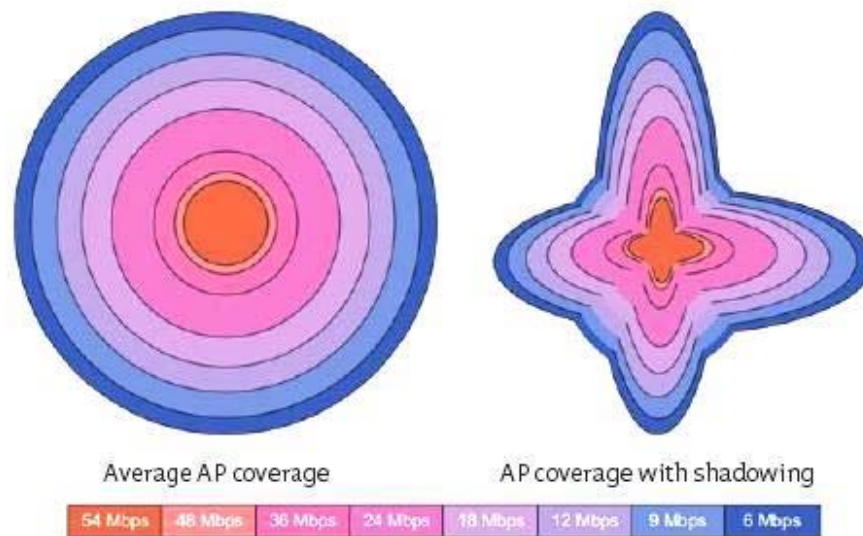
### 5.1.2. Przypadek pojedynczego punktu dostępu

Szybkość przesyłania danych w łączu radiowym ma związek z poziomem sygnału odbieranego, a ściślej ze stosunkiem poziomu sygnału użytecznego do poziomu zakłóceń na wejściu odbiornika (SNR). Jak pokazano w punkcie 3.5, w obrębie tego samego systemu 802.11a, 802.11b lub 802.11g wydajne metody modulacji wymagają znacznie większego poziomu sygnału użytecznego niż metody o mniejszej szybkości transmisji. Ponieważ zgodnie z zasadami omówionymi w punkcie 4, tłumienie trasy narasta proporcjonalnie  $n$ -tej potęgi odległości między komunikującymi się urządzeniami (gdzie  $n \geq 2$ ), więc im dalej od AP znajduje się terminal użytkownika, tym prawdopodobnie mniejsze natężenie pola sygnału radiowego, a skutkiem tego mniejsza osiągnięta przepływność łącza.

Ponieważ urządzenia zgodne z normami z serii 802.11 monitorują jakość sygnałów odbieranych od urządzeń, z którymi się komunikują, to gdy przechodzą w tryb nadawania, wykorzystują tę informację do wyboru szybkości transmisji, która zapewni największą przepustowość (tj. najkorzystniejszy kompromis pomiędzy szybkością i niezawodnością).

Ogólnie, szybkość transmisji danych maleje ze wzrostem odległości między komunikującymi się stacjami. W rzeczywistych warunkach pomieszczeń biurowych, ze ściankami działowymi i korytarzami powodującymi absorpcję energii RF i odbicia fal, uzyskiwana szybkość transmisji jest zmienna losowo, zależnie od rodzaju i liczby przeszkód pomiędzy AP i urządzeniem użytkownika. Wskutek tego jeden użytkownik znajdujący się w odległości

$\approx 10$  m od AP będzie mógł korzystać z transmisji 54 Mbit/s, a inny znajdujący się w tej samej odległości, z szybkością 36 Mbit/s lub jeszcze mniejszej.



Rys. 33: Ilustracja wpływu otoczenia na zasięgi transmisji w sieci RLAN

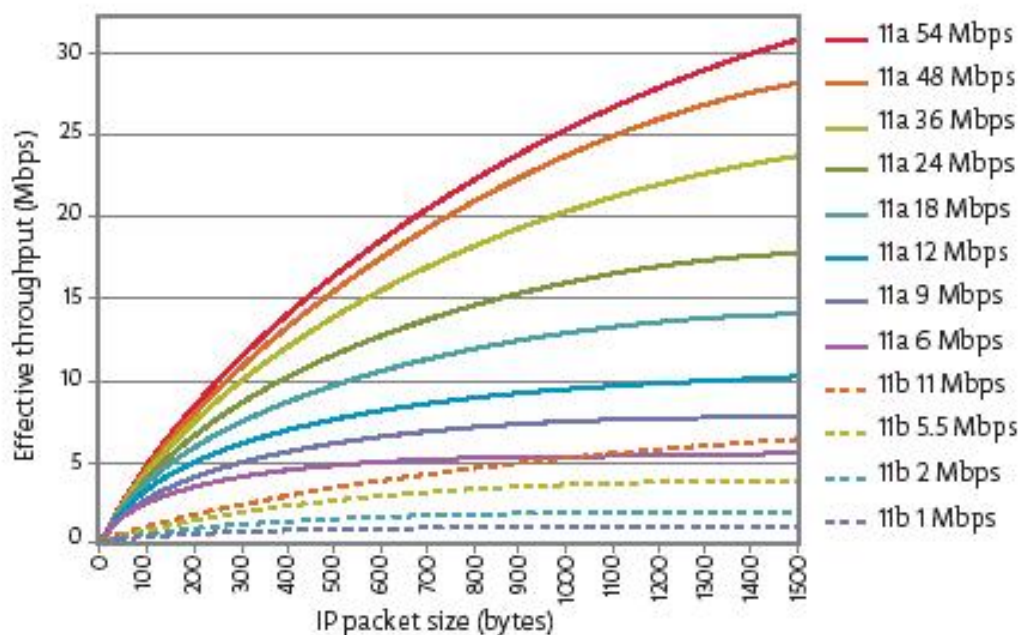
Na rys. 33 zilustrowano wpływ otoczenia na zasięgi transmisji w sieci RLAN systemu 802.11a. Figura po lewej stronie przedstawia idealny przypadek dookólnych charakterystyk pokrycia AP. Obszar najbliższy AP, na którym uzyskuje się szybkość maksymalną 54 Mbit/s zajmuje zaledwie kilka procent całkowitego obszaru pokrywanego przez AP.

Figura po stronie prawej przedstawia przykład charakterystyk pokrycia takiego samego AP umieszczonego na skrzyżowaniu dwóch korytarzy, zdeformowanych przez oddziaływania środowiska. Ściany korytarzy odbijające fale radiowe spowodowały efekt faliowodu, obserwowany jako zwiększenie zasięgu w jednym z kierunków. W praktyce, aby zapewnić każdemu użytkownikowi w dowolnej lokalizacji określoną szybkość transmisji ze zdefiniowanym prawdopodobieństwem, trzeba zakładać istnienie dodatkowego tłumienia i na ogół znaczne zmniejszenie zasięgu. Np. 95% prawdopodobieństwa, że wszyscy użytkownicy uzyskają co najmniej 36 Mbit/s, narzuca ograniczenie zasięgu i powoduje, że odległości pomiędzy poszczególnymi AP w sieci pokrywającej dany obszar muszą być mniejsze.

Należy pamiętać, że niektóre materiały stosowane w budownictwie mogą wykazywać różne właściwości pod względem absorpcji i odbijania fal o częstotliwościach w paśmie 2,4 GHz i 5 GHz. Jednakże w średnich warunkach biurowych przyjmuje się, że uzyskiwane zasięgi systemów 802.11a/b/g są praktycznie takie same. Jednakże 802.11b oferuje w tych samych warunkach mniejsze szybkości, z tego względu w paśmie 2,4 GHz należy preferować stosowanie 802.11g.

Rzeczywista przepustowość MAC i warstwy fizycznej jest zależna od długości pakietu i rodzaju transmisji.

Rys. 34 [39] przedstawia maksymalną przepustowość sieci w funkcji długości pakietu dla ośmiu szybkości transmisji wg 802.11a i czterech wg 802.11b, przy założeniu prostej wymiany dwóch wiadomości.



Rys. 34: Ilustracja związku pomiędzy przepustowością sieci a długością pakietu IP

Należy zauważyć, że aż do ok. 1000 bajtów najniższa nominalna szybkość systemu 802.11a (6 Mbit/s) jest efektywniejsza niż nominalnie wyższa szybkość systemu 802.11b (11 Mbit/s). Nawet dla pakietów o długości 1500 bajtów i w idealnych warunkach radiowych (bez konieczności retransmisji wskutek błędów lub kolizji) przepływność warstwy MAC jest znacząco mniejsza niż warstwy fizycznej, w której czas zajmują nadmiar kodowy transmisji radiowej, odstępy pomiędzy ramkami i potwierdzenia odbioru. Przy 54 Mbit/s w warstwie fizycznej maksymalna teoretyczna szybkość transmisji w systemie 802.11a jest rzędu 30 Mbit/s.

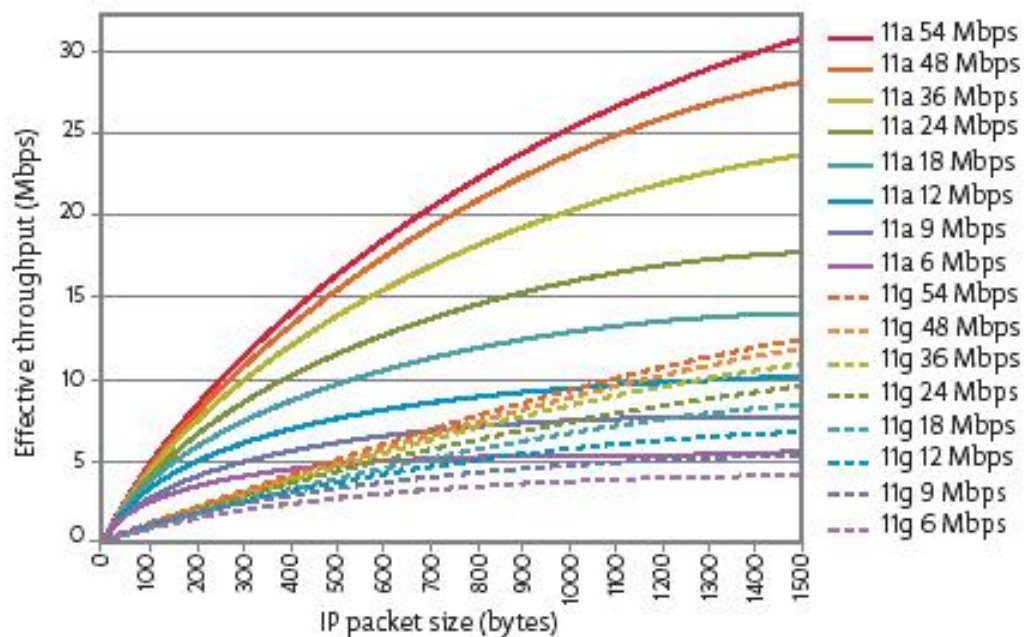
Średnia długość pakietu przesyłanego w sieci zależy od aplikacji (wymagań wyższych warstw sieci), ale ogólnie wynosi pomiędzy 400 a 500 bajtów. Jeżeli znaczącą częścią transmisji są pakiety VoIP, to średnia długość pakietu jest znacznie niższa (pakiety VoIP na ogół są krótsze niż 200 bajtów).

Średnia długość pakietu wpływa na przepływność osiąganą w sieci RLAN. Przy założeniu, że średnia długość pakietu ma 500 bajtów maksymalna teoretyczna przepustowość łącza RLAN wynosi ok. 16,3 Mbit/s dla 802.11a i 4,9 Mbit/s dla 802.11g w trybie kompatybilnym z 802.11b. Jak wspomniano wcześniej w trybie mieszanym 802.11b/g mogą być stosowane dwa sposoby ochrony:

- powodujący mniejsze obciążenie "wysyłanie CTS do samego siebie" (*CTS-to-Self*), w którym urządzenie nadaje komunikaty CTS adresowane do siebie (RTS jest pomijany), ale nie uzyskuje żadnej informacji, że wysłanie CTS odniosło skutek,
- bardziej odporny, polegający na wymianie sygnałów RTS/CTS.

Na rys. 35 [39] porównano przepływność uzyskiwaną w systemie 802.11a z uzyskiwaną w systemie 802.11g w trybie kompatybilnym z 802.11b. Charakterystyki te pokazują, w jak dużym stopniu nawet tylko transmisja CTS zmniejsza uzyskiwaną przepływność. Tak więc kompatybilność wstecz do 802.11b jest możliwa, ale za cenę pogodzenia się ze znacznie mniejszą przepustowością. W przypadku krótkich ramek często okazuje się, że przy

stosowaniu tylko 802.11b transmisja jest bardziej efektywna niż przy zastosowaniu CTS-to-Self z modulacją DSSS i przesłaniu ramek z danymi z użyciem modulacji OFDM.



Rys. 35: Porównanie przepustowości systemu 802.11g w trybie kompatybilnym z 802.11b z przepustowością systemu 802.11a

Poza wspomnianym przypadkiem mechanizmów ochrony transmisji 802.11g powyższe rozważania dotyczyły wyizolowanego AP komunikującego się z jednym klienckim urządzeniem radiowym. Jeżeli w zasięgu AP znajduje się więcej tego rodzaju aktywnych urządzeń klienckich, to natłok (*contention*), kolizje i inne rodzaje zakłóceń dodatkowo redukują średnią pojemność.

Całkowita redukcja pojemności medium spowodowana oddziaływaniem na pojedynczy AP może wynosić od 60 do 70% w porównaniu z idealnym przypadkiem, gdy wszyscy użytkownicy otrzymują maksymalną szybkość przesyłania danych i nie występują kolizje lub rywalizacja o dostęp (natłok w sieci).

Np. pojemność pojedynczego AP systemu 802.11a w idealnym przypadku, z pakietami o długości 1500 bajtów, wynosi 30 Mbit/s. Jednakże w sytuacji różnej od idealnej, gdy urządzenia 802.11a wykorzystują także wszystkie niższe szybkości transmisji, występuje rywalizacja dostępu i kolizje, pojemność może spaść o więcej niż 60%. W przypadku systemu 802.11b obsługującego ruch VoIP (pakiety po 200 bajtów), jeżeli telefony RLAN są w dużej odległości od AP, pojemność może spaść więcej niż o 70%.

W systemach 802.11x zastosowano środki, których celem jest stworzenie dla wszystkich urządzeń tych samych szans dostępu do medium, co nie zapewnia ani optymalizacji pod względem liczby przesyłanych bajtów, ani pod względem czasu przeznaczanego na wykorzystanie medium.

Najgorszy przypadek występuje, gdy terminal na odległym krańcu komórki nadaje lub odbiera długie ramki z najniższą możliwą szybkością i stwierdza dużą stopę błędów.

W sytuacji kombinacji skutków złej jakości sygnału i stosowania pakietów dużych rozmiarów mechanizm dostępu w 802.11 powoduje nieoczekiwane efekty. Jeżeli dwa terminale radiowe przesyłają pakiety o tych samych rozmiarach, przy czym jeden korzysta z połączenia o dużej

szybkości, a drugi o małej szybkości, to średnia pojemność MAC będzie bliższa niższej z dwóch szybkości, a nie wyższej. Np. jeżeli jeden użytkownik korzysta z 54 Mbit/s, a drugi z 6 Mbit/s, to średnia przepustowość będzie wynosić ~10,8 Mbit/s. Istnienie tego efektu nazywanego czasem "efektem użytkownika na obrzeżu" (*edge user effect*) [39] wyjaśnia, dlaczego zwiększenie zasięgu komórki może powodować zmniejszenie przepływności także dla urządzeń znajdujących się blisko punktu dostępu.

### 5.1.3. Sieć z wieloma punktami dostępu

W przypadku instalacji RLAN wymagającej mniejszej liczby kanałów radiowych niż liczba kanałów dostępnych (przy założeniu, że na tym samym obszarze lub w jego najbliższym otoczeniu nie ma urządzeń radiowych wykorzystujących to samo pasmo), zakłócenia wspólnokanałowe nie występują, a całkowita pojemność sieci rośnie liniowo z liczbą komórek (liczbą AP).

Jeżeli w sieci zachodzi potrzeba zastosowania więcej niż trzech AP, to w systemach pracujących w paśmie 2,4 GHz konieczne staje się powtórne wykorzystywanie tych samych częstotliwości. W paśmie 5 GHz jest więcej kanałów (8 dla instalacji wewnątrz budynków i 11 dla instalacji na zewnątrz), więc projektant ma więcej swobody, ale i w tym przypadku wielokrotne wykorzystanie częstotliwości może okazać się konieczne np. w wielopiętrowym budynku biurowym lub ze względu na bliskie sąsiedztwo innej instalacji RLAN. Skutkuje to koniecznością uwzględnienia w bilansie łączy dodatkowego marginesu na zakłócenia wspólnokanałowe.

Każde źródło emisji radiowej znajdujące się w pobliżu odbiornika RLAN może zakłócić lub zupełnie zablokować jego pracę. Oczywiście największą podatność na zakłócenia obserwuje się, gdy zakłócenie występuje w obrębie pasma kanału używanego przez rozpatrywany odbiornik. Systemy OFDM wykazują także bardzo małą selektywność dla zakłóceń w kanałach sąsiednich (kanale następnym poniżej i następnym powyżej używanego), z czego wynika, że takie częstotliwości nie powinny być wykorzystywane przez sąsiadujące ze sobą AP). Kolejnym zjawiskiem jest blokowanie odbiornika, które występuje, gdy na jego wejściu pojawia się sygnał radiowy poza pasmem, ale o bardzo wysokim poziomie. Analizując podatność na różnego rodzaju zakłócenia występujące w paśmie odbiornika należy pamiętać, że wpływ tego rodzaju zakłóceń w zasadzie ocenia się w mierze względnej, jako stosunek poziomu sygnału użytecznego do poziomu sygnału zakłócającego. Innymi słowy sygnał zakłócający odbiornik AP można pominąć, jeżeli odbierany sygnał użyteczny ma odpowiednio wysoki poziom (np. pochodzi od terminala znajdującego się blisko AP), ale ten sam sygnał zakłócający może uniemożliwić komunikację, jeżeli odbierany sygnał użyteczny nie ma odpowiednio wysokiego poziomu (np. pochodzi od terminala znajdującego się na granicy zasięgu AP). Jest to efekt tzw. bliskiego / dalekiego węzła (*near / far effect*).

Zmniejszenie odległości pomiędzy AP powoduje zmniejszenie obszaru obsługiwanego przez pojedynczy AP oraz zmniejszenie średniej odległości pomiędzy terminalem użytkownika i najbliższym AP. Jeżeli przyjąć, że wszystkie inne parametry RLAN są stałe, to zagęszczenie AP:

- po pierwsze umożliwia większej liczbie użytkowników dostęp do większych szybkości przesyłania danych, bo maleje średnia odległość między AP a użytkownikiem, a więc średnia pojemność każdego punktu dostępu wzrasta;
- po drugie zwiększa się prawdopodobieństwo pokrycia, bo powiększa się margines pomiędzy poziomem rzeczywistym, a wartością progową sygnału wymaganą dla uzyskania wymaganej szybkości transmisji, a ponadto w wielu lokalizacjach dostępne są

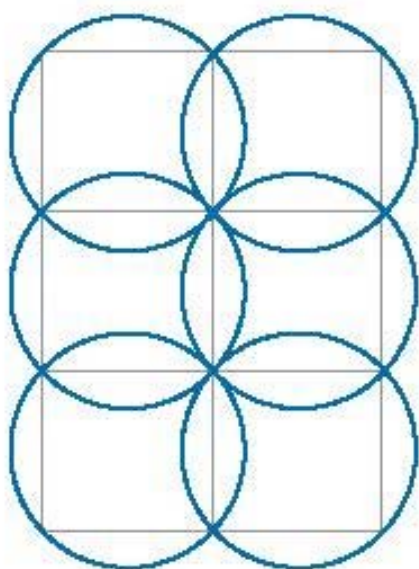


sygnały różnych AP z różnych kierunków, co zwiększa prawdopodobieństwo utworzenia łącza radiowego na trasie pozbawionej przeszkód.

Rys. 36 figura a) przedstawia przykład sieci, w której na danym obszarze rozmieszczono sześć komórek (punktów dostępu). Jeżeli założyć, że rozmiar komórki pozwala na uzyskanie średniej przepływności 12 Mbit/s, to całkowita pojemność sieci wynosi  $6 \times 12 = 72$  Mbit/s. Jeżeli liczba AP na tym samym obszarze zostanie podwojona, rys. 36 figura b), a użytkownicy będą mogli korzystać średnio z większej szybkości np. 24 Mbit/s, to całkowita pojemność sieci będzie wynosić:  $12 \times 24$  Mbit/s = 288 Mbit/s.

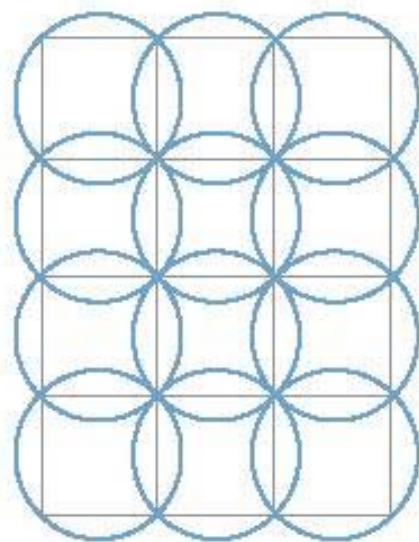
Przykład ten wskazuje, że dwukrotne zwiększenie gęstości AP na danym obszarze może dać więcej niż dwukrotne, w przykładzie czterokrotne, zwiększenie pojemności sieci (pod warunkiem, że każdy z AP wykorzystuje inną częstotliwość).

Ten wzrost pojemności jest zapewniony tylko wtedy, gdy dostępna jest dostatecznie duża liczba nie zachodzących na siebie kanałów radiowych. Jeżeli konieczne jest wielokrotne wykorzystanie tych samych częstotliwości, to występowanie zakłóceń wspólnokanałowych spowoduje znaczącą redukcję pojemności aż do sytuacji, w której zmniejszenie obszarów AP nie przyniesie żadnej korzyści.



6 komórek średnio po 12 Mbit/s.  
Całkowita pojemność = 72 Mbit/s.

a)



12 komórek średnio po 24 Mbit/s.  
Całkowita pojemność = 288 Mbit/s.

b)

Rys. 36: Ilustracja związku pomiędzy liczbą punktów dostępu (osobnych komórek radiowych) a pojemnością sieci [39]

Uwaga. Okręgi na rysunkach określają odpowiednie granice obszarów obsługi 9 Mbit/s i 18 Mbit/s, a w obu przypadkach zasięgi sieci są znacznie większe.

W przypadku 802.11b i 802.11g, gdzie są dostępne tylko trzy nie zachodzące na siebie kanały, jest to zjawisko istotnie ograniczające możliwość budowy dużych sieci.

Terminale użytkowników też mają wpływ na pojemność sieci. Terminal powinien łączyć się z AP, który gwarantuje mu najwyższą jakość transmisji. W przeciwnym razie terminal przeniesiony w inne miejsce, który utrzymuje komunikację z odległym AP stwarza efekt użytkownika na obrzeżu ("edge user").

Jeżeli częstotliwości kanałów nie są wielokrotnie wykorzystywane, to pojemność sieci z wieloma AP jest w zasadzie sumą pojemności poszczególnych AP. Jeżeli zachodzi potrzeba ponownego użycia tej samej częstotliwości należy zastosować środki minimalizujące skutki zakłóceń wspólnokanałowych.

Spadek pojemności na skutek zakłóceń wspólnokanałowych [39] może sięgać 85% dla planu z czterema częstotliwościami, 75% dla planu z siedmioma częstotliwościami. W systemie 802.11b, z trzema kanałami obsługującymi ruch głosowy (VoIP), spadek pojemności powodowany zakłóceniami wspólnokanałowymi może sięgać 80%.

W sieci o małym obciążeniu z dostatecznie dużym współczynnikiem wykorzystania częstotliwości  $M$  wzrost szumu z powodu zakłóceń wspólnokanałowych jest pomijalny, a zasięg i pojemność są w zasadzie takie same jak dla instalacji z pojedynczym AP.

W sieci z dużym obciążeniem zakłócenia z sąsiednich komórek wykorzystujących tę samą częstotliwość wzrastają do poziomu, przy którym zmniejszenie stosunku sygnału do szumu  $C/I$  na wejściu odbiornika powoduje zmniejszenie pojemności i zasięgu komórki. Jeżeli nie zaplanowano nakładania się obszarów sąsiadujących komórek, to redukcja zasięgu na skutek zakłóceń wspólnokanałowych może powodować luki pokrycia.

Inaczej mówiąc dla danego rozplanowania komórek wzrost szumu spowodowany zakłóceniami wspólnokanałowymi jest w zasadzie niezależny od mocy nadawanej i rozmiaru komórki. Głównymi parametrami wpływającymi na poziom zakłóceń są współczynnik ponownego wykorzystania częstotliwości  $M$ , obciążenie ruchowe sieci i warunki propagacji sygnałów radiowych w rzeczywistym środowisku.

## **5.2. Wymagania dotyczące obsługi ruchu**

Ruch generowany przez aplikację danych ma na ogół charakter nierównomierny, po krótkich okresach dużej aktywności następują dłuższe przerwy. Średnio aplikacje te generują niewielki ruch.

Np. w środowisku biurowym, dla uzyskania zadowalającej jakości przeglądania Web, ogólna liczba użytkowników jednego AP systemu 802.11b nie powinna przekraczać 30 przy założeniu, że większość będzie korzystać z szybkości 11 Mbit/s, a reszta z 5,5 Mbit/s.

Liczba użytkowników danych, których można obsługiwać za pomocą AP systemu 802.11a jest trzy do czterech razy większa przy założeniu, że znajdują się dostatecznie blisko, aby wykorzystać połączenie o szybkości 24 Mbit/s lub wyższej.

W sieci, gdzie komunikacja głosowa i danych występują jednocześnie, aby zagwarantować wystarczającą wydajność sieci liczba aktywnych użytkowników powinna być mniejsza. Obciążenie generowane w sieci przez połączenie VoIP jest zależne od trzech czynników:

- odstępów między pakietami (*packetization interval*), który określa liczbę pakietów generowanych w czasie sekundy;
- uaktywnienia funkcji detekcji głosu (*voice activity detection*);
- typu zastosowanego kodeka.

Ze względu na to, że liczba pakietów głosu jest odwrotnie proporcjonalna do odstępu między pakietami, pojawia się tendencja do stosowania długich odstępów. Jednakże odstęp między pakietami wpływa na opóźnienie transmisji i nie może być zbyt duży. Aby uzyskać nieco lepszą przepływność netto (nadmiar spowodowany protokołem 802.11) w sieciach RLAN standardu 802.11 często dopuszcza się 30 ms odstęp między pakietami, w odróżnieniu od 20 ms używanego normalnie w sieciach kablowych.

Obciążenie sieci spowodowane VoIP może być mniejsze, jeżeli w systemie jest stosowany mechanizm detekcji aktywności głosu. Pomijając okresy cisy można zredukować liczbę przesyłanych pakietów nawet o 40% zachowując zadowalającą jakość głosu.

Kodek VoIP ma wpływ na wielkość pakietów, ale praktycznie mały wpływ na obciążenie RLAN.

Należy pamiętać, że większość AP ma wbudowaną funkcję automatycznego wyboru szybkości transmisji w zależności od jakości łącza. Zaprogramowanie odpowiednich minimalnych wartości dopuszczalnych szybkości transmisji pozwala na racjonalne zaplanowanie sieci z wieloma AP. Np. ustalenie, że minimalną szybkością w sieci 802.11b jest 5,5 Mbit/s oznacza, że jeżeli jakość sygnału jest mniejsza niż wymagana dla tej szybkości, sieć będzie wymuszać przeniesienie użytkownika do innego AP. Jeżeli zaprogramowaną wartością minimalną będzie 1 Mbit/s, to użytkownik wymagający takiej szybkości spowolni całą sieć, gdyż w czasie długiej sesji komunikacji z tym użytkownikiem sieć będzie niedostępna dla innych użytkowników.

Projektując mniejsze komórki o większej przepływności uzyskuje się korzystniejszą ocenę jakości połączeń.

Liczba użytkowników i wykorzystywane aplikacje są podstawą do oszacowania wymaganej pojemności sieci. Projektant powinien obliczyć liczbę użytkowników na obszarze jednej komórki. W biurze, gdzie liczba użytkowników jest duża, aby uzyskać wyższe szybkości transmisji należy zastosować komórki o mniejszej powierzchni. Mniejszy zasięg umożliwia ponowne wykorzystanie tej samej częstotliwości bez obawy, że zasięgi stacji będą się wzajemnie nakładać.

Zasięg AP można zmniejszyć wykorzystując możliwość nastawy mocy nadajnika. W wielu AP funkcja ta jest dostępna dla instalatorów. Jednakże ręczne ustawianie (programowanie) każdego AP jest czynnością pracochłonną. W sieci z wieloma punktami dostępu pożądane jest uzyskanie tej funkcji za pośrednictwem sieciowego programu zarządzającego, pozwalającego na ustawienie indywidualne parametrów wszystkich AP zainstalowanych w sieci.

Określenie, ile pasma może potrzebować każdy z użytkowników ma zasadnicze znaczenie. Te dane pozwalają określić wymaganą liczbę AP potrzebną do zagwarantowania wymaganych warunków obsługi użytkowników w danym obiekcie.

Z doświadczeń firm wynikają następujące reguły szacowania aktywności użytkowników: w przypadku sieci 802.11g należy dopuszczać 2 Mbit/s dla ruchu w dół i 2 Mbit/s dla ruchu w górę (4 Mbit/s łącznie) na użytkownika, co sprawia, że w ocenie użytkownika łącze radiowe jest postrzegane podobnie do łącza w sieci kablowej LAN. W przypadku sieci 802.11b zasadą jest zakładanie po 500 kbit/s na użytkownika w obu kierunkach (1 Mbit/s łącznie), co sprawia że łącze radiowe jest postrzegane jako podobne do kablowego DSL.

Jeżeli znane są aplikacje wykorzystywane przez użytkowników to proponowane zapotrzebowanie można skorygować. Np. przeglądanie stron www i obsługa e-mail spowodują mniejszą aktywność radiową stacji użytkownika niż aplikacje interaktywne wymagające wielu sesji między klientem a serwerem.

Planując pokrycie można zróżnicować wymagania odnośnie pasma przypadającego na użytkownika lub określoną powierzchnię, np. mniej w działach zajmujących się obsługą biurową, więcej w sali konferencyjnej. Mając określone wymagania odnośnie obszaru oraz liczby i rodzaju klientów na tym obszarze, można oszacować minimalną przepływność interfejsu radiowego i wytypować standard (protokół 802.11x).



Znając wymagania odnośnie całkowitej szerokości pasma, należy założyć minimalną dopuszczalną szybkość transmisji radiowej, z którą system powinien pracować.

Uwaga. W tych obliczeniach należy przyjmować jak najwyższą szybkość, nie mniej niż 5,5 Mbit/s w przypadku 802.11b, nie mniej niż 36 Mbit/s w przypadku 802.11a.

Na podstawie tych danych można obliczyć wymaganą liczbę AP dla pokrycia obszaru stosując następujące formuły:

- zapotrzebowanie na pasmo ze strony  $N$  użytkowników wynosi:  $\sum_i^N B_i k_i$ , gdzie:

$B_i$  – szerokość pasma "i-tego" użytkownika,

$k_i$  – procent aktywności "i-tego" użytkownika.

Jeśli wymagania wszystkich użytkowników są identyczne, to zależność określająca zapotrzebowanie na pasmo ma postać:  $N B_i k_i$ .

- liczba punktów dostępu  $\frac{\sum_i^N B_i k_i}{m r} = \frac{N B_i k_i}{m r}$ , gdzie:

$m$  – efektywność wykorzystania pasma [%], z uwzględnieniem nadmiaru wynikającego z protokołów MAC i korekcji błędów,

$r$  – podstawa przepływności zakładana dla AP.

Przykład.

Zaprojektować sieć standardu 802.11b dla 50 użytkowników zakładając:

- przepływność po 500 kbit/s w obu kierunkach i aktywność użytkownika 20%;
- minimalna szybkość 11 Mbit/s i sprawność 50%;
- zapotrzebowanie:  $(2 \times 500) \times 50 \times 0,2 = 1000 \times 50 \times 0,2 = 10\,000 \Rightarrow 10\text{ Mbit/s}$ ;
- jeden AP:  $11\text{ Mbit/s} \times 0,5 = 5,5\text{ Mbit/s}$ .

$10/5,5 \approx 2$  po zaokrągleniu "w górę".

Wniosek. Dla potrzeb obsługi ruchu wystarczą dwa AP.

W następnym kroku należy sprawdzić, czy dwa AP zapewnią wymagany zasięg. Jeżeli obszar jest zbyt rozległy, to uzyskanie wymaganego pokrycia nie będzie możliwe przy stosowaniu tylko dwóch AP.

Do tego celu należy się posłużyć albo modelem (obliczenie bilansu łącza), albo wykonać testy zasięgów AP umieszczonych w proponowanych lokalizacjach.

Instalowany AP należy umieścić wysoko pod sufitem z co najmniej dwóch powodów:

- aby zapewnić jak najlepszą widoczność stanowisk klientów z lokalizacji AP,
- aby było to miejsce trudnodostępne dla ciekawskich.

O rozmieszczeniu AP [38] decyduje:

- generowany ruch (gęstość i aktywność użytkowników, wymagania odnośnie czasu transmisji),

albo

- wymagany zasięg.

W konsekwencji gęstego rozmieszczenia AP, dla uniknięcia zakłóceń wspólnokanałowych, może być konieczne ograniczenie mocy RF nadajnika (wybrany sprzęt musi mieć tę funkcję);

### 5.3. Ocena ze strony użytkowników

W wielu wczesnych projektach RLAN jako cel stawiano uzyskanie jak największego zasięgu (obszaru pokrywanego przez pojedynczy AP). Jednakże właściwie postawione zadanie powinno polegać na zaprojektowaniu sieci radiowej, która pokrywa zdefiniowany obszar z przepływnością i jakością (dostępność łącza) wymaganą przez użytkowników, oferując ponadto mobilność terminali. Zasięg jako jedyne kryterium rozmieszczenia AP ma sens tylko w przypadkach, gdy w sieci z definicji ma być niewielu użytkowników rozproszonych na dużym obszarze (np. hale hurtowni, w których pracuje kilku magazynierów).

Należy przyjąć, że użytkownicy biznesowi korzystając z RLAN oczekują szybkości transmisji takiej, do jakiej przyzwyczaili się korzystając z PC dołączonych do sieci kablowej, tj. dwukrotnych łączy 100 Mbit/s. W powszechnym odczuciu sieć radiowa ma "tylko" dodać mobilność do znanych funkcjonalności. Aplikacje, takie jak telefonia VoIP i wideo konferencje narzucają ostre wymagania dotyczące dopuszczalnego opóźnienia sygnału w sieci.

Subiektywna ocena jakości sieci ze strony użytkowników tzw. *Quality of experience* powstaje w wyniku obserwacji czasu jaki upływa pomiędzy wydaniem polecenia a momentem, gdy na ekranie PC pojawia się odpowiedź na to polecenie.

Różne aplikacje wymagają różnego czasu odpowiedzi. W przypadku aplikacji interaktywnych wymaga się czasu mniejszego niż 400 ms. W przypadku aplikacji wymagających przesyłania większych ilości danych (e-mail, przeglądarki Internetowe) użytkownicy są przyzwyczajeni do dłuższego oczekiwania (kilka sekund). Oceny użytkowników pogarszają się, gdy czas oczekiwania przedłuża się ponad 4 s.

Przesyłanie dużych ilości danych wymaga zatem szybkiego łącza radiowego o dobrej jakości, ponieważ najczęściej stosowany protokół danych TCP interpretuje utratę pakietu jako wskazówkę, że należy zmniejszyć szybkość przesyłania danych. Tym samym, gdy utrata pakietu następuje często, nawet jeżeli możliwa szybkość transmisji radiowej jest duża, TCP może ograniczyć szybkość transmisji. Aby jakość łącza była wystarczająca dla aplikacji bazujących na TCP zaleca się, aby współczynnik utraty pakietów był mniejszy niż 1%, a nawet 0,1%.

Opóźnienie jest krytycznym parametrem, jeśli sieć jest wykorzystywana do transmisji głosu. W jednym kierunku dopuszcza się opóźnienie maksimum 150 ms. Przy 300 ms większość użytkowników ocenia jakość łącza połączenia jako złą. W 150 ms muszą być zsumowane wszystkie opóźnienia urządzeń i sieci zaangażowanych w połączeniu głosowym, z tego względu dla RLAN pozostaje część nie większa niż ~50 ms. Przerwy związane np. z przenoszeniem połączenia do innego AP nie powinny być dłuższe niż 80 ms. Przerwy kilkusekundowe są postrzegane jako przerwanie połączenia.

W sieci obsługującej komunikację danych i głosową należy preferować priorytet dla głosu, jednak wymaga to opracowania aplikacji, które analizując QoS zapewnią taką funkcję.

## 6. Przygotowanie projektu radiowej sieci lokalnej

### 6.1. Wybór standardu RLAN

Przegląd standardów RLAN zamieszczony w punkcie 2 wskazuje, że aktualnie infrastrukturę sieci można wyposażyć w jedną z następujących kategorii punktów dostępu:

- a) zgodne tylko z normą 802.11b (pasmo RF 2,4 GHz, DSSS z szybkością do 11 Mbit/s, niewielka oferta urządzeń z opcją PBCC z szybkością transmisji do 22 Mbit/s);

- b) zgodne z normą 802.11g (pasmo RF 2,4 GHz, OFDM z szybkością do 54 Mbit/s, także kompatybilność wstecz z 802.11b, możliwa obsługa terminali 802.11b);
- c) zgodne z normami 802.11a/h (pasmo RF 5 GHz, OFDM z szybkością do 54 Mbit/s).

Oferowane terminale, wbudowane do PC lub stosowane jako moduły zewnętrzne reprezentują trzy wymienione wyżej kategorie lub ich kombinację zgodną z normami 802.11a/b/g.

Urządzenia 802.11b/g są bardziej rozpowszechnione, jednakże należy pamiętać, że:

- w paśmie 2,4 GHz są dostępne tylko trzy niezachodzące na siebie kanały radiowe, – w przypadku sieci o dużej pojemności może to być istotne utrudnienie zadania;
- jest to pasmo ISM intensywnie wykorzystywane również przez inne urządzenia radiowe (np. systemu Bluetooth), kuchnie mikrofalowe, co może skutkować wewnątrz pomieszczeń poziomem zakłóceń znacznie większym niż w przypadku pasma 5 GHz.

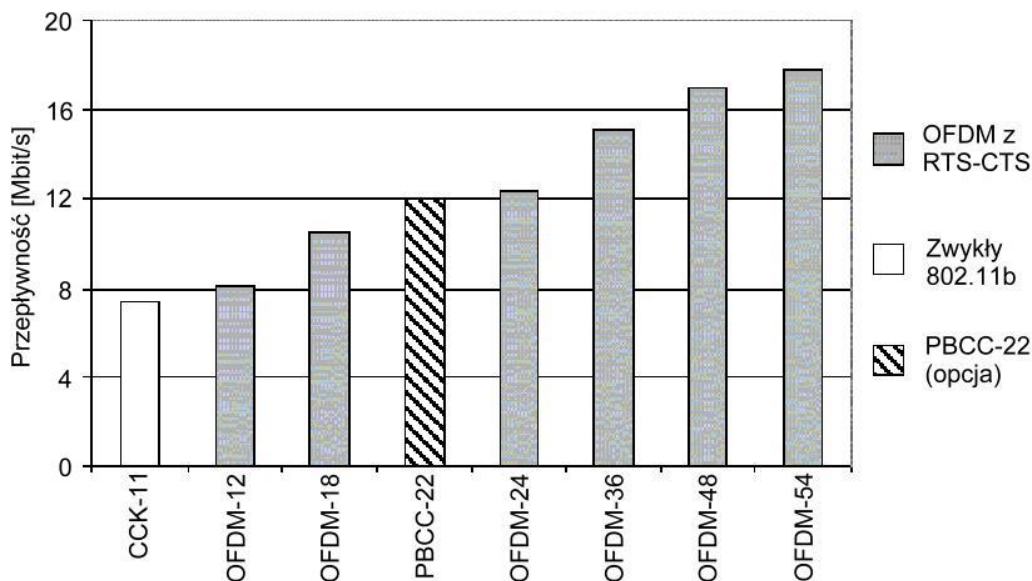
Pod tymi względami pasmo 5 GHz zapewnia korzystniejsze warunki.

W otwartej przestrzeni fale o częstotliwości 5 GHz są bardziej tłumione (różnica  $> 6$  dB), ale jednocześnie dopuszczalna moc promieniowana (30 dBm e.i.r.p.) w podzakresie od 5470 MHz do 5725 MHz jest o 10 dB większa niż w paśmie 2,4 GHz (20 dBm).

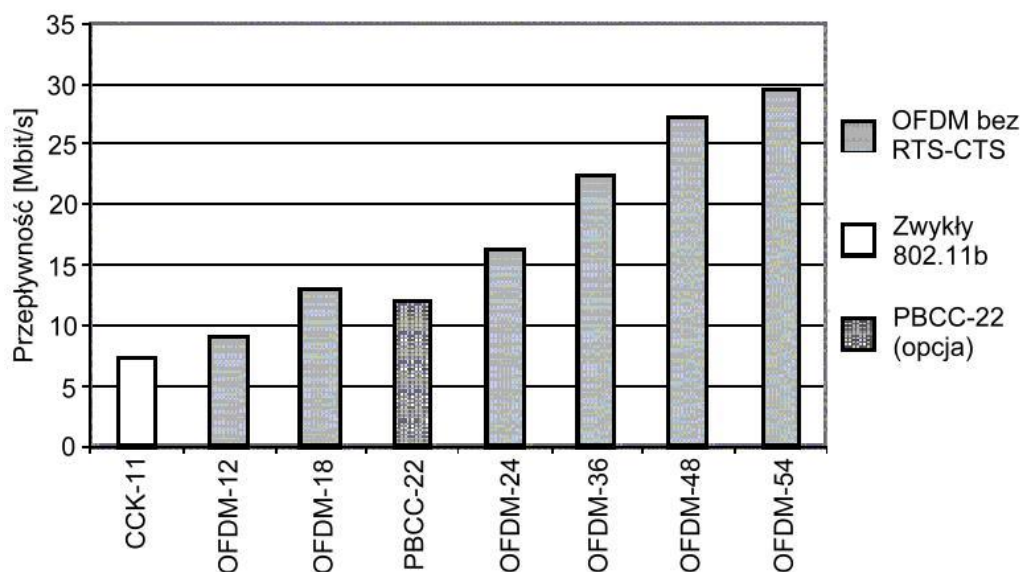
Co do zasięgów uzyskiwanych w pomieszczeniach zdania różnych autorów są podzielone. Teoretycznie w środowisku pozbawionym zakłóceń wspólnokanałowych system 802.11g (2,4 GHz & 20 dBm) powinien mieć nieznacznie większy zasięg niż system 802.11a (5,3 GHz & 23 dBm). Moc, którą faktycznie promieniują oferowane na rynku urządzenia 802.11a/b/g, przeznaczone do stosowania w pomieszczeniach, wyposażone w anteny zintegrowane, w każdym z pasm wynosi zwykle mniej niż 17 dBm. Przy tej samej mocy promieniowanej system 802.11g umożliwia uzyskanie większej przepływności niż 802.11b [39].

#### 6.1.1. Wydajność urządzeń 802.11g

Należy podkreślić, że wymuszanie w systemie 802.11g trybu zgodnego z 802.11b odbija się niekorzystnie na uzyskiwanej przepływności, por. rys. 34 i rys. 35 [wg 39] oraz rys. 37 i rys. 38 [wg 41].



Rys. 37: Oszacowanie przepływności systemu 802.11g: OFDM z aktywnym RTS-CTS, w porównaniu z trybem 802.11b i opcją PBCC-22 [41]



Rys. 38: Oszacowanie przepływności systemu 802.11g: OFDM bez RTS-CTS, w porównaniu z trybem 802.11b i opcją PBCC-22 [41]

Porównanie danych z dwóch ostatnich rysunków wskazuje na znaczne zwiększenie przepływności, jeżeli zakłada się że w sieci będą obsługiwane wyłącznie terminale zgodne z 802.11g, a nie będą obsługiwane takie, które są zgodne tylko z 802.11b.

#### 6.1.2. Porównanie charakterystyk urządzeń 802.11a i 802.11b

Obszerny opis wyników badań, których celem było porównanie właściwości systemów 802.11a i 802.11b, wykonanych przez firmę Atheros Communications znajduje się w dokumencie [37].

Badania przeprowadzono w budynku biurowym o wymiarach 80,8 m × 35,0 m. Do badań łącza IEEE 802.11a wykorzystano dwa urządzenia produkcji Atheros o mocy nadajnika 14 dBm doprowadzonej do anteny, w przypadku AP stosowano antenę o zysku 4 dBi. Jako urządzenie ruchome stosowano laptop z kartą PC.

Do badań łącza IEEE 802.11b wykorzystano dwa urządzenia innego producenta o mocy nadajnika 15 dBm.

W obu cyklach badań urządzenie ruchome przemieszczano do 80 miejsc w różnych częściach budynku, przy czym nie optymalizowano położenia i orientacji anteny urządzenia ruchomego w tych miejscach. Jednakże w trakcie testów 802.11a i 802.11b laptop znajdował się w tym samym położeniu.

Badania w każdym miejscu polegały na przesłaniu 100 pakietów (bez potwierdzenia) z AP do stacji ruchomej. Każdy pakiet zawierał 1500 bajtów, nie stosowano fragmentacji. Stacja ruchoma obliczała współczynnik pakietów błędnie odebranych PER (*Packet Error Rate*). W ten sposób monitorowano jakość łącza radiowego uniezależniając się od oprogramowania wyższych warstw.

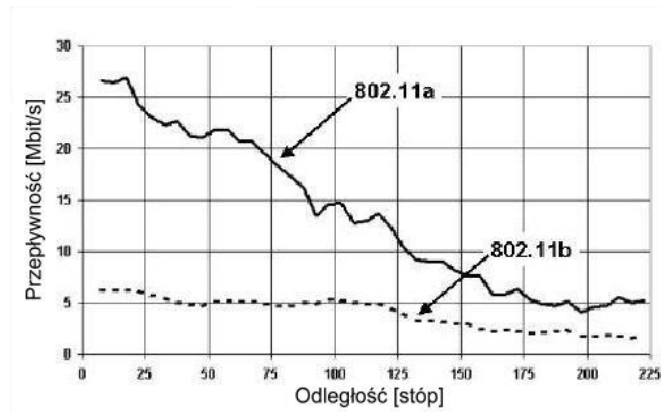
Po wyznaczeniu PER stosowano algorytm optymalizacji przepływności szybkości transmisji łącza radiowego. W każdej lokalizacji dane nadawano z każdą z możliwych szybkości, a więc odpowiednio: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s w systemie 802.11a oraz 1, 2, 5.5, 11 Mbit/s w systemie 802.11b, notując uzyskaną wartość PER.

Dla każdej lokalizacji jako optymalną przyjęto tę szybkość, która dawała największą przepływność danych.

Wykonane badania doprowadziły do następujących wniosków:

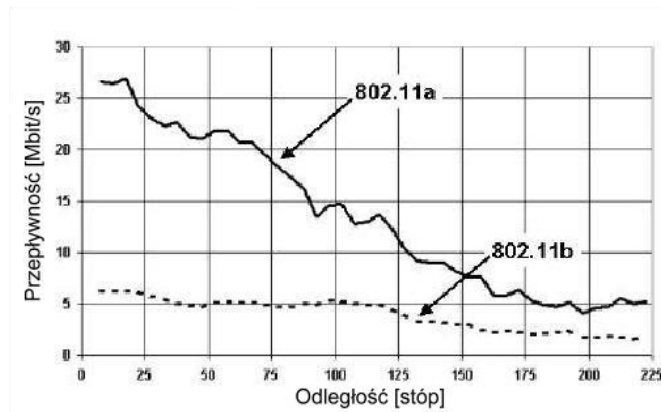
1. Zasięgi 802.11a i 802.11b są porównywalne (w obu przypadkach badano trasę o długości do 225 stóp / ~68,6 m).
2. Dla wszystkich odległości aż do 225 stóp szybkości łącza 802.11a były 2 do 5 razy większe niż łącza 802.11b.

W odległości 225 stóp szybkość systemu 802.11a wynosiła 6 Mbit/s, a systemu 802.11b 2 Mbit/s. Wyniki przedstawiono na rys. 39 (1 stopa = 30,48 cm).



Rys. 39: Porównanie szybkości łącza radiowego w funkcji odległości

3. 802.11a gwarantuje większą przepływność.
4. Dla wszystkich odległości aż do 225 stóp przepływność łącza 802.11a była od 2 do 4,5 razy większa, niż przepływność łącza 802.11b, por. rys. 40.



Rys. 40: Uśredniona przepływność dla pakietów o długości 1500 bajtów

Należy pamiętać, że w sieci systemu 802.11b złożonej z więcej niż trzech AP, zachodzi konieczność powtórzenia tej samej częstotliwości. Ze względu na większą liczbę dostępnych kanałów (do 8) system 802.11a może mieć znacznie większą pojemność.

Z drugiej strony w popularnym sprzęcie komputerowym instalowane są raczej karty systemu 802.11b/g. Z tego powodu AP i hotspot instalowane z myślą o udostępnieniu usługi wielu użytkownikom pracują na ogół w systemie 802.11b/g.

### 6.1.3. Zakłócenia w paśmie 2,4 GHz

Pasmo 2,4 GHz, którego użytkowanie nie wymaga uzyskania pozwolenia radiowego i nie jest związane z planowaniem i rezerwowaniem częstotliwości, jest wykorzystywane przez wiele systemów i urządzeń bliskiego zasięgu [17], wśród których najbardziej rozpowszechnione są dwa standardy, sieci RLAN wg specyfikacji 802.11b/g [1, 3, 6] i urządzenia systemu Bluetooth [12], toteż wzajemne zakłócenia pomiędzy tymi systemami są najbardziej prawdopodobne i w wielu przypadkach faktycznie obserwowane.

W przewodniku IEEE 802.15.2-2003 [13] podjęto próbę opracowania wytycznych odnośnie zapewnienia warunków kompatybilności systemów IEEE 802.11b-1999 i 802.15.1-2002 (jak wspomniano wcześniej norma IEEE 802.15.1-2002 jest oparta na specyfikacji systemu Bluetooth).

Wytyczne zawarte w dokumencie 802.15.2 dotyczą modelowania wzajemnych zakłóceń pomiędzy sieciami RLAN (WLAN) zgodnymi z IEEE 802.11 i 802.11b sieciami WPAN zgodnymi z IEEE 802.15.1. Przedstawiono modele, które zawierają wiele parametrów umożliwiających analizę różnych scenariuszy zakłóceń.

Jak opisano w punkcie 2.6.2 urządzenia RLAN zgodne z systemem 802.11-1999 mogą pracować w trybie ze skokową zmianą częstotliwości nośnej (FHSS) lub w trybie z bezpośrednim rozproszeniem (DSSS), a urządzenia systemu 802.11b w trybie DSSS lub CCK. Urządzenia WPAN zgodne z systemem Bluetooth pracują w trybie FHSS na tych samych częstotliwościach, które wykorzystują urządzenia 802.11 w wersji FHSS.

Zatem pomiędzy systemami mogą wystąpić następujące przypadki zakłóceń wzajemnych:

- 802.11 FHSS w obecności zakłócenia 802.15.1 (Bluetooth),
- 802.11b DSSS w obecności zakłócenia 802.15.1 (Bluetooth),
- 802.15.1 (Bluetooth) w obecności zakłócenia 802.11 FHSS,
- 802.15.1 (Bluetooth) w obecności zakłócenia 802.11b DSSS.

Ze względu na rozpowszechnienie systemów najbardziej prawdopodobne są kolizje między systemem 802.11b DSSS a systemem Bluetooth (802.15.1).

W systemie 802.11b DSSS kanały radiowe są definiowane w sposób statyczny. Natomiast szybkość transmisji może być ustalona albo ręcznie, albo automatycznie zależnie od jakości kanału, odpowiednio 11 Mbit/s, 5,5 Mbit/s, 2 Mbit/s lub 1 Mbit/s. Szerokość pasma modulacji wynosi 22 MHz.

System 802.15.1 wykorzystuje 79 częstotliwości w całym zakresie częstotliwości pasma 2,4 GHz, a więc w przypadku kolizji co najmniej 22 częstotliwości z 79 używanych przez ten system może zakłócać transmisję w systemie 802.11b. Im dłuższy pakiet RLAN tym większe prawdopodobieństwo zakłócenia przez WPAN.

Normalnie urządzenia systemu 802.11b reagują na błędy łącza radiowego obniżając szybkość transmisji, lecz obniżenie szybkości transmisji wydłuża czas pakietu i zwiększa prawdopodobieństwo zakłóceń, ostatecznie zakłócany system RLAN przyjmie najniższą możliwą szybkość transmisji 1 Mbit/s, przepływność łącza maleje, a opóźnienie wzrasta do wartości, której mogą nie tolerować aplikacje.

W przypadku, gdy 802.11b (DS-SS lub CCK) zakłóca 802.15.1 należy brać pod uwagę selektywność odbiornika. Z tego względu należy uznać, że zakłócanie są nie 22 częstotliwości, a 24. Modele przedstawione w 802.15.2 sporządzono przy tym założeniu.

Można rozważać dwa przypadki koegzystencji sieci: ze współpracą pomiędzy sieciami i bez współpracy sieci.

Pierwszy ma miejsce, gdy możliwa jest wymiana informacji między dwoma sieciami, np. za pośrednictwem urządzenia, do którego wbudowane są urządzenia RLAN i WPAN (np. komputera przenośnego). Drugi dotyczy przypadku, gdy sieci te są całkowicie niezależne.

W przypadku współpracy sieci możliwy jest przemienny dostęp do medium, arbitraż przy wysyłaniu pakietów lub deterministyczne wytłumianie zakłóceń za pomocą odpowiednich filtrów. Jeżeli zakłócenie powodują sieci nie współpracujące ze sobą, to proponuje się metody adaptacyjne.

W obu przypadkach twórcy przewodnika 802.15.2 proponują rozwiązania wymagające modyfikacji warstwy MAC i/lub PHY oryginalnych systemów.

Należy zwrócić uwagę, że urządzenia 802.15.1 wykorzystują dwa rodzaje łącza pomiędzy urządzeniami "master" i urządzeniami "slave".

Dla transmisji danych system 802.15.1 wykorzystuje łącze asynchroniczne bezpołączeniowe (*Asynchronous Connectionless Link, ACL*), którego częścią jest procedura ARQ (*Automatic Repeat Request*), automatycznego żądania powtórzenia nieodebranej ramki, konieczna dla zwiększenia niezawodności transmisji.

Dla transmisji głosu system 802.15.1 korzysta z synchronicznego łącza (*Synchronous Connection-Oriented, SCO*). W trybie SCO łącze nie obsługuje procedury ARQ, a więc zakłócenia powodujące liczne błędy transmisji mogą obniżać jakość transmisji głosu.

#### 6.1.4. Parametry sprzętu

Dokonując wyboru sprzętu należy pamiętać o ograniczeniach administracyjnych dotyczących używania RLAN w paśmie 2,4 GHz i 5 GHz [22], zwłaszcza o maksymalnej mocy promieniowanej i gęstości mocy nadajnika oraz DFS TPC w paśmie 5 GHz. Należy również ocenić parametry odbiornika (punkt 3.5) szczególnie, gdy z założeń projektu wynika, że instalacja powinna pokrywać duży obszar lub obsługiwać łącze punkt-punkt o dużym zasięgu. W środowisku o małym poziomie zakłóceń celowe jest stosowanie odbiorników pracujących bezbłędnie przy poziomie sygnału mniejszym niż określony w specyfikacji IEEE 802.11.

Np. [wg 36] produkty Atheros z serii XR:                   –96 dBm,  
Wymagania wg specyfikacji IEEE 802.11:           –85 dBm,  
Różnica czułości odbiornika:                       9 dBm.

Tę różnicę czułości odbiornika można przeliczyć na różnicę zasięgu radiowego wykorzystując zależności podane w punkcie 4.

$9 = 10 n \log(D2/D1)$ , gdzie  $n$  jest parametrem charakteryzującym środowisko,

po przekształceniu:  $10^{0.9/n} = D2/D1$ , a stąd dla:

$n = 2$             $D2 = 2,82 D1$  (przypadek otwartej przestrzeni),  
 $n = 3,3$         $D2 = 1,87 D1$ ,  
 $n = 4,5$         $D2 = 1,58 D1$  (wnętrze budynku).

A więc w środowisku, gdzie ograniczeniem zasięgu łącza radiowego jest tylko poziom sygnału użytecznego względem szumów własnych odbiornika (tj. brak zakłóceń wspólnokanałowych i sąsiednikanałowych lub pozapasmowych zakłóceń blokujących odbiornik), zastosowanie odbiornika z progiem czułości obniżonym o 9 dB pozwala na uzyskanie zasięgu większego co najmniej o 58%.

Uwaga. Należy jednak pamiętać, że w środowisku, gdzie występuje wiele urządzeń wykorzystujących to samo pasmo częstotliwości, zasięg może być ograniczony przez poziom zakłóceń wspólnokanałowych i/lub sąsiednikanałowych.

## **6.2. Rozpoznanie miejsca instalacji**

Projektowanie instalacji RLAN wymaga uzyskania wielu informacji dotyczących miejsca, w którym sieć jest planowana. Niektóre, takie jak plany budynku, wymagany obszar pokrycia, założenia odnośnie rozmieszczenia użytkowników, lokalizacja przełączników Ethernet itp., można uzyskać od zamawiającego. Na podstawie tych informacji można wstępnie oszacować liczbę AP potrzebnych do uzyskania pokrycia i pojemności.

Środowisko planowanej sieci radiowej musi być dobrze rozpoznane. Korzystne jest uzyskanie planu pomieszczeń przed przystąpieniem do przeglądu. Jeżeli go nie ma, trzeba go sporządzić w trakcie przeglądu. Należy odnotować informacje dotyczące obszaru, który ma być pokryty, kształtu i rodzaju przeszkód. Wewnątrz pomieszczeń fale radiowe są tłumione przez ściany, stropy, elementy wyposażenia, a nawet osoby przebywające lub przemieszczające się w strefie zasięgu stacji. Zaleca się kontrolne pomiary natężenia pola nadajnika testowego i poziomów zakłóceń.

Długie skrzydła budynków wymagają na ogół większej liczby AP, niż by to wynikało z ich powierzchni. Zasięg anten dookólnych może znacznie wykraczać poza obszar, który ma być pokryty ("wyciekanie sygnału"). Do pokrycia powierzchni o kształtach nieregularnych może być korzystne zastosowanie anten o charakterystykach sektorowych (np. półkulistej) lub silnie kierunkowych.

Należy zauważyć, że niektóre materiały np. metalizowane szkło, które jest przezroczyste dla światła widzialnego, także hermetyczne okna ze szczeliną między szybami wypełnioną argonem, bardzo silnie tłumią fale w paśmie 2,4 GHz.

AP mogą być instalowane ponad podwieszanym sufitem. Innym popularnym sposobem instalowania AP jest zawieszenie na ścianie. AP wyposażony w dookólną antenę zawieszony na ścianie może obsługiwać dwa sąsiadujące pokoje. W przypadku AP pracujących w paśmie 5 GHz montowanych na ścianie dużych sal zaleca się stosowanie anten panelowych skierowujących moc RF do wnętrza pomieszczenia.

Należy unikać instalowania AP w pobliżu źródeł zakłóceń radioelektrycznych. Źródłami zakłóceń w sieci RLAN mogą być inne systemy radiowe. Zwłaszcza w paśmie 2,4 GHz należy liczyć się z możliwością wystąpienia sporadycznych zakłóceń wytwarzanych w całym paśmie przez urządzenia systemu Bluetooth oraz kuchnie mikrofalowe (~2450 MHz).

W budynkach, w których wiele firm wynajmuje lokale biurowe należy liczyć się z możliwością istnienia innych sieci RLAN, z tego względu w czasie przeglądu miejsc instalacji należy skanować wszystkie kanały RLAN, celem wyszukania tego rodzaju sygnałów.

Po wykonaniu wstępnego projektu należy przeprowadzić testy pokrycia sygnałem radiowym. W tym celu umieszcza się AP z wybranymi antenami w wytypowanych miejscach wykonując prowizoryczną instalację. W czasie badań prowizorycznie zainstalowanego punktu dostępowego wygodnie jest zasilać go z baterii, aby uniknąć kłopotliwego doprowadzania przewodów sieciowych do prowizorycznie zawieszonego urządzenia.

Testy te pozwalają sprawdzić nie tylko pokrycie uzyskiwane za pomocą planowanych AP, ale również występowanie zakłóceń wspólnokanałowych powodowanych przez instalacje wykonane w sąsiedztwie.



Nadmierny, niekontrolowany zasięg sieci wykraczający poza obszar, na którym faktycznie pracują jej użytkownicy, naraża sieć na próby penetracji ze strony intruzów.

Niektórzy dostawcy sprzętu sieciowego oferują również oprogramowanie narzędziowe do testowania parametrów sieci (*site survey tools*), np. Cisco Aironet 350 series. Tego rodzaju oprogramowanie powinno dostarczać informacje o następujących parametrach:

- wykorzystywany kanał radiowy,
- identyfikator punktu dostępowego,
- adres IP punktu dostępowego,
- natężenie pola (jako parametr RSSI),
- szybkość transmisji w łączu radiowym,
- jakości łącza.

### 6.3. Programy wspomagające planowanie i utrzymania sieci

W tym rozdziale opisano przykłady programów wspomagających projektowanie, testowanie i utrzymanie radiowych sieci lokalnych (RLAN).

Nazwa programu: Ekahau Site Survey  
Producent: Proxim Corporation  
Cena: około 3200 USD

Ekahau Site Survey (ESS) jest narzędziem służącym do prezentacji oraz optymalizacji pokrycia terenu sygnałami radiowych sieci lokalnych pracujących w standardach 802.11 a/b/g. Oprogramowanie ma przejrzysty interfejs graficzny, rys. 41, oraz rozbudowane opcje wizualizacji wybranych parametrów pracującej sieci radiowej.

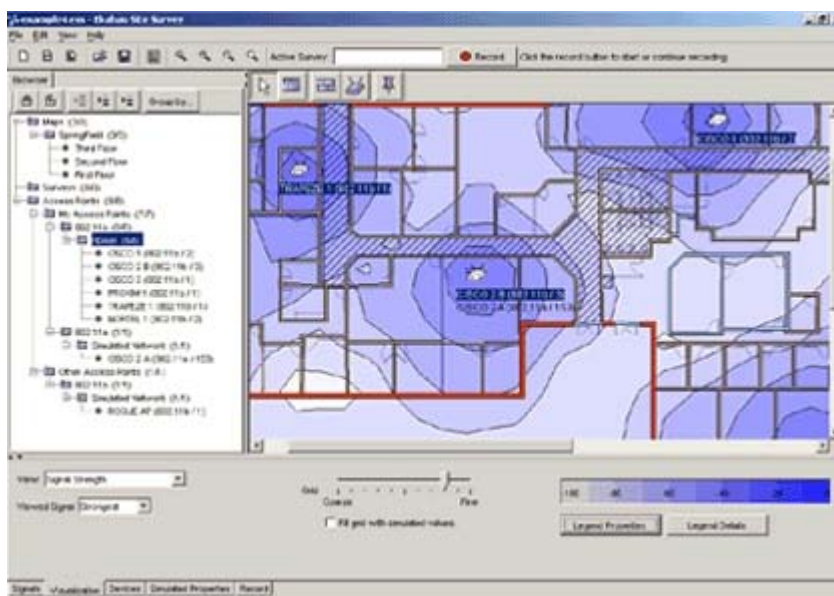
Program w wersji podstawowej pozwala między innymi na:

- wizualizację zasięgu wybranych punktów dostępowych oraz możliwych do uzyskania przepływności bitowych sieci radiowej,
- wybór właściwych kanałów pracy punktów dostępowych (w celu zmniejszenia zakłóceń),
- znajdowanie najdogodniejszych lokalizacji dla punktów dostępowych,
- analizę zajętości kanałów,
- symulację nastaw parametrów sieci oraz sprawdzenie wpływu tych nastaw na osiągi sieci,
- wyznaczenie dokładnego miejsca instalacji punktu dostępowego,
- lokalizację nieautoryzowanych punktów dostępowych,
- wizualizację miejsc wydostawania się sygnału poza obszar budynków,
- kontrolę nastaw parametrów dotyczących bezpieczeństwa sieci.

Możliwości programu ESS można znacznie rozszerzyć poprzez wykorzystanie opcjonalnych modułów:

- GPS – pozwala na tworzenie map pokrycia z wykorzystaniem wyników pomiarów wykonanych w terenie,
- Reporter – pozwala na szybkie tworzenie kompletnych raportów z badań z wykorzystaniem wbudowanego kreatora raportów,

- Planer – służy do projektowania RLAN, prognozowania zasięgów oraz dostępnych przepływności bitowych. Projektowanie sieci z wykorzystaniem tego narzędzia odbywa się w następujących pięciu krokach:
  1. Wczytanie do programu mapy rozkładu pomieszczeń (w formacie JPG lub PNG), zdefiniowanie skali, mające na celu przyporządkowanie rozmiarom obiektów wyrażonych w pikselach ich rzeczywistych rozmiarów.
  2. Zaznaczenie położenia ścian oraz określenie materiału, z którego są wykonane, (Wybór spośród modeli materiałów wbudowanych do programu lub stworzenie własnego modelu materiału lepiej odwzorowującego rzeczywiste parametry przeszkód).
  3. Umieszczenie na planie punktów dostępowych oraz zdefiniowanie ich parametrów, przede wszystkim mocy wyjściowej oraz charakterystyki stosowanej anteny.
  4. Dokonanie wizualizacji pokrycia i osiągnięć projektowanej sieci.
  5. Weryfikacja i ewentualne poprawienie otrzymanego planu sieci, przy wykorzystaniu rzeczywistych danych pomiarowych.



Rys. 41: Okno programu Ekahau Site Survey (ESS)

Nazwa programu: ManageEngine WiFi Manager 4  
Producent: AdventNet, Inc.  
Cena: od 495 USD dla wersji jednostanowiskowej  
z obsługą do 10 punktów dostępowych.

ManageEngine WiFi Manager jest rozbudowanym programem umożliwiającym wieloparametrową konfigurację oraz zarządzanie bezpieczeństwem radiowych sieci LAN. Program umożliwia ciągle monitorowanie sieci radiowej, pozwalając tym samym na zwiększenie niezawodności pracującej sieci oraz zagwarantowanie dostatecznie dużego poziomu bezpieczeństwa dla danych transmitowanych przez taką sieć. Program wykrywa ataki, które mogą nastąpić w radiowej sieci lokalnej, nie odizolowanej od wpływów otoczenia. Umożliwia również prostą, szybką, zdalną konfigurację wielu punktów dostępu. Informację o sieci, parametrach pracujących w niej urządzeń oraz o wykrytych atakach można uzyskać za

pośrednictwem przeglądarki WWW, uruchomionej na komputerze pracującym w monitorowanej sieci. Program pozwala na, rys. 42:

- identyfikację niepożądanych urządzeń w sieci;
- wyświetlenie informacji o użytkownikach, aktualnie korzystających z sieci;
- wyświetlenie informacji o punktach dostępu pracujących w sieci, w tym o typie urządzenia, jego producencie, wersji oprogramowania, identyfikatorze sieci, adresie IP oraz sprzętowym urządzeniu i obsługiwanym standardzie łączności radiowej;
- kontrolę stanu punktów dostępu pracujących w sieci: sprawny / niesprawny;
- kontrolę stanu wykorzystania kanałów radiowych, informacja o poziomie mocy wyjściowej, mocy szumów oraz aktualnym kanale pracy każdego z urządzeń;
- zdalną konfigurację punktów dostępu: wybór kanału radiowego, dostępnych szybkości transmisji, włączenie / wyłączenie szyfrowania danych, ustawienie poziomu mocy wyjściowej (moc maksymalna / zredukowana do 50%, 25% lub 12,5%; wyłączenie interfejsu radiowego);
- zwiększenie bezpieczeństwa danych transmitowanych przez sieć poprzez wprowadzenie szyfrowania oraz wykrywanie nieautoryzowanych prób dostępu do sieci;
- sygnalizowanie problemów, zanim spowodują one niewłaściwą pracę sieci;
- identyfikację wąskich gardeł sieci;
- redukcję czasu niedostępności sieci dla użytkowników;
- poprawę osiągnięć sieci;
- wykrywanie i usuwanie usterek;
- zapis informacji o ruchu panującym w sieci radiowej w celu testowania jej parametrów oraz wykrywania i zapobiegania ewentualnym uszkodzeniom;
- uaktualnianie wewnętrznego oprogramowania (*firmware*) punktów dostępowych.

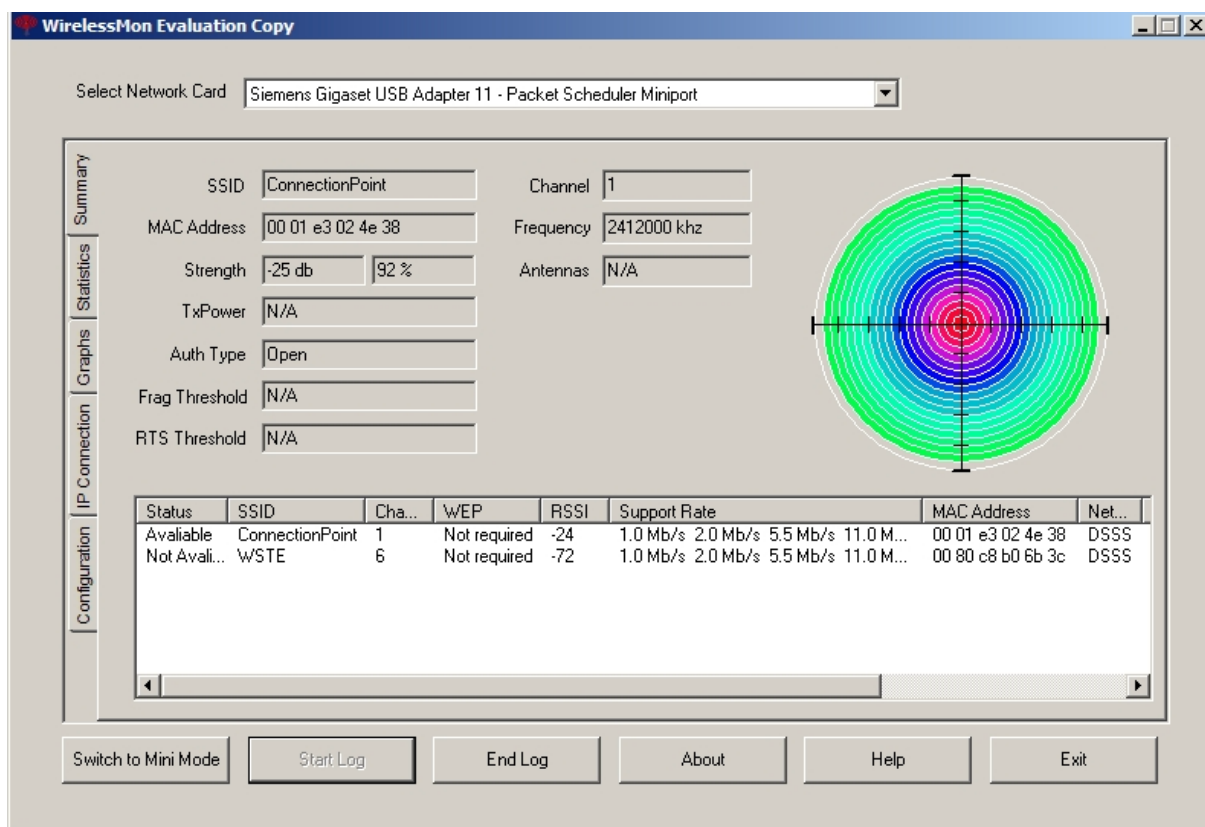


Rys. 42: Okno programu ManageEngine WiFi Manager 4

Dodatkową funkcją programu ManageEngine WiFi Manager 4 jest możliwość tworzenia raportów informujących o wybranych przez użytkownika parametrach sieci oraz bezpośredni eksport tych informacji do plików w formacie pdf.

Nazwa programu: WirelessMon v1.0  
Producent: PassMark Software Pty Ltd.  
Cena: 19 USD

WirelessMon v1.0 jest programem umożliwiającym wykrywanie urządzeń oraz pomiar parametrów sieci radiowych, których sygnał znajduje się w zasięgu adaptera RLAN skonfigurowanego do pracy z programem WirelessMon v.1.0. Informacje zebrane przez program są na bieżąco przetwarzane i wyświetlane na ekranie, rys. 43.



Rys. 43: Okno programu WirelessMon v1.0

Program pozwala na:

- monitorowanie statusu sieciowych urządzeń radiowych Wi-Fi;
- wyświetlanie w czasie rzeczywistym informacji o parametrach sygnału radiowego transmitowanego przez punkty dostępu znajdujące się w zasięgu działania adaptera sieciowego;
- zapis zebranych informacji do pliku;
- weryfikację poprawności działania sieci w standardzie 802.11;
- sprawdzenie poprawności pracy urządzeń oraz sterowników do nich;
- pomiary poziomu sygnału radiowego podchodzącego od sieci macierzystej oraz od sieci zakłócających;
- łatwą lokalizację źródeł zakłóceń;

- wykrywanie punktów dostępowych;
- weryfikację ustawień bezpieczeństwa;
- pomiar szybkości i wydajności wybranej sieci radiowej.

Nazwa programu: Network Stumbler 0.4.0

Producent: NetStumbler.com

Cena: 0. Program dostępny w Internecie.

Network Stumbler 0.4.0 umożliwia wykrycie oraz pomiar parametrów sygnałów radiowych pochodzących od urządzeń sieci lokalnych pracujących w standardach IEEE 802.11a/b/g. Informacje o poziomie sygnału odbieranego prezentowane są w formie czytelnego wykresu czasowego. Pozostałe informacje o parametrach dostępnych sieci radiowych prezentowane są w postaci tekstowej. Dodatkowo program umożliwia zapis zebranych informacji do pliku oraz ustawienie interwału czasowego dla aktualizacji danych.

Program pozwala na:

- weryfikację poprawności działania sieci,
- sprawdzenie dostępności sygnału sieci radiowej na danym obszarze oraz stworzenie dokładnej mapy pokrycia (w przypadku posiadania dodatkowego modułu z wbudowanym odbiornikiem sygnału GPS),
- wykrycie obcych sieci, mogących powodować zakłócenia sygnału sieci macierzystej,
- wykrycie prób uzyskania nieautoryzowanego dostępu do sieci,
- łatwiejsze uruchamianie linii radiowych do transmisji sygnałów w standardach IEEE 802.11a/b/g z wykorzystaniem anten kierunkowych.

#### **6.4. Testowanie pokrycia**

Jak opisano w punktach 4.3 i 4.4 oszacowanie zasięgów RLAN w budynkach jest obarczone dużym błędem. W ramach pracy wykonano badania pokrycia sygnałem radiowym sali wykładowej ośrodka szkolenia mieszczącej się na pierwszym piętrze budynku administracyjnego IŁ. Na tym samym piętrze w sąsiadujących pomieszczeniach, do których goście nie mają dostępu zostały zainstalowane trzy punkty dostępowe (AP) dołączone do sieci wewnętrznej IŁ, pracujące w systemie IEEE 802.11g w kanałach: 1 (2412 MHz), 7 (2442 MHz) i 13 (2472 MHz). We wszystkich urządzeniach zaprogramowano tę samą moc wyjściową nadajnika.

Powierzchnię sali wykładowej o wymiarach  $18 \times 6$  m podzielono na kwadraty  $2 \times 2$  m, w każdym z kwadratów wykonano pomiar poziomu sygnału odbieranego (*Received Signal Strength Indication, RSSI*) wykorzystując do tego celu kartę testową PCMCIA umieszczoną w przenośnym PC z zainstalowanym programem Network Stumbler.

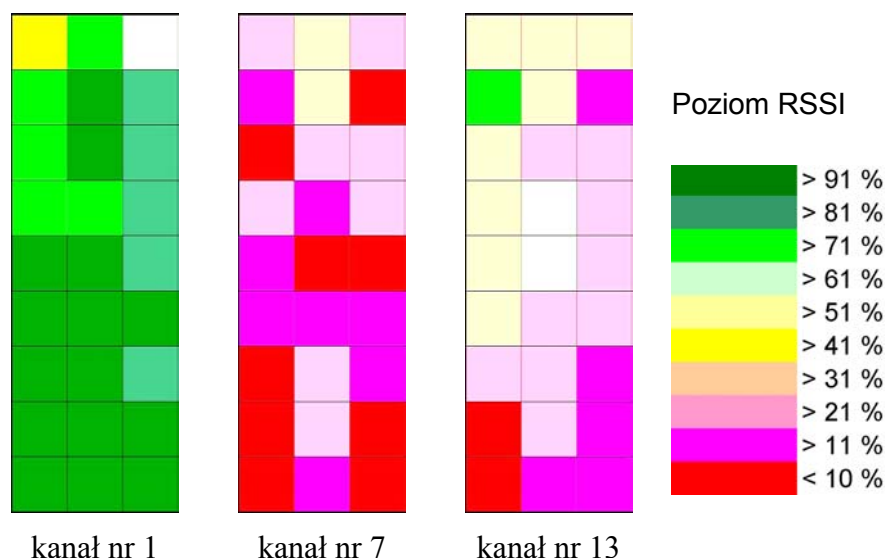
Na rys. 44 przedstawiono wyniki tych badań. Kolory prezentują zmierzony poziom sygnału.

Lokalizacje AP (niewidoczne na rysunku) tworzyły trójkąt:

AP kanału nr 1 znajdował się blisko dolnego prawego rogu.

AP kanału nr 7 znajdował się u góry na przedłużeniu osi podłużnej sali.

AP kanału nr 13 znajdował się na lewo od środka lewej ściany sali.



Rys. 44: Rozkład poziomu sygnału trzech punktów dostępu w sali wykładowej

Wniosek. AP pracujący w kanale nr 1 umieszczony blisko sali i AP pracujący w kanale nr 13 w pewnym stopniu się uzupełniają. Natomiast AP pracujący w kanale nr 7 z punktu widzenia potrzeb obsługi terminali znajdujących się sali szkoleniowej jest w zasadzie bezużyteczny.

## 7. Podsumowanie

Radiowe sieci lokalne (RLAN, WLAN) są postrzegane jako efektywny sposób dostępu do Internetu i sieci korporacyjnych, a w sieciach domowych integrują komunikację głosową, danych i funkcje rozrywkowe.

W niniejszym sprawozdaniu z pracy dokonano przeglądu technologii radiowych sieci lokalnych zgodnych ze specyfikacjami IEEE z serii 802.11. Przedstawiono wymagania dotyczące urządzeń wynikające z zaleceń i norm międzynarodowych. Opisano metody szacowania zasięgów i pojemności sieci i zagadnienia związane z kompatybilnością różnych wersji systemu. Przygotowano obszerny wykaz wykorzystanych dokumentów źródłowych, który może służyć do pogłębienia wiedzy dotyczącej przedmiotu opracowania.

Sprawozdanie może być wykorzystane jako poradnik i wytyczne do projektowania sieci WLAN, a doświadczenia zdobyte w trakcie wykonywania pracy do oferowania usług związanych z projektowaniem i badaniami tego rodzaju sieci.

W następnym etapie pracy planuje się przygotowanie podobnej analizy i wytycznych odnośnie rodziny urządzeń zaliczanych do kategorii radiowych sieci otoczenia osobistego (WPAN).

## Podstawowe definicje

Dla potrzeb niniejszego dokumentu zastosowano następujące definicje:

Dostęp radiowy (*Wireless access*) – dołączenie użytkownika końcowego (*end-user*) za pomocą systemu radiowego do sieci szkieletowych (*core networks*).

Stacjonarny dostęp radiowy (*Fixed wireless access*) – dostęp radiowy, w którym lokalizacja punktu dostępu do sieci (*access point*), zapewniającego połączenie z użytkownikiem końcowym, oraz lokalizacja zakończenia sieciowego (terminala), wykorzystywanego przez użytkownika końcowego (*end-user termination*), są stałe.

Ruchomy dostęp radiowy (*Mobile wireless access*) – dostęp radiowy, w którym lokalizacja punktu dostępu do sieci (*access point*), zapewniającego połączenie z użytkownikiem końcowym jest stała, natomiast zakończenie sieciowe (terminal) w trakcie wykorzystywania przez użytkownika końcowego jest ruchome.

Nomadyczny dostęp radiowy (*Nomadic wireless access*) – dostęp radiowy, w którym zakończenie sieciowe (terminal) stosowane przez użytkownika końcowego może być umiejscowione w różnych lokalizacjach, ale podczas używania musi być stacjonarne.

Łącze radiowe punkt-punkt (*point-to-point link*) – komunikacja drogą radiową realizowana pomiędzy dwoma stacjami (węzłami) umiejscowionymi w określonych nieruchomych punktach.

Sieć radiowa punkt do wielu punktów (*point-to-multipoint*) – komunikacja realizowana za pomocą łączy radiowych między stacjonarnym punktem dostępu, a wieloma stacjami użytkowników (terminalami) umiejscowionymi w określonych nieruchomych punktach.

Sieć radiowa punkt do obszaru (*point-to-area*) – komunikacja realizowana za pomocą łączy radiowych między stacjonarnym punktem dostępu, a wieloma stacjami użytkowników (terminalami), które mogą znajdować się w dowolnym punkcie na określonym obszarze.

Uwaga. Jest to typowa sytuacja w "WLAN hotspot".

Sieć ad-hoc (sieć ad hoc) – sieć, w której każde upoważnione urządzenie radiowe może automatycznie stać się węzłem sieci radiowej.

Uwaga. Definicja ta zakłada możliwość dynamicznych zmian struktury sieci.

sieć per-to-per – sieć z dwoma lub więcej urządzeniami radiowymi (węzłami), które łączą się ze sobą bez pośrednictwa centralnego punktu dostępu.

Uwaga. Definicja ta zakłada zdefiniowaną strukturę sieci.

Sieć kratowa (*mesh network*) – sieć, która zapewnia co najmniej dwie drogi do każdego węzła. Nie oznacza to, że każdy węzeł musi być połączony ze wszystkimi innymi. Jeżeli każdy z węzłów jest połączony ze wszystkimi pozostałymi, to jest to tzw. pełna sieć kratowa.

Uwaga. W sieci kratowej nie wymaga się, aby urządzenie mogło się dołączyć do sieci automatycznie, ale w przypadku sieci samo-konfigurujących się jest to warunek konieczny.

Punkt dostępu (AP) – urządzenie, które łączy urządzenie radiowe do innej sieci, która może być lokalną siecią kablową (LAN) lub inną.

Ruter radiowy – urządzenie przyjmujące połączenia terminali radiowych kierowane do sieci, które przydziela lokalne adresy sieciowe i zwykle zawiera firewall.

Hotspot – lokalizacja, gdzie użytkownicy mogą uzyskać dostęp do Internetu używając terminali RLAN. Dostęp może być za opłatą lub darmowy.

WPAN (*Wireless Personal Area Network*) – radiowa sieć osobistego otoczenia – sieć tworzona w miejscu pracy lub w domu, łącząca drogą radiową urządzenia osobiste w promieniu ok. 10 m. Określenie obejmuje system Bluetooth i inne definiowane w ramach prac IEEE 802.15.

Bluetooth – nazwa handlowa radiowego systemu bliskiego zasięgu, zaprojektowanego do "zastąpienia kabli" w połączeniach pomiędzy komputerami, PDA, peryferyjnym wyposażeniem komputerów i telefonami komórkowymi. Bluetooth umożliwia transmisję głosu i danych w paśmie 2,4 GHz na odległość ok. 10 m.

Aplikacja – program przeznaczony do wykonywania specyficznych czynności np. przeglądarka internetowa.

Zasięg radiowy (*radio range*) – odległość od anteny nadajnika, przy której natężenie pola sygnału pozostaje powyżej minimalnego poziomu, wyznaczonego dla odbiornika określonego systemu i określonego rodzaju anteny odbiorczej.

Uwaga. W tym kontekście można definiować: zasięg użytkowy wyznaczający granice obszaru pokrycia oraz zasięg zakłóceniowy wyznaczający granice obszaru zakłóceń wspólnokanałowych.

Obszar pokrycia (*coverage area*) punktu dostępu lub zespołu punktów dostępu – obszar geograficzny, na którym dla wielu stacji użytkowników (terminali) jest dostępna określona usługa radiokomunikacyjna.

Uwagi. 1. Należy zauważyć, że granice obszaru pokrycia mają ścisły związek z definicją warunków technicznych, takich jak: częstotliwość i moc promieniowana nadajnika, zysk anteny i wartość progowa czułości odbiornika (która z kolei zależy od rodzaju modulacji i szybkości transmisji, dopuszczalnej stopy błędu), założony margines dla określonego rodzaju zakłóceń.

2. W rezultacie należy rozróżniać:

- obszar pokrycia wolny od zakłóceń (*interference-free coverage area*), tj. obszar ograniczony wyłącznie poziomem szumu odbiornika;
- znamionowy obszar pokrycia (*nominal coverage area*), tj. obszar zdefiniowany po ustanowieniu planu częstotliwości sieci, przy uwzględnieniu wszystkich przewidywanych nadajników (tj. sieciowych zakłóceń wspólnokanałowych);
- faktyczny obszar pokrycia (*actual coverage area*), tj. obszar na którym uwzględnia się rzeczywiście występujące szумы i zakłócenia.

Szybkość transmisji (danych) (*(data) rate*) – ilość danych przesyłanych przez aktywny nadajnik radiowy w ciągu sekundy [Mbit/s].

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

Uwaga. Wskutek uśredniania przepływność jest mniejsza od szybkości transmisji radiowej. Jest mniejsza również dlatego, że część przesyłanych danych jest wykorzystywana przez protokół transmisji radiowej dla potrzeb systemu.

Pojemność (*capacity*) – suma przepływności, które radiowa sieć lokalna może zapewnić użytkownikom, z uwzględnieniem wszystkich zjawisk, które w rzeczywistości mogą oddziaływać na pojemność pojedynczego AP i wielu AP.



## Wykaz literatury

- [1] IEEE 802.11, 1999 Edition (ISO/IEC 8802-11: 1999). IEEE Standards for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems. Local and Metropolitan Area Network. Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [2] IEEE 802.11a-1999. (8802-11:1999/Amd 1:2000(E)). 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 1: High-speed Physical Layer in the 5 GHz band.
- [3] IEEE 802.11b-1999. Supplement to 802.11-1999. Wireless LAN MAC and PHY specifications: Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band.
- [4] 802.11b-1999/Cor1-2001. 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 2: Higher-speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band. Corrigendum 1.
- [5] IEEE 802.11d-2001. Amendment to IEEE 802.11-1999, (ISO/IEC 8802-11) 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: Specification for Operation in Additional Regulatory Domains.
- [6] IEEE 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-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.
- [7] IEEE 802.11h-2003. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and Information Exchange Between Systems. LAN/MAN Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5 GHz band in Europe.
- [8] IEEE 802.11i-2004. Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003). IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between system. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 6: Medium Access Control (MAC) Security Enhancements.
- [9] IEEE 802.11e/D13.0. Approved Draft Amendment Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange Between Systems. LAN/MAN Specific Requirements. Part 11 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements.
- [10] IEEE Std. 802.1X-2004. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: Port-Based Network Access Control.

- [11] IEEE 802.15.1-2002. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs).
- [12] Bluetooth SIG, Inc. Bluetooth specification version 1.2; Part A - Radio specification. 5 Nov. 2003.
- [13] IEEE 802.15.2-2003. IEEE Recommended Practice for Telecommunications and Information exchange between systems – Local and metropolitan area networks Specific Requirements – Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands.
- [14] IEEE 802.15.3-2003. 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 (WPAN).
- [15] IEEE 802.15.4-2003. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).
- [16] ERC/DEC/(01)07. ERC Decision of 12 March 2001 on harmonised frequencies, technical characteristics and exemption from individual licensing of Short Range Devices used for Radio Local Area Networks (RLANs) operating in the frequency band 2400 – 2483,5 MHz.
- [17] ERC/REC 70-03 E. Relating to the use of Short Range Devices (SRD); Including Appendixes and Annexes at October 2005. [Annex 3 Wideband Data Transmission systems].
- [18] ETSI EN 300 328 V1.6.1 (2004-11). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive.
- [19] ECC/DEC/(04)08. ECC Decision of 12 November 2004 on the harmonised use of the 5 GHz frequency bands for the implementation of Wireless Access Systems including Radio Local Area Networks (WAS/RLANs)
- [20] ETSI EN 301 893 V1.3.1 (2005-08). Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive.
- [21] Zalecenie Rec. ITU-R M.1652. Dynamic frequency selection (DFS) in wireless access systems including radio local area networks for the purpose of protecting the radiodetermination service in the 5 GHz band.
- [22] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 24 października 2005 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia (*Dz. U. 2005 nr 230, poz. 1955*).

- [23] Centurion Wireless Technologies, Inc. Design Guide for Wireless Device Antenna Systems. Including: Bluetooth and 802.11 Applications. Revised: 1/12/00.
- [24] ETSI ES 202 131 V1.2.1 (2003-07). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband Transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band using spread spectrum modulation techniques and 5 GHz high performance RLAN equipment; Specification of Reference Receiver Performance Parameters for Spectrum Planning.
- [25] CEPT Report 006. 12 Nov. 2004. Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to: Harmonise technical and, in particular, operational conditions aiming at efficient spectrum use by RLANs in the bands 5150-5350 MHz and 5470-5725 MHz.
- [26] J. D. Parsons. The Mobile Radio Propagation Channel. Pentech Press Ltd. London. 1992.
- [27] Sylvain Ranvier. Path loss models. Physical layer methods in wireless communication systems.
- [28] COST 231 Final Report. Digital mobile radio towards future generation systems.
- [29] Zalecenie Rec. ITU-R P.1456-2. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz.
- [30] Zalecenie ITU-R P.1411-2. Propagation data and prediction methods for the planning of short range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz.
- [31] Zalecenie Rec. ITU-R P.530-10. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
- [32] Zalecenie Rec. ITU-R P.452-11. Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz.
- [33] Instytut Łączności. Warszawa. Podręcznik użytkownika programu TrasaZ.
- [34] Zalecenie ECC/REC 01-05. List of parameters of digital point-to-point fixed radio links used for national planning.
- [35] Zalecenie Rec. ITU-R P. P.1238-4. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz.
- [36] Atheros Communications Inc. 2004. Atheros eXtended Range XR Technology.
- [37] Atheros Communications, Inc. 2001. Measured Performance of 5 GHz 802.11a Wireless LAN Systems.
- [38] Zalecenie Rec. ITU-R M.1450-2. Characteristics of broadband radio local area networks.
- [39] Nortel Networks. Engineering a WLAN network. 2004.
- [40] Trapeze Networks. Capacity is Critical: Designing Enterprise Wireless LANs for Capacity vs. Coverage. 2003.
- [41] J. Zyren, E. Enders, T. Edmondson 802.11g Starts Answering WLAN Range Questions. CommsDesign. Jan. 14 2003.

- [42] S. M. Schwartz. Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) vs. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) in Broadband Wireless Access (BWA) and Wireless LAN (WLAN). Alvarion Ltd. 2001.
- [43] SAMS. Wireless LANs, Second Edition. 2002.
- [44] F. Ohrtman, K. Roeder. Wi-Fi Handbook. Building 802.11b Wireless Networks. Agilent Technologies. WLAN Design Guide. Sept. 2004.
- [45] Atheros Communications Inc. 2003. Metodology for Testing Wireless LAN Performance.
- [46] BelAir Networks. 2004. Capacity of Wireless Infrastructure Mesh Networks.
- [45] Zalecenie Rec. ITU-R M.1653. Operational and deployment requirements for wireless access systems including radio local area networks in the mobile service to facilitate sharing between these systems and systems in the Earth exploration-satellite service (active) and the space research service (active) in the band 5 470-5 570 MHz within the 5 460-5 725 MHz range.
- [46] Zalecenie Rec. ITU-R V.573-4. Radiocommunication vocabulary.
- [47] Jose A. Gutierrez and others. IEEE 802.15.4: Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks. IEEE Network - September/October 2001.

## Akronimy

3G	Third Generation (system)
AAA	Authentication, Authorisation, Accounting
ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
AmI	Ambient Intelligence
AN	Ambient Networks
AP	Access Point
BCC	Binary Convolutional Code
BER	Bit Error Ratio
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BSS	Basic Service Set
BWA	Broadband Wireless Access
CCK	Complementary Code Keying
CCMP	Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol (802.11i)
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications (European Conference of Postal and Telecommunication Administrations)
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DCF	Distributed Coordination Function
DFS	Dynamic Frequency Selection,
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
e.i.r.p.	lub EIRP. effective isotropic radiated power

EAP	Extensible Authentication Protocol
ECC	Electronic Communications Committee (CEPT)
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EDCF	Enhanced DCF
ERC	European Radiocommunications Committee (CEPT)
ERO	European Radiocommunication Office (CEPT)
ERP OFDM	Extended Rate PHYs OFDM
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
FCC	Federal Communications Commission (USA)
FER	Frame Erasure/Error Rate
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GFSK	Gaussian FSK
GSM	Global System Mobile
GPRS	General Packet Radio Service
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
HPBW	Half Power Beam Width,
HTTPS	HyperText Transfer Protocol Secure
IAPP	Inter Access Point Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
IF	Intermediate Frequency
IFS	Inter Frame Space
IP	Internet Protocol
IPSec	Internet Protocol Security
IPv6	IP version 6
IR	Infra Red
ISP	Internet Service Provider
ITU-R	International Telecommunications Union – Radiocommunications Sector
LLC	Logical Link Control
LNA	Low Noise Amplifier
MAC	Medium Access Control
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Standard Interconnection
PBCC	Packet Binary Convolutional Code
PC	Personal Computer
PCF	Point Coordination Function
PCI	Peripheral Component Interconnect
PDA	Personal Digital Assistant
PDU	Protocol Data Unit
PER	Packet Error Rate
PHY	Physical layer a
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PMD	Physical Medium Dependent
PSDU	PLCP SDU
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
PAN	Personal Area Network

PDA	Personal Digital Assistant
RF	Radio Frequency
RLAN	Radio LAN (WLAN)
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTS	Ready To Send
Rx	Receiver
SDU	Service Data Unit
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal to Noise Ratio
SRD	Short Range Device
SSH	Secure Shell
RFID	Radio Frequency Identification
TIP	Total Interfering Power
TPC	Transmitted Power Control
Tx	Transmitter
UMTS	Universal Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
VLAN	Virtual Local Area Network
VoIP	Voice over IP
VPN	Virtual Private Network
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
UWB	Ultra Wideband
WAS	Wireless Access Systems
WEP	Wired Equivalent Privacy
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless LAN = RLAN w ITU-R, CEPT, ETSI
WME	Wi-Fi Multimedia Enhancements
WMM	Wi-Fi Multimedia
WPA	Wi-Fi Protect Access
WPAN	Wireless Personal Area Network
WRC	The World Radiocommunication Conference (Geneva, 2003)
XDSL	Digital Subscriber Line