



# **INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI**

## **PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY**

**Zakład Zastosowań Technik Łączności Elektronicznej  
(Z10)**

### **Rozpoznawanie otoczenia radiowego w sieciach sensorowych**

**Praca nr 10300047**

Warszawa, grudzień 2007

Praca nr 10300047

Słowa kluczowe: sieci sensorowe, rozpoznawanie otoczenia  
elektromagnetycznego

Kierownik pracy: dr inż. Jacek Jarkowski

Wykonawcy pracy:

mgr inż. Maciej Odzinkowski

mgr inż. Marcin Przymus

mgr inż. Kamil Wrzosek

Kierownik Zakładu: inż. Bogdan Chojnacki

## Spis treści

1. Wprowadzenie	5
2. Sieci sensorowe	5
2.1. Sposób wdrożenia	6
2.2. Mobilność	6
2.3. Koszt, rozmiar, zasoby i pobór energii	6
2.4. Heterogeniczność	7
2.5. Rodzaj komunikacji	7
2.6. Infrastruktura	8
2.7. Topologia sieci	8
2.8. Pokrycie	8
2.9. Tryb połączeń w sieci	8
2.10. Rozmiar sieci	8
2.11. Czas życia	9
2.12. Inne wymagania jakościowe	9
3. Topologia sieci sensorowych	9
3.1. Topologia gwiazdy i każdy z każdym (peer-to-peer)	10
3.2. Rozpoznawanie topologii w sieciach sensorowych	
4. Zastosowania	12
4.1. Wykrywanie pożarów lasów	12
4.2. Wykrywanie stanów powodziowych	12
4.3. Monitorowanie towarów w magazynie (Warehouse tracking)	13
4.4. Opieka zdrowotna	13
4.5. Inteligentne domy	14
4.6. System czasu rzeczywistego względnego pozycjonowania	14
4.7. Śledzenie obiektów	14
4.8. Monitorowanie spójności strukturalnej	15
5. Rozpoznawanie obiektów geograficznych na podstawie danych pochodzących z sensorów różnych rodzajów	15
6. Rozpoznawanie otoczenia	16
6.1. Metody pozycjonowania i rozpoznania otoczenia	<u>15</u>
6.2. Prace już wykonane, trendy – przegląd	17
6.2.1. Pozycjonowanie względne	17
6.2.2. Śledzenie przemieszczających się osób przez sieć sensorową z rzadko rozmieszczonymi kamerami	18
7. Podsumowanie	20
Bibliografia	20
Załączniki	21



## 1. Wprowadzenie

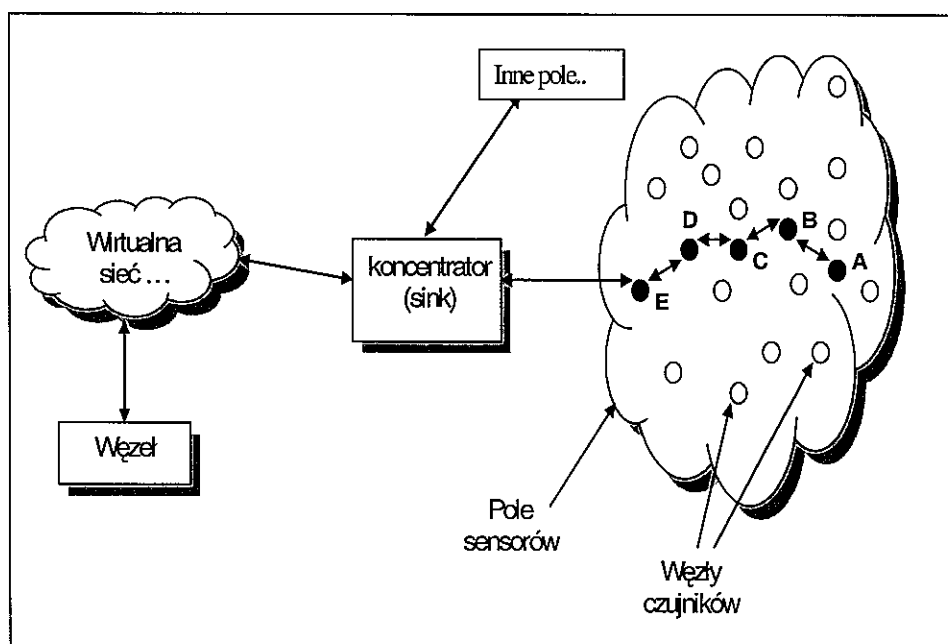
Celem niniejszej pracy jest przygotowanie kompilacji wiedzy i materiałów do wniosków dotyczących 7 Programu Ramowego oraz Funduszy Strukturalnych. Główną przesłanką tych prac jest tematyka zastosowań sieci sensorowych w rozpoznawaniu otoczenia elektromagnetycznego z zastosowaniem oryginalnego rozszerzenia metody AoA (Angle of Arrival) o zastosowania obliczeń funkcji korelacji. Otrzymane oryginalne wyniki z dotychczas prowadzonych prac mogą być podstawą wyżej wniosków o dofinansowanie w wyżej wymienionych źródłach.

Tematyka badania otoczenia z wykorzystaniem sieci sensorowych rozwija się bardzo szybko. Dzieje się tak za sprawą postępu technologicznego w budowie coraz bardziej wydajnych, a jednocześnie energooszczędnych i tanich sensorów, jak również rozwoju nowych technik komunikacji bezprzewodowej. Nie bez znaczenia jest również upowszechnienie sieci sensorowych w zastosowaniach cywilnych. Już nikt dzisiaj nie traktuje idei inteligentnego domu jako opowieści science-fiction, lecz jako pomysł do rozważenia podczas budowy własnego domu. Specyfika sieci sensorowych powoduje, że są one idealnie dopasowane do monitorowania zasobów naturalnych, jak lasy, stany wód, skażenia obszarów. Tematyka ta jest szczególnie eksploatowana w kontekście ostatnich pożarów lasów w Grecji czy Hiszpanii.

Niniejsza praca ma na celu przybliżyć tematykę sieci sensorowych w kontekście jej zastosowań w monitorowaniu i rozpoznawaniu otoczenia.

## 2. Sieci sensorowe

Bezprzewodowe sieci sensorowe są to sieci bezprzewodowe składające się z rozlokowanych w przestrzeni geograficznej autonomicznych urządzeń wykorzystujących sensory do monitorowania parametrów fizycznych lub środowiskowych. Poza sensorami, urządzenia te są wyposażone w układy nadawczo-odbiorcze, dzięki którym mogą się one komunikować z innymi urządzeniami. Pozyskane dane są najczęściej przesyłane do punktu zbiorczego i dalej za pośrednictwem sieci szkieletowej do „centrali”, gdzie poddawane są obróbce. Typowa architektura sieci sensorowej została pokazana na Rys. 1



Każdy węzeł sieci sensorowej posiada dodatkowo mikrokontroler oraz źródło zasilania. Najczęściej jest to zasilanie bateryjne. Rozmiary węzłów są różne w zależności od typu. I tak, pojedynczy węzeł może mieć rozmiar pudełka od butów lub drobinki kurzu. Koszty pojedynczego węzła również wahają się w szerokich granicach. W zależności od wielkości węzła i stopnia skomplikowania cena może wynosić od kilku centów do kilkuset dolarów. Wielkość i koszt węzłów sieci sensorowych jest ściśle uzależniona od zasobów, jakimi dysponują, np. energii, pamięci, wydajności.

Sieci sensorowe były pierwotnie rozwijane dla zastosowań militarnych, jednak dziś pracują w wielu cywilnych zastosowaniach, jak np. monitorowanie środowiska, opieka zdrowotna, automatyka domu, kierowanie ruchem.

Istotne zagadnienia związane z sieciami sensorowymi obejmują [Römer, Mattern]:

- Sposób wdrożenia,
- Mobilność,
- Koszt, rozmiar, zasoby i pobór energii,
- Heterogeniczność,
- Rodzaj komunikacji,
- Infrastruktura,
- Topologia sieci,
- Pokrycie,
- Tryb połączeń w sieci,
- Rozmiar sieci,
- Czas życia,
- Inne wymagania jakościowe.

Poniżej zostały one pokrótce omówione.

### **2.1. Sposób wdrożenia**

Wdrożenie sieci sensorowych może przybierać kilka form. Głównym wyzwaniem jest odpowiednie rozlokowanie węzłów sieci sensorowej. Może przebiegać się ono w sposób losowy (np. rozsypanie ich na dany obszar z pokładu samolotu) lub też położenie węzłów może być wcześniej ustalone. Proces ten może być jednorazową czynnością bądź też być działaniem ciągłym i długotrwałym. W tym drugim przypadku sieć może być rozbudowywana bądź modyfikowana podczas działania.

### **2.2. Mobilność**

Węzły sieci sensorowych mogą być zainstalowane na stałe w określonym miejscu lub też przemieszczać się. Przemieszczanie się węzłów może być spowodowane np. zmianą otoczenia taką jak ruchy ziemi/przepływ wody. W takim przypadku przemieszczenie węzłów nie jest zwykle zamierzone. Niektóre sieci mogą być zaprojektowane pod kątem przemieszczających się czujników, np. czujniki mogą być przymocowane do monitorowanego obiektu (samochodu, towaru, zwierzęcia). Mobilność węzłów sieci sensorowej ma duży wpływ na jej działanie. Krytycznymi aspektami są tutaj prędkość i częstotliwość przemieszczania się węzłów. W szczególności należy uwzględnić je przy wyborze protokołów sterujących siecią.

### **2.3. Koszt, rozmiar, zasoby i pobór energii**

Rozmiar pojedynczego węzła sieci sensorowej może być bardzo zróżnicowany. Urządzenie takie w zależności od potrzeb może mieć gabaryty pudełka po butach (np.

sensor stacji pogodowej) lub też być praktycznie niezauważalny (np. sensory w zastosowaniach wojskowych).

Podobnie jest z kosztem takich urządzeń. W zależności od rozmiaru i mocy obliczeniowej, pojedynczy węzeł może kosztować od kilkuset dolarów do kilku centów. Ze względów ekonomicznych sieci sensorowe składające się z wielu węzłów muszą wykorzystywać tańsze urządzenia. Natomiast w sieciach składających się z małej ilości czujników można sobie pozwolić na droższe urządzenia i nie spowodują do diametralnego wzrostu kosztów jej budowy.

Z rozmiarem i mocą obliczeniową węzłów sieci ściśle związany jest pobór energii. Węzły sieci jako urządzenia autonomiczne najczęściej wyposażone są w źródło energii w postaci baterii. W niektórych węzłach możliwe jest zastosowanie baterii słonecznych jako źródła energii. Jednak wtedy węzeł musi posiadać odpowiednie rozmiary oraz musi być umieszczony w dostatecznie nasłonecznionym miejscu. Aspekty związane z poborem energii przez węzły sieci są tak ważne, że powstały protokoły specjalnie zaprojektowane dla sieci sensorowych o małym poborze energii.

Zasoby węzłów sieci również zależą od kosztu, rozmiaru i energii jaką dysponuje to urządzenie. Im większa moc obliczeniowa, tym bardziej skomplikowany jest układ, co z kolei powoduje wzrost kosztu. Większa moc obliczeniowa wiąże się również z większym poborem mocy.

#### **2.4. Heterogeniczność**

Wczesne sieci sensorowe składały się z węzłów tego samego rodzaju – były homogeniczne. W niektórych projektach (np. Amorphous Computing [Abelson]) nawet zakładano, że węzły sieci są nierozróżnialne, co oznaczało, że poszczególne węzły nie posiadają nawet unikalnych identyfikatorów. Takie podejście było spowodowane względami ekonomicznymi, bazującymi na stwierdzeniu, że niemożliwe jest tanie wyprodukowanie dużej ilości węzłów heterogenicznych.

Wiele systemów sensorowych wyposażonych jest obecnie w węzły różnego rodzaju, mające bardzo zróżnicowane funkcje. I tak np. niektóre węzły w danej sieci sensorowej mogą być wyposażone w wiele czujników i to niejednakowych, inne tylko w jeden, jeszcze inne mogą pełnić funkcję bramy GSM, a część z nich jeszcze dodatkowo być wyposażona w moduł lokalizacji GPS.

Heterogeniczność sieci sensorowej ma duży wpływ na złożoność oprogramowania sterującego poszczególnymi węzłami oraz na zarządzanie całą siecią.

#### **2.5. Rodzaj komunikacji**

Węzły bezprzewodowych sieci sensorowych mogą komunikować się za pomocą takich sposobów jak:

- fale radiowe,
- światło laserowe,
- sprzężenie indukcyjne i pojemnościowe,
- dźwięk.

Najczęściej wykorzystywany sposób to transmisja danych za pomocą fal radiowych. Metoda ta charakteryzuje się stosunkowo małym poborem energii na małych odległościach, nie wymaga bezpośredniej widoczności między urządzeniami, a urządzenia korzystające z transmisji radiowej posiadają niewielkie anteny (kilka centymetrów dla pasm rzędu kilku GHz).

Komunikacja za pomocą światła laserowego jest bardziej energooszczędna i umożliwia stosowanie mniejszych urządzeń. Minusem jest z kolei konieczność bezpośredniej widoczności nadajnika i odbiornika.

Sprężenie indukcyjne oraz pojemnościowe działa tylko na niewielkich odległościach jednak może być użyte do zasilenia węzła. Metoda ta jest wykorzystywana w większości systemów RFID.

Komunikacja za pomocą dźwięku lub ultradźwięków jest wykorzystywana głównie pod wodą lub w celu pomiarów odległości na podstawie czasu propagacji.

Niektóre węzły mogą być wyposażone w więcej niż jeden rodzaj sposobu komunikacji.

## **2.6. Infrastruktura**

Sieci sensorowe mogą pracować w oparciu o infrastrukturę bądź też ad-hoc. W pierwszym przypadku węzły komunikują się z tzw. stacją bazową. Przykładem takiej sieci może być system GSM. W przypadku sieci ad-hoc komunikacja może zachodzić między każdym węzłem, dlatego do prawidłowego funkcjonowania nie jest wymagane istnienie infrastruktury. Z tego względu sieci ad-hoc są wdrażane w miejscach, w których nie ma infrastruktury stałej, bądź też nie ma ekonomicznego uzasadnienia na zbudowanie takiej infrastruktury.

Sieci korzystające z infrastruktury poza transmisją informacji mogą ją wykorzystywać w innym celu, np. synchronizacji bądź lokalizacji.

## **2.7. Topologia sieci**

Jednym z ważniejszych parametrów sieci sensorowych jest ich topologia, czyli sposób połączenia węzłów w sieć. Istotnym parametrem jest tutaj średnica. Jest to maksymalna liczba krawędzi między dowolnymi węzłami sieci. I tak np. jeśli średnica wynosi 1, oznacza to, że wszystkie węzły sieci mogą komunikować się ze sobą bezpośrednio. Sieci o topologii gwiazdy mają średnicę równą 2.

Topologia sieci ma wpływ na opóźnienia, niezawodność, pojemność i zużycie energii. Ze względu na wagę tego zagadnienia, zostało ono omówione bardziej szczegółowo w rozdziale 0.

## **2.8. Pokrycie**

Pokrycie obszaru sieciami sensorowymi zależy od obszaru, jaki jest pokrywany przez pojedynczy węzeł wyposażony w sensor. W zależności od potrzeby dany obszar może być pokryty tylko w niektórych miejscach, może być pokryty całkowicie bądź też może zawierać obszary, które są pokryte zasięgiem kilku sensorów. Stopień pokrycia obszaru wpływa na koszt, zużycie energii, złożoność i czas życia sieci sensorowej.

## **2.9. Tryb połączeń w sieci**

Węzły w sieci sensorowej mogą komunikować się między sobą w trybie połączenia ciągłego, przerywanego lub sporadycznego. W trybie ciągłym połączenie jest utrzymywane przez cały czas działania sieci. W trybie przerywanym i sporadycznym połączenie jest zestawiane tylko w pewnych okresach czasu. Tryb połączeń ma wpływ głównie na protokoły routingu oraz sposób zbierania informacji z sieci.

## **2.10. Rozmiar sieci**

Wielkość sieci sensorowej jest określona przez liczby węzłów, z których składa się ta sieć. W zależności od stopnia pokrycia obszaru oraz rodzaju wykorzystywanych sensorów, sieć sensorowa może obejmować zasięgiem mniejsze bądź większe obszary. Wielkość sieci sensorowej ma wpływ na jej skalowalność, w szczególności na protokoły i algorytmy sterujące siecią.



### **2.11. Czas życia**

Czas życia sieci sensorowych zależy od zastosowania i może wahać się w granicach od kilku godzin do kilku lat. Czas życia sieci powoduje, że podczas jej projektowania należy zwrócić szczególną uwagę na aspekty związane ze zużyciem energii przez poszczególne węzły.

### **2.12. Inne wymagania jakościowe**

W zależności od zastosowania, na sieci sensorowe mogą być nałożone dodatkowe wymagania dotyczące opóźnień w transmisji danych (informacja o jakimś zdarzeniu musi być przesłana do bazy nie później niż zadany okres czasu), niezawodności (sieć musi działać sprawnie, nawet w przypadku pewnych, zdefiniowanych wcześniej uszkodzeń), odporności na ingerencję osób trzecich (sieć musi działać prawidłowo nawet podczas ingerencji osób trzecich), odporności na podsłuchy (sieć musi posiadać mechanizmy uniemożliwiające podsłuchiwanie transmitowanych danych), niewykrywalności (obecność i działanie sieci musi być trudne do wykrycia lub niewykrywalne). Takie wymagania mogą wpłynąć na pozostałe cechy sieci sensorowych i powinny być uwzględnione już podczas etapu projektowania tych sieci.

## **3. Topologia sieci sensorowych**

Topologia sieci opisuje połączenia między jej elementami w postaci mapy sieci. Dzięki określeniu topologii można uzyskać:

- mapy rozkładu energii,
- mapy zasięgu działania czujników,
- mapy zasięgu łączności,
- mapy okresów aktywności transmitowanych danych, itp.,
- mapy współpracy.

Po wdrożeniu sieci topologia może zmieniać się na skutek zmiany położenia węzłów, dostępnej energii lub też zaistniałych usterek. Fakt ten powoduje, że topologia sieci sensorowych musi być tworzona na bieżąco oraz aktualizowana w czasie rzeczywistym ze względu na awarie, mobilność lub rozbudowę sieci o nowe czujniki. Mechanizmy kontroli topologii powinny obejmować działanie w sieciach z czujnikami umiejscowionymi na stałe oraz mobilnymi.

Cel algorytmów kontroli topologii może być zdefiniowany w następujący sposób: zbudować połączony graf z możliwie rzadką komunikacją, który może być łatwo utrzymywany podczas gdy węzły są mobilne.

Mechanizmy kontroli topologii ustalają moc transmitowaną przez każdy węzeł sieci w taki sposób, aby była zapewniona łączność między czujnikami i jednocześnie zużycie energii było minimalne. Zamiast transmitowania z pełną dostępną mocą, czujniki w bezprzewodowych sieciach sensorowych o ścieżkach wielo-krawędziowych wspólnie określają transmitowaną moc i definiują topologię sieci uwzględniając parametry sąsiadów. W tradycyjnych sieciach dzieje się to w ten sposób, że każdy węzeł transmituje z maksymalną mocą, a topologia jest budowana przez protokoły routingu bez brania pod uwagę zagadnień związanych ze zużyciem energii.

Pod pojęciem „kontroli topologii” można wyróżnić kilka zagadnień:

- odkrywanie topologii,
- formowanie topologii,
- utrzymanie topologii.
- Procedury kontroli topologii mogą być uruchomione na rzecz:
  - jednostek (węzłów akumulujących, czujników),
  - różnych zadań (zarządzania, routingu/harmonogramu, klastrowania),

- różnych obszarów (lokalnego zasięgu, globalnego zasięgu), dokładności (dokładna lub częściowa wiedza)

Zastosowania kontroli topologii sieci mogą być ściśle powiązane, np. klastrowanie i routing lub zarządzanie i routing.

Dla celów zarządzania węzeł sieci sensorowej może odkrywać topologię z niżej wymienionych powodów:

- utrzymywania sieci,
- centralnego konfigurowania sieci (routing, obowiązki węzłów, zbieranie danych),
- monitorowania stanu sieci oraz zarządzania awariami,
- bezpieczeństwa,
- oszczędzania energii.

Dla celów routingu dedykowany węzeł może stosować wykrywanie i formowanie topologii do wprowadzenia w życie routingu zapobiegawczego i reaktywnego. W przypadku klastrowania węzeł może tworzyć klastery i mieć możliwość łączenia się w drzewo klastrow lub w ogólności w topologię wieloklastrową.

W niektórych przypadkach wiedza o globalnej topologii sieci nie musi być wymagana: każdy węzeł może współpracować tylko ze swoimi sąsiadami i/lub z węzłem kontrolującym. Ścieżki danych powinny być ustalone tylko w kierunku węzła agregującego (informacja częściowa o topologii) i zarządzanie siecią nie wymaga dokładnego obrazu całej sieci.

Z drugiej strony pewne funkcje (np. routingu) mogą potrzebować topologii zawierającej informacje o położeniu. Oznacza to, że każdy węzeł musi znać swoje położenie (gdy samodzielne pozycjonowanie węzła dzięki GPS nie jest możliwe, inne metody mogą być wykorzystane, np. algorytmy pozycjonowania względnego).

Na topologię ma wpływ na kilka metryk sieci sensorowych:

- pojemność sieci,
- straty pakietów spowodowane kolizjami i interferencjami,
- czas życia sieci,
- opóźnienie w dostarczaniu danych,
- pokrycie i łączność między sensorami,
- zużycie energii,
- parametry jakościowe (QoS).

Protokoły kontroli topologii dla bezprzewodowych sieci sensorowych są ostatnio prezentowane w literaturze jako główne mechanizmy redukcji zużycia energii przez redukcję zasięgu transmisji, przy jednoczesnym zapewnieniu każdemu sensorowi połączenia z dostateczną ilością sąsiadów w celu zapewnienia łączności w całej sieci. Dodatkowo, algorytmy kontroli topologii podnoszą pojemność sieci dzięki redukcji interferencji wprowadzanych przez węzły.

Poniżej zostały opisane dwie podstawowe topologie wykorzystywane w budowie sieci sensorowych. Topologie te mogą posłużyć do budowania sieci o bardziej złożonych topologiach.

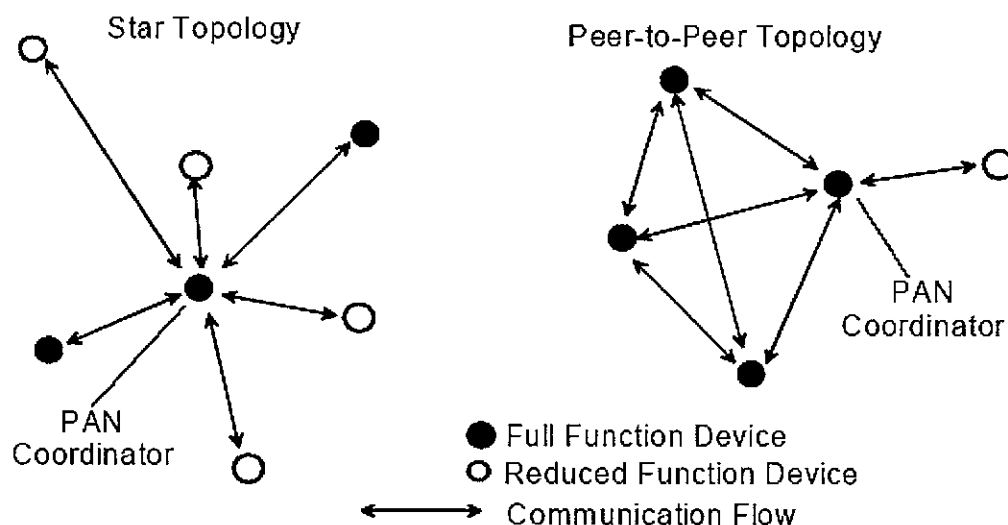
### **3.1. Topologia gwiazdy i każdy z każdym (peer-to-peer)**

Standard IEEE 802.15.4 jest standardem definiującym warstwę fizyczną (PHY) oraz warstwę dostępu do medium (MAC) dla osobistych sieci bezprzewodowych (WPAN). Jest on zoptymalizowany pod kątem małych przepływności danych z myślą o bezprzewodowym łączeniu czujników w bezprzewodowych sieciach sensorowych.

Według standardu IEEE 802.15.4 sieć składa się z węzła koordynującego i zbioru urządzeń. W ogólności, urządzenia mogą być urządzeniami o ograniczonej funkcjonalności (ang. Reduced Function Devices – RFD) lub urządzeniami o pełnej funkcjonalności (Full Function Devices – FFD). Urządzenie FFD może być koordynatorem sieci PAN lub zwykłym urządzeniem. FFD może komunikować się z urządzeniami RFD lub innymi FFD. Z kolei, RFD może komunikować się tylko z FFD. Urządzenia RFD są dedykowane dla bardzo prostych zastosowań, w których nie jest wymagane przesyłanie dużych ilości danych, mogą komunikować się tylko z jednym FFD w danym momencie. Jednak urządzenia RFD zużywają minimalną ilość zasobów i pojemności pamięci. Koordynator PAN jest podstawowym kontrolerem sieci i jest odpowiedzialny za inicjowanie pracy sieci. Jest to urządzenie FFD i ma zaimplementowane całkowity zestaw protokołów.

W zależności od zastosowania, sieci WPAN mogą pracować w dwóch topologiach: topologii gwiazdy oraz topologii równy z równym (peer-to-peer) (Rys. 2). W topologii gwiazdy komunikacja zachodzi między urządzeniami i jednym, centralnym kontrolerem, nazywanym koordynatorem PAN. Zastosowania topologii gwiazdy to np. automatyka domowa, komputer osobisty wraz z urządzeniami peryferyjnymi. Topologia gwiazdy jest ustanawiana w następujący sposób. Gdy urządzenie FFD jest uruchamiane po raz pierwszy, może założyć własną sieć i stać się koordynatorem PAN. Wszystkie sieci o topologii gwiazdy pracują niezależnie od innych sieci o topologii gwiazdy. Jest to realizowane poprzez wybieranie identyfikatora sieci, który nie jest obecnie wykorzystywany w zasięgu tworzonej sieci. Gdy identyfikator PAN jest wybrany, koordynator PAN staje się zdolny do przyłączania innych urządzeń (zarówno RFD jak i FFD) do własnej sieci.

Topologia każdy z każdym (peer-to-peer) również ma koordynatora PAN, jednak różni się od topologii gwiazdy tym, że każde urządzenie może komunikować się z każdym innym urządzeniem, które jest w zasięgu. Taka topologia pozwala na budowanie bardziej skomplikowanych topologii, jak np. topologię kratową. Sieć o topologii każdy z każdym może być siecią samoorganizującą i samouzdrawiającą się. Może również wykorzystywać ścieżki wielokrawędziowe do przesyłania danych. Każda sieć PAN wybiera unikalny identyfikator. Identyfikator ten umożliwia komunikowanie się urządzeń w obszarze danej sieci z wykorzystaniem krótkich adresów oraz pomiędzy różnymi, niezależnymi sieciami.



Rys. 2. Przykłady topologii gwiazdy oraz każdy z każdym

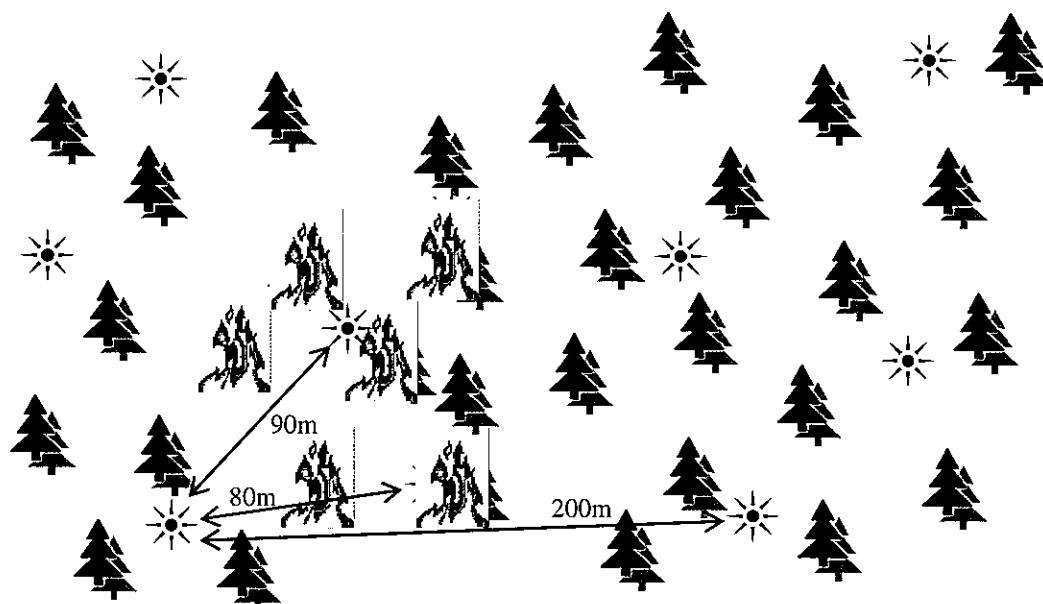
#### 4. Zastosowania

Sieci sensorowe zostały stworzone na potrzeby wojska, jednak dziś mają one zastosowanie w wielu dziedzinach codziennego życia zwykłych ludzi. Poniżej zostały omówione niektóre z nich.

##### 4.1. Wykrywanie pożarów lasów

Bezprzewodowe sieci sensorowe mogą być wykorzystane do monitorowania pożarów lasów we wczesnych stanach. Pożary charakteryzują się tym, że ciężko jest je ugasić, gdy się rozprzestrzeniają na dużą skalę. Dlatego zastosowanie sieci sensorowych do wykrycia pożarów we wczesnych fazach jest tak ważne.

Sensory monitorujące pożary w lasach mogą zbierać informacje o takich parametrach jak temperatura, wilgotność powietrza, ciśnienie oraz położenie geograficzne. Dane z sensorów są przesyłane do węzła agregującego poprzez inne węzły (topologia równy z równym). W przypadku, gdy pewne parametry zmieniają się, np. nagle znacznie wzrośnie temperatura, centrum monitorowania jest natychmiast powiadamiane. Operator może wtedy na podstawie danych wpływających z innych, sąsiednich sensorów sprawdzić, czy rzeczywiście jest to pożar, czy nie i w razie potrzeby odpowiednio zareagować.



Rys. 3. Zastosowanie WSN do wykrywania pożarów lasów

##### 4.2. Wykrywanie stanów powodziowych

Sieci sensorowe znajdują również zastosowanie w wykrywaniu stanów powodziowych. Można tutaj rozróżnić dwa przypadki: wewnątrz budynku oraz na zewnątrz budynku. W budynku może to być sytuacja, gdy np. zapchają się rury odpływowe i woda zacznie wypływać ze zlewu lub pęknięcie rury. Na zewnątrz budynku może to być pęknięcie rury wodociągowej lub podniesienie się stanu rzeki. W obu przypadkach zadaniem sieci sensorowej jest wykrycie wody w miejscach, gdzie nie powinno jej być. Informacja o zdarzeniu jest przesyłana do centrum monitorowania lub

tez powiadamiani są właściciele mieszkania/domu (np. za pomocą SMSa). System może być również tak zaprogramowany, aby np. zamknął zawory doprowadzające wodę do miejsca awarii.

#### 4.3. Monitorowanie towarów w magazynie (Warehouse tracking)

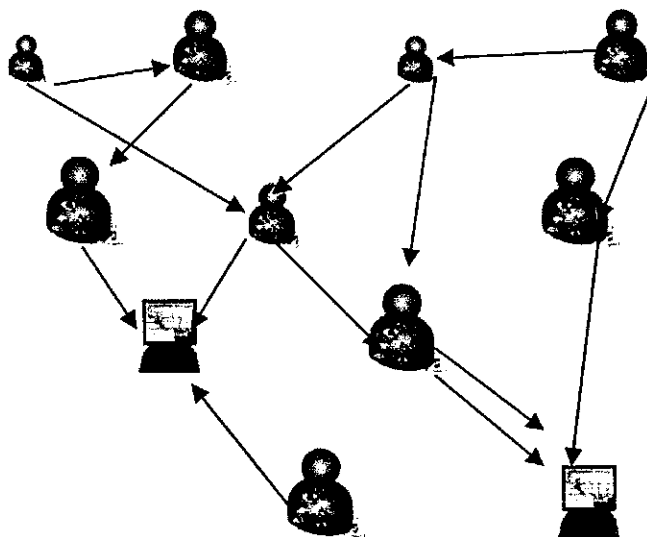
W dużych magazynach, gdzie przechowywane są tysiące towarów znajdujących się w kontenerach bezprzewodowe sieci sensorowe mogą być nieocenioną pomocą podczas inwentaryzacji, odnajdywania konkretnych produktów oraz automatycznej aktualizacji stanów magazynu.

W tym celu wykorzystywane są rekonfigurowalne sensory (tagi), które są umieszczone na kontenerach zawierających dany produkt. Dzięki tym tagom, wyposażonym w możliwość łączności bezprzewodowej, magazynier może odczytać informacje o produktach znajdujących się w kontenerach, dacie ich produkcji, dacie wstawienia do magazynu, itp. Dodatkowo taka sieć sensorowa umożliwia określenie położenia kontenera z dokładnością centymetrów.

#### 4.4. Opieka zdrowotna

Sieci sensorowe mają szerokie zastosowanie w opiece zdrowotnej. Sensory zbierają informacje o stanie pacjenta i przesyłają je do systemu, który udostępnia informacje lekarzowi. Pacjent może być w ten sposób monitorowany począwszy od zakończenia operacji lub zabiegu, aż do momentu, w którym uzna się, że nie jest wymagane monitorowanie jego stanu. Położenie pacjenta nie ma znaczenia, może to być zarówno szpital jak i dom pacjenta.

Istotnym aspektem tego zastosowania jest zapewnienie wysokiej dokładności pomiarów. Przykład sieci sensorowej użytej do monitorowania zdrowia został pokazany na Rys. 4. Sensory umieszczone na ciałach pacjentów zbierają informacje o stanie zdrowia, a następnie przesyłają je do węzłów agregujących. Przesyłanie danych z sensorów może odbywać się w topologii równy z równym jak to zostało pokazane na Rys. 4 lub też w przypadku gdy w pobliżu nie ma innych węzłów poprzez inne sieci (GPRS, UMTS).



Rys. 4. Przykład sieci sensorowej monitorującej zdrowie pacjentów

#### **4.5. Inteligentne domy**

Idea inteligentnych domów jest już znana od pewnego czasu. Jednak dopiero zastosowanie bezprzewodowych sieci sensorowych do monitorowania zachowań ludzkich i otoczenia pozwoliło w pełni zrealizować tę ideę. Dziś inteligentne domy mogą automatycznie włączać i wyłączać światło, zdalnie monitorować dzieci, przygotowywać gorącą kawę na śniadanie, wykrywać sytuacje awaryjne i reagować na nie.

Dla przykładu można sobie wyobrazić sytuację, w której domownik wchodzi do inteligentnego domu otwierając drzwi. Sygnał otwarcia drzwi jest przekazywany do systemu, który podejmuje dalsze działania: włącza ogrzewanie, światło.

Z kolei, podczas nieobecności domowników system sam może symulować ich obecność poprzez załączanie światła w określonych pomieszczeniach i określonej sekwencji. Czujniki wilgotności gleby umożliwiają automatyczne podlewanie trawnika, a czujniki dymu mogą wykryć pożar i za pomocą systemu powiadomić właściciela i odpowiednie służby.

Inteligentne domy umożliwiają podniesienie komfortu i bezpieczeństwa domowników.

#### **4.6. System czasu rzeczywistego względnego pozycjonowania**

Lokalizacja ludzi bądź obiektów jest przydatna w wielu zastosowaniach. Techniki wykorzystujące system globalnego pozycjonowania (GPS) znajdują zastosowanie jedynie poza budynkami. Określanie pozycji wewnątrz budynków jest problematyczne, szczególnie, gdy potrzebne są informacje o położeniu danego obiektu względem innych obiektów. System GPS jest w tym przypadku bezużyteczny.

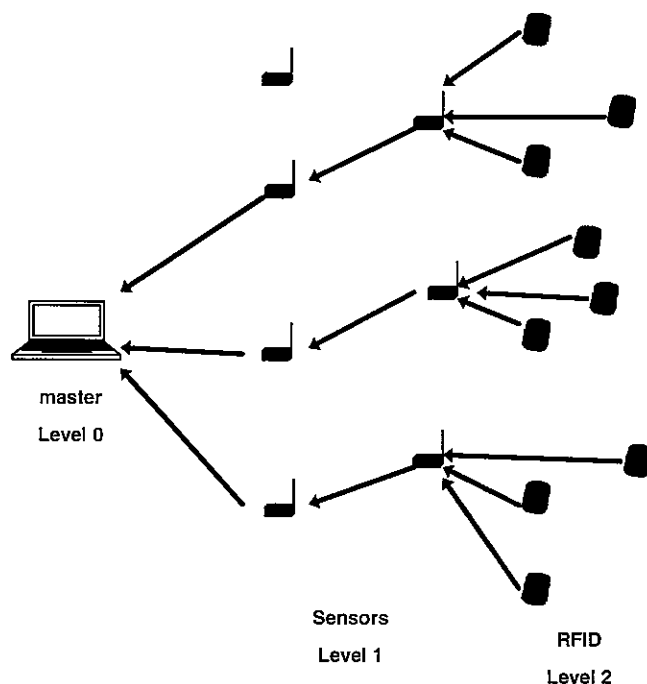
Jako przykład takiej sytuacji możemy sobie wyobrazić grupę szturmową lub oddział strażaków wykonujących zadanie w danym budynku. Możliwość monitorowania położenia wszystkich członków zespołu, np. przez dowódcę, byłaby nieocenioną pomocą.

Aby było to możliwe, każdy członek zespołu musi być wyposażony w bezprzewodowy sensor. Wszystkie sensory muszą być ze sobą dokładnie zsynchronizowane. Pozycja członków zespołu jest określana na podstawie pomiaru wzajemnych odległości. Nieustanna zmiana pozycji członków zespołu wymusza na systemie, aby pracował w czasie rzeczywistym. Ponadto czujniki muszą być małe i lekkie tak, aby nie przeszkadzały noszącym je osobom oraz powinny charakteryzować się niewielkim zużyciem energii i małymi opóźnieniami aby możliwe było częste wykonywanie pomiaru odległości.

#### **4.7. Śledzenie obiektów**

Śledzenie obiektów polega na monitorowaniu obiektów znajdujących się wewnątrz budynków lub na obszarze pewnych obiektów. W tej sytuacji obiekty wyposażone są w identyfikatory wraz z możliwością samolokalizacji w pomieszczeniu. Przykładem zastosowania sieci sensorowych do śledzenia takich obiektów może być monitorowanie położenia wózków bagażowych na stacji kolejowej. System może ostrzegać np. ochronę, gdy dany wózek znajduje się zbyt daleko od stacji, bądź też w przypadku, gdy stoi zbyt długo w niewłaściwym miejscu.

Obiekty monitorowane w takiej sieci sensorowej muszą być wyposażone w tagi RFID. Elementy o stałym położeniu znajdujące się w obszarze objętym monitoringiem (np. wejścia i wyjścia) powinny być wyposażone w węzły zawierające czytniki tagów RFID. Wszystkie węzły z odbiornikami RFID przesyłają dane o zarejestrowanych obiektach do centralnego punktu, np. centrum monitoringu stacji, gdzie operator może sprawdzić co dzieje się z monitorowanym obiektem.



Rys. 5. 3-warstwowa architektura sieci sensorowej śledzącej obiekty

Sieć taka zbudowana jest w oparciu o hierarchię 3-warstwową. Poziom 0. stanowi węzeł centralny zbierający wszystkie informacje, tzw. master, na poziom 1. składają się węzły sieci sensorowej wyposażone w odbiorniki RFID, natomiast poziom 2 to obiekty, które zawierają tagi RFID (Rys. 5).

#### 4.8. Monitorowanie spójności strukturalnej

Bezprzewodowe sieci sensorowe mogą być wykorzystywane do detekcji i lokalizacji uszkodzeń budynków, mostów, statków, samolotów, itp. W takich zastosowaniach celem sieci sensorowych jest określenie prawidłowego stanu dużych obiektów, monitorowanie go i reagowanie na zmiany stanu. Głównym zastosowaniem takich systemów jest np. monitorowanie stanu budynków po trzęsieniu ziemi. Główne wymagania stawiane takim systemom to małe opóźnienia, niezawodność, skalowalność. Dodatkowo system nie może powodować żadnych uszkodzeń w obiekcie monitorowanym.

Rozpoznawanie obiektów geograficznych na podstawie danych pochodzących z sensorów różnych rodzajów

Jednym z zastosowań sieci sensorowych jest tzw. teledetekcja (remote sensing). Jest to metoda polegająca na badaniu obiektów z pewnej odległości. Można wyróżnić teledetekcję aktywną i pasywną. Do teledetekcji aktywnej można zaliczyć takie zastosowania jak radar, w którym obiekty są rozpoznawane na podstawie odbitej od obiektu fali elektromagnetycznej, lidar – wysyłane jest światło, sodar – wysyłane są fale akustyczne. Teledetekcja pasywna polega na odbieraniu fal wysyłanych od rozpoznawanych obiektów, np. zdjęcia fotograficzne.

W ostatniej dekadzie rozwijane są metody służące do automatycznego rozpoznawania obiektów geograficznych z wykorzystaniem różnego rodzaju sensorów (multisensors). Na podstawie danych dostarczonych przez sensory, np. zdjęć satelitarnych, są rozpoznawane obiekty. W początkowej fazie, metody te pozwalały na identyfikację obiektów tylko jednego rodzaju np. dróg oraz korzystały tylko z jednego

rodzaju danych źródłowych, w większości z obrazów panchromatycznych. Zagadnienie identyfikacji obiektów na podstawie tych danych jest bardziej skomplikowane niż sądzono, jednak powstało kilka algorytmów, które można wykorzystać w praktyce.

Dzięki wykorzystaniu danych pochodzących z sensorów różnego rodzaju osiągnięto większą dokładność, rzetelność i kompletność wyników. Dodatkowo algorytmy do interpretacji danych są mniej skomplikowane. Wadą tego podejścia jest wyższy koszt pozyskania danych (dane pochodzą z różnych źródeł) oraz większa wiedza na temat przetwarzania danych różnego rodzaju.

Dane wykorzystywane w tej metodzie to:

obrazy panchromatyczne wysokiej rozdzielczości (piksel o boku 1m),

hyperspectral imaginery (Digital Airbone Imaging Spectrometer – DAIS) (piksel o boku 6 m),

dane SAR (piksel o boku 1 m).

I tak np. wykorzystując pasmo C i L radarów SAR można rozróżnić różne rodzaje zalesienia. Metoda ta była testowana na obszarze okolic jeziora Michigan w USA. Wykorzystano dane ERS-1 i JERS-1 SAR. Celem było rozróżnienie obszarów wyżynnych pokrytych drzewami iglastymi, obszarów pokrytych drzewami szerokolistnymi oraz obszarów nizinnych pokrytych drzewami iglastymi. Dla danych ERS-1 z pasma C całkowita dokładność klasyfikacji wyniosła 63.5 %, dla danych JERS-1 z pasma L – 65.9 %. Gdy do klasyfikacji wykorzystano oba rodzaje danych, dokładność wzrosła do 93.7 %.

Przyczyną poprawy jest połączenie analizy danych zebranych z pomiarów na znacząco różniących się częstotliwościach, polaryzacjach i kątach obserwacji. Pasma C daje informacje o strukturze korony drzew, z kolei pasma L pozwala uzyskać informacje o gałęziach drzew.

Wykorzystując wielopasmowe zobrazowania SAR można wyeliminować niejednoznaczności w klasyfikacji obszarów użytkowania terenu (drogi, obszary zabudowane, lasy, jeziora, pastwiska, tereny uprawne).

## **6. Rozpoznawanie otoczenia**

### **6.1. Metody pozycjonowania i rozpoznania otoczenia**

Bezprzewodowe sieci sensorowe umożliwiają monitorowanie i zbieranie informacji o otaczającym środowisku. W zależności od rodzaju zastosowanych czujników w węzłach sieci można prowadzić badania i analizy różnych wielkości fizycznych.

Spośród wszystkich sposobów rozpoznawania otoczenia radiowego można wyróżnić pięć podstawowych metod [Żółkowski]:

Metoda CoO (*ang. Cell of Origin*), która bazuje na identyfikacji stacji dostępowej realizującej obsługę danego źródła. Dokładność określenia położenia zależy od wielkości obszaru obsługiwanego przez stację dostępową, stąd też najdokładniej położenie jest określone dla źródeł znajdujących się w pikokomórkach.

Metoda ToA (*ang. Time of Arrival*), polega na pomiarze czasu propagacji między źródłem, a stacją dostępową. Wymaga stosowania w stacjach dostępowych wzorców czasu o dużej dokładności.

Metoda EOTD (*ang. Enhanced Observed Time Difference*), wykorzystuje różnice czasu propagacji ze źródła do kilku (zwykle trzech) stacji dostępowych. Na podstawie tych czasów wyznaczane jest położenie względem stacji dostępowych o znanych współrzędnych geograficznych.



Metoda A-GPS (*ang. Assisted GPS*), wykorzystuje odbiornik GPS w celu określenia położenia obiektu. Dane o położeniu są następnie przesyłane do systemu lokalizacji elementów. Źródło musi być wyposażone w odbiornik GPS.

Metoda AoA (*ang. Angle of Arrival*), bazuje na wykorzystaniu namiaru, tj. kierunku na źródło promieniowania względem układu namierzającego. Namiar jest wykonywany za pomocą metody amplitudowej bądź amplitudowo-fazowej. Zasadniczą fazą tej metody jest konieczność stosowania rozbudowanych systemów antenowych.

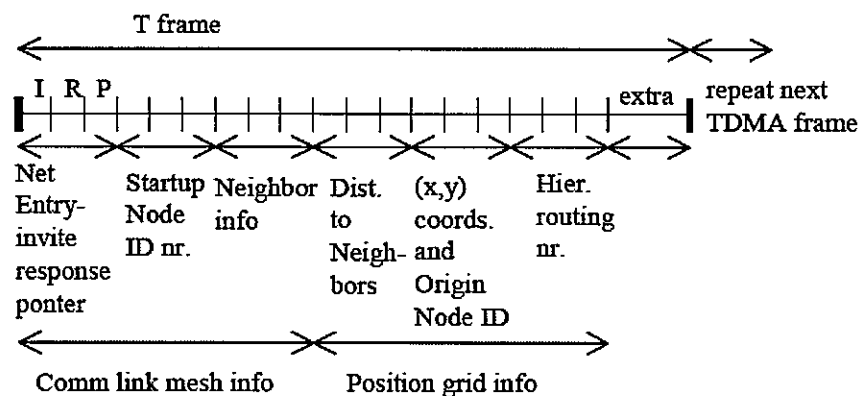
W Instytucie Łączności – Państwowym Instytucie Badawczym prowadzono prace nad rozpoznawaniem otoczenia radiowego z wykorzystaniem analizy funkcji korelacji. Jest to metoda należąca do grupy AoA, bazująca na wykorzystaniu odbioru sygnałów skorelowanych, pochodzących ze wspólnego źródła. Sygnał odbierany jest w różnych, znanych punktach, Wyznaczane opóźnienia metodą obliczeń korelacyjnych stają się podstawą do wyznaczania miejsc geometrycznych położen źródeł. Metoda może być stosowana wszędzie tam, gdzie precyzja wyznaczania położenia jest rzeczą na. Wyniki badań zostały opisane w pracach i artykułach, które ukazały się w poprzednich latach.

## 6.2. Prace już wykonane, trendy – przegląd

Nieustannie trwają prace nad opracowaniem nowych oraz udoskonaleniem istniejących metod mających na celu rozpoznawanie otoczenia radiowego, śledzenie obiektów w przestrzeni geograficznej oraz rozpoznawanie obiektów. Intensywnie prowadzone prace nad doskonalszymi algorytmami wynikają z potrzeby ich uproszczenia i zwiększenia wydajności. Tendencję tą wzmacnia możliwość wykorzystania tych algorytmów w wielu praktycznych zastosowaniach (rozdział 0).

### 6.2.1. Pozycjonowanie względne

W [Cook, Das] zaproponowano metodę względnego pozycjonowania elementów – węzłów sieci sensorowej. Metoda wykorzystuje komunikację między węzłami w technice TDMA. Nagłówek ramki TDMA zawiera informacje dotyczące transmisji oraz położenia (Rys. 6).



Rys. 6. Struktura ramki TDMA w metodzie pozycjonowania względnego

Metoda polega na wyznaczaniu położenia węzłów względem innych węzłów w oparciu o pomiar czasu propagacji sygnału. W wolnej przestrzeni prędkość propagacji sygnału radiowego jest znana, w związku z tym, możliwe jest konwersja czasu propagacji na odległości między węzłami. Położenie węzłów jest określane względem położenia węzła źródłowego (o współrzędnych (0, 0)).

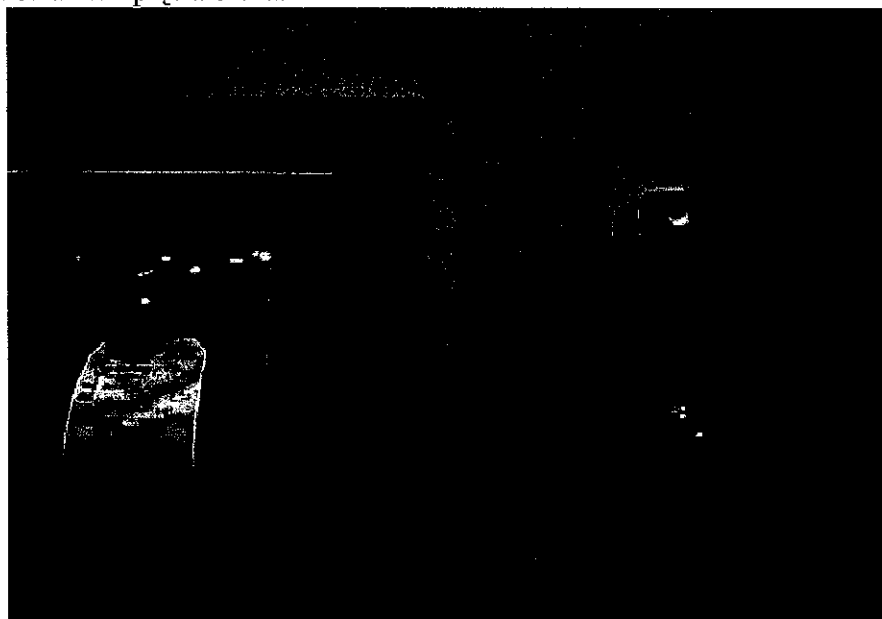
Istnieje możliwość określenia bezwzględnego położenia elementów sieci. Jednak do tego wymagane jest wcześniejsze określenie współrzędnych geograficznych przynajmniej trzech węzłów tej sieci.

### **6.2.2, Śledzenie przemieszczających się osób przez sieć sensorową z rzadko rozmieszczonymi kamerami**

W [Rahimi, Dunagan, Darrell] została zaprezentowana metoda śledzenia poruszających się osób za pomocą sieci sensorowej, której węzłami są kamery. Zwykle określanie położenia obiektów na podstawie obrazu z kamer polegało na analizie miejsc, które były pokryte zasięgiem obserwacji kilku kamer bądź też wykorzystywało założenie, że płaszczyzna, po której przemieszcza się śladowy obiekt jest skojarzona z mapą obserwowanego obszaru.

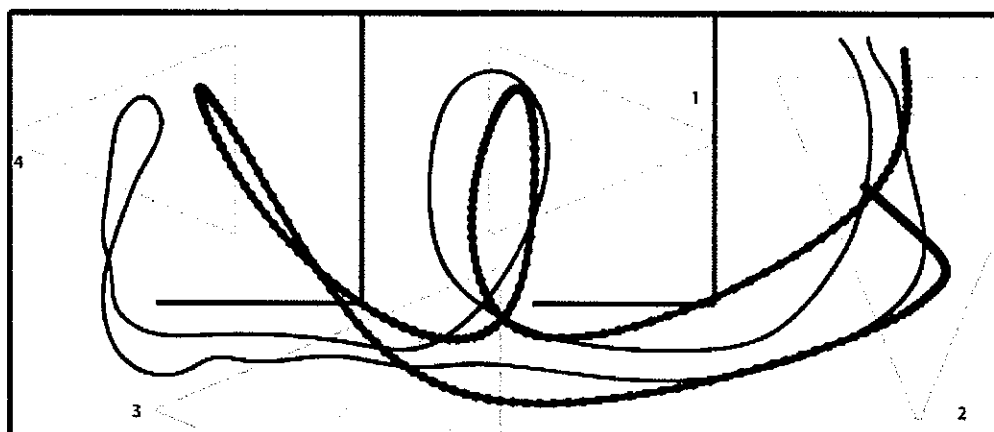
Autorzy artykułu [Rahimi, Dunagan, Darrell] pokazali, że w przypadku, gdy dostępna jest informacja o dynamice przemieszczania się obiektu, możliwe jest estymowanie trajektorii jego ruchu bez konieczności uwzględniania obszarów nakładania się zasięgów kamer czy też bez konieczności obserwacji płaszczyzny, po której porusza się obiekt.

Omawiana metoda została sprawdzona w warunkach rzeczywistych. Sieć sensorowa została zbudowana z 4 węzłów będącymi w istocie urządzeniami typu PDA wyposażonymi w kamery (Rys. 7). Urządzenia te komunikowały się ze stacją bazową, na której uruchomiony był proces aplikacji MATLAB. Na urządzeniach wykonywana była wstępna obróbka danych i przesyłana co 250 ms do stacji bazowej. Sensory zamontowane były na ścianach piętra biura.



Rys. 7. Urządzenia PDA będące węzłem testowanej sieci sensorowej

Wyniki estymacji ruchu zostały pokazane na Rys. 8.



Rys. 8 – Wyniki działania metody (kolorem czarnym oznaczono rzeczywisty tor ruchu, kolorem niebieskim – tor estymowany, kolor szary to zasięg poszczególnych kamer)

## 7. Podsumowanie

Pierwotna koncepcja sieci sensorowych zakładała możliwość zbierania informacji z miejsc lub obszaru, w których rozmieszczone były mierniki lub czujniki określające parametry środowiska. Łączność radiowa czujników określanych jak sensory została wprowadzona, gdy łączność przewodowa stała się zbyt kosztowna i nieskuteczna. Wtedy zastosowano osiągnięcia rozwoju sieci bezprzewodowych rozległych a szczególnie znanych pod nazwą ad-hoc. Zaimplementowano i rozszerzono liczbę protokołów działających w sieci, pozwalających na samoorganizację sieci sensorowych i utrzymaniu ich w „ruchu”. Przydatność sieci sensorowych o oferowane przez nie możliwości w pewnym momencie przekroczyła oczekiwania. Postęp technologiczny umożliwił budowę wyspecjalizowanych sieci o bardzo zaawansowanych funkcjach, dobrej łączności umożliwiającej skuteczne zbieranie olbrzymich ilości informacji z obszaru objętego siecią. Ten sam postęp technologiczny umożliwił budowę na skalę masową sensorów o niskich kosztach wytwarzania. Z licznych informacji w literaturze można wnioskować, że te cechy pozwalają na burzliwy rozwój i zastosowania sieci sensorowych.

Jednocześnie powstają koncepcje wykorzystania idei i metod sieci sensorowych do bardziej zaawansowanych zastosowań. Wyposażenie sieci sensorowej w inteligentne odbiorniki radiowe pozwalają na obserwacje i rozpoznanie tła pola elektromagnetycznego. Umiejętne zastosowanie obliczeń funkcji korelacji odbieranych sygnałów w ustalonych i znanych z dużą dokładnością miejsc pozwala na uzyskiwanie interesujących informacji o istnieniu i rozmieszczeniu źródeł promieniowania elektromagnetycznego.

Ze względu na przydatność i korelacyjnej metody do rozpoznawania środowiska elektromagnetycznego i możliwości jej szerokiego zastosowania wydaje się zasadne kontynuowanie dalszych prac nad rozwojem tej metody w Instytucie Łączności

## Opracowane materiały dla sieci doskonałości CRUISE i CINEMA

- Załącznik 1. Sprawozdanie dla SD CRUISE
- Załącznik 2. Artykuł na KSTiT06
- Załącznik 3. Koncepcja wniosku do SD CINEMA Zał3 i Zał. 4
- Załącznik 4. Wykaz ważniejszych pozycji literatury

## Bibliografia

### Materiały CRUISE

- Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Std. 802.15.4, 2003.
- Römer K., Mattern F., "The Design Space of Wireless Sensor Networks", IEEE Wireless Communications, Dec. 2004,
- H. Abelson et al. Amorphous Computing. CACM, 43(5):74-82, Marzec 2000,
- Hellwich O., Wiedemann Ch., "Multisensor data fusion for automated scene interpretation",
- Żółkowski C., Rafa J., Kelner J., „Lokalizacja źródeł fal radiowych na bazie sygnałów odbieranych przez mobilny odbiornik pomiarowy”, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Telekomunikacji, Wydz. Cybernetyki, Instytut Matematyki i Kryptologii,
- Cook D. J., Das S. K., „Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications”, Wiley, 2004,
- Rahimi A., Dunagan B., Darrell T., „Tracking people with a sparse network of bearing sensors“, MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory,

## Sprawozdanie dla SD CRUISE, wyciąg z raportu.

Project n°:	IST-027738
Project full title:	<u>C</u> reating <u>U</u> biquitous <u>I</u> ntelligent <u>S</u> ensing <u>E</u> nvironments
Project Acronym:	CRUISE
Milestone n°:	D240.2
Title of the deliverable:	Contributions to the state of the art in Wireless Sensor Transmission

Contractual Date of Delivery to the CEC:	M23
Actual Date of Delivery to the CEC:	
Editor(s):	
Authors(s):	
Work package contributing to the deliverable:	WP240
Est. person months:	
Dissemination level:	Public
Nature:	Report
Version:	2.0
Total number of pages:	

**EM Environment Recognition**

The NIT team conducted research (within the confines of NoE CRUISE) on EM environment recognition. The main attention is paid to recognition of radiating sources location with use of correlation function analysis. This method base on correlation of signals which come form radiating source and are received in different probes.

When the definition of autocorrelation and skew correlation had been arising, there also appeared conception of so called noise radar. Its practical applications were limited by insufficient precision of calculations in reasonable time. Nowadays, there is a lot of applications of systems which base on signal correlation. The most famous is Very Long Baseline Iterferometry (VLBI) method which is used in radio astronomy. VLBI systems apply long-lasting and complex calculations to obtain high accuracy and consequently make possible to observe and research remote places in space. Thanks to them pulsars and quasars were discovered.

On can observe today a big interest in correlation based methods in radar techniques. This is because of the use of fast computers which are able to calculate correlation factors in quasi-real time. This causes the development of classical radars and so called multi-radars.

The definition of autocorrelation function results in searching for an operation in time domain analogous to determining spectral power density in frequency domain.

This is a basis to define correlation function as an inverse Fourier transform of a signal spectral power density:

$$R_f(\tau) = F^{-1}\{S_f(\omega)\}$$

that could be transformed to:

$$R_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)f(t+\tau)dt$$

Correlation analysis helps to determine correlated components of signals received by the probes. Mutual time delay of correlation function dominant values allow to determine location of radiating sources and scattering objects. The structure of correlated signals allow to recognize sources and scattering objects features. This property is used to identifying for example flying objects by wideband radars.

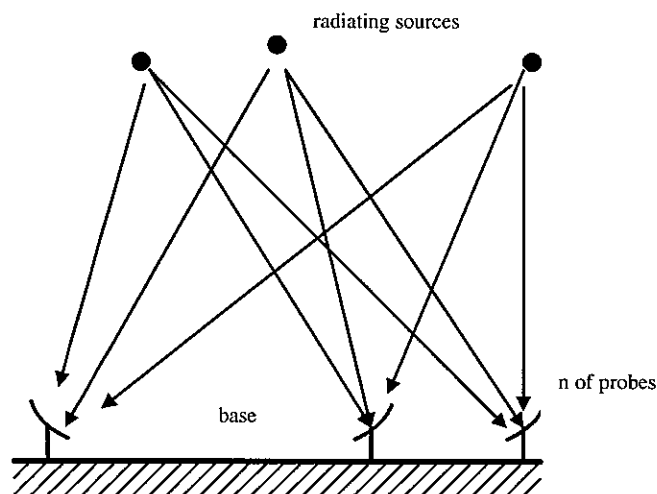


Figure 1 – Structure of tested system

Figure 1 shows hypothetical structure of system tested in NIT. System is formed by base which consists of sensors. Each sensor has an antenna. Radiating patterns of antennas from all sensors cover area which contains radiating sources. Signals from sources are received by probes. There are signals which arrive to probes direct, signals reflected and scattered on terrain obstacles, uncorrelated signals and interference. These signals are analyzed with use of correlation methods. If there is more probes than 2, the number of determined correlation functions is equal to number of combination of all sensors. In the next stage, determined correlation functions are analyzed and their local maximums are studied. This methodology leads to identification of radiating sources location.

Elongated time of measurements, larger number of results and adequately longer time of correlation influences on increasing accuracy of determined sources location.

### Results, equations, calculations

Location of each object is determined by its coordinates. In the Cartesian coordinate system one can identify:

radiating sources – transmitters (Z). Their parameters: coordinates, central frequency, bandwidth, power level, amplitude and phase radiating pattern,

reflecting objects ( $R_n$ ). Their parameters: reflection coefficients (complex scattering pattern),

sources of noise and interference ( $N_n$ ).

Our simulations were made under assumption that there is only one radiating source, three scattering objects and two probes which receive signals in given frequency band from two ways: from direct way and from reflecting object (reflected way) (Figure 2).

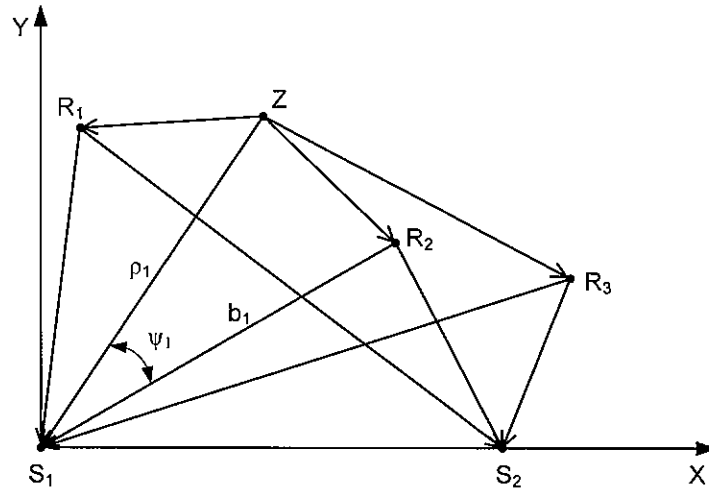


Figure 2– Hypothetical configuration of simulated system

The autocorrelation function of the signal received by  $n$ -th probe will have local maximums which comply with every received correlated signal. Maximums are situated in places corresponding to delays of scattered signals.

Figure 3 Figure shows the correlation function for probe  $S_1$  from the simulated system.

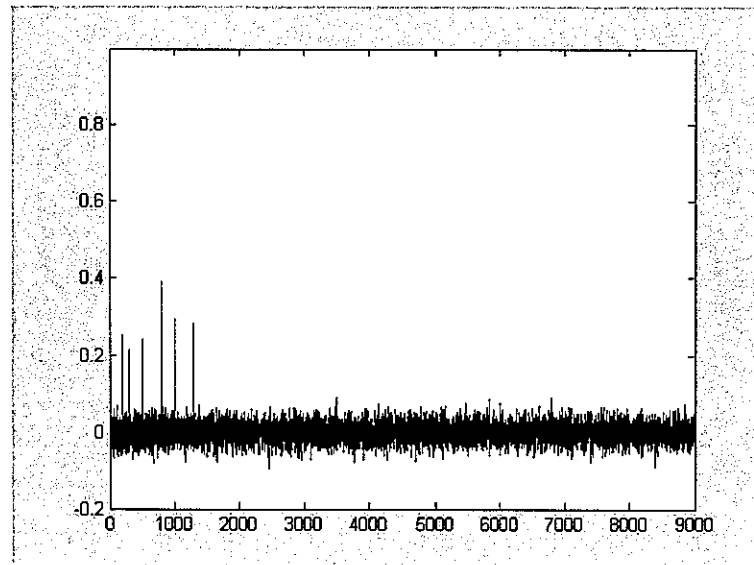


Figure 3 – Correlation function for probe  $S_1$ .

Analysis of delays for each ray, allow to determine lines intersecting in place of radiating source location.

The equation allowing to determine the source location for a system consisting of one radiating source and two receiving probes has form:

$$\rho = \frac{a^2 - \delta^2}{2(\delta + a \cos \varphi)}$$

where

$\delta = c\tau$  - path difference between source and probe  $S_1$ , and source and probe  $S_2$

$c$  – speed of light

$a$  – length of the base (length between probe  $S_1$  and  $S_2$ )

$\tau$  – delay of signal received by probe  $S_2$  relative to signal received by probe  $S_1$

The range of permitted values for angle  $\varphi$  is given by relationship:

$$-\left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\delta}{a}\right) < \varphi < \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\delta}{a}$$

Table 1 – Parameters for correlation function from Figure 3

Time of crucial correlation appearance	Value of correlation coefficient	Interpretation
201	0.25041	Z1R1 - Z1R2
301	0.21097	Z1R2 - Z1R3
501	0.2417	Z1R1 - Z1R3
801	0.39058	Z1 - Z1R1
1001	0.29439	Z1 - Z1R2
1301	0.2825	Z1 - Z1R3

The calculations from correlation function don't give unique location of source. This problem is solved with use of autocorrelation function of given probe and scattering object analysis. Procedure for autocorrelation function analysis is similar to correlation function analysis.

The result form correlation function analysis and autocorrelation function analysis is illustrated on Figure 4 and Figure 5.



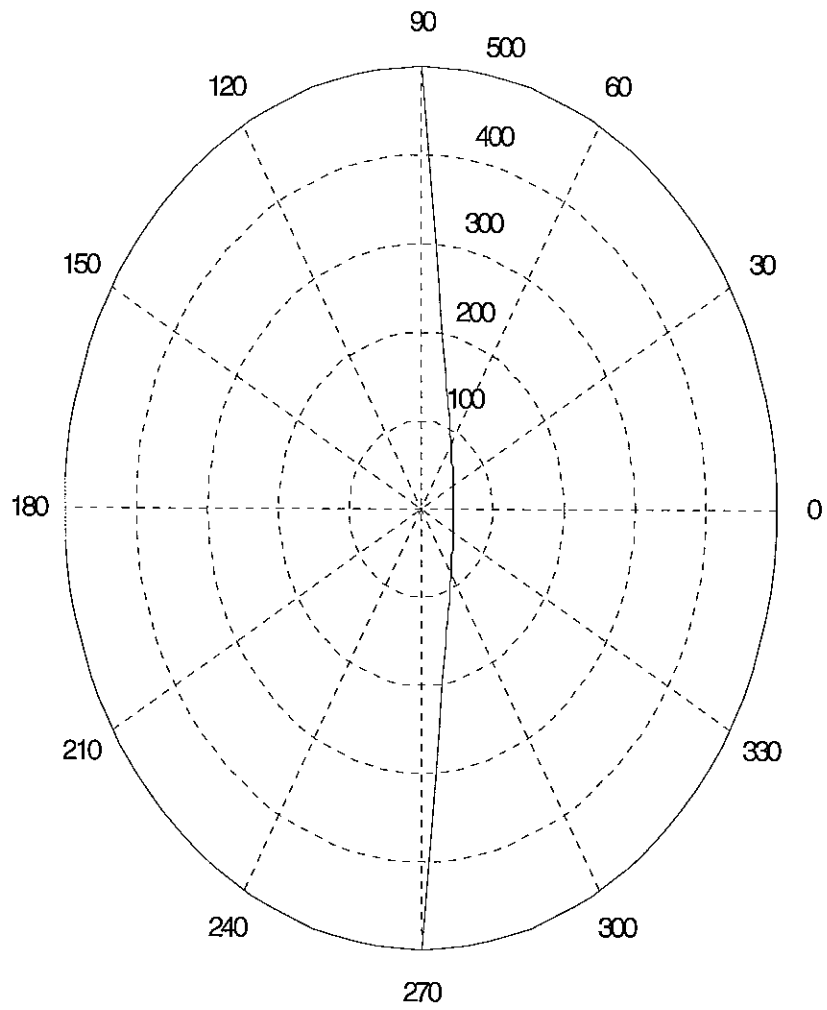


Figure 4 – Geometric places of radiating source hypothetical location calculated from correlation function analysis

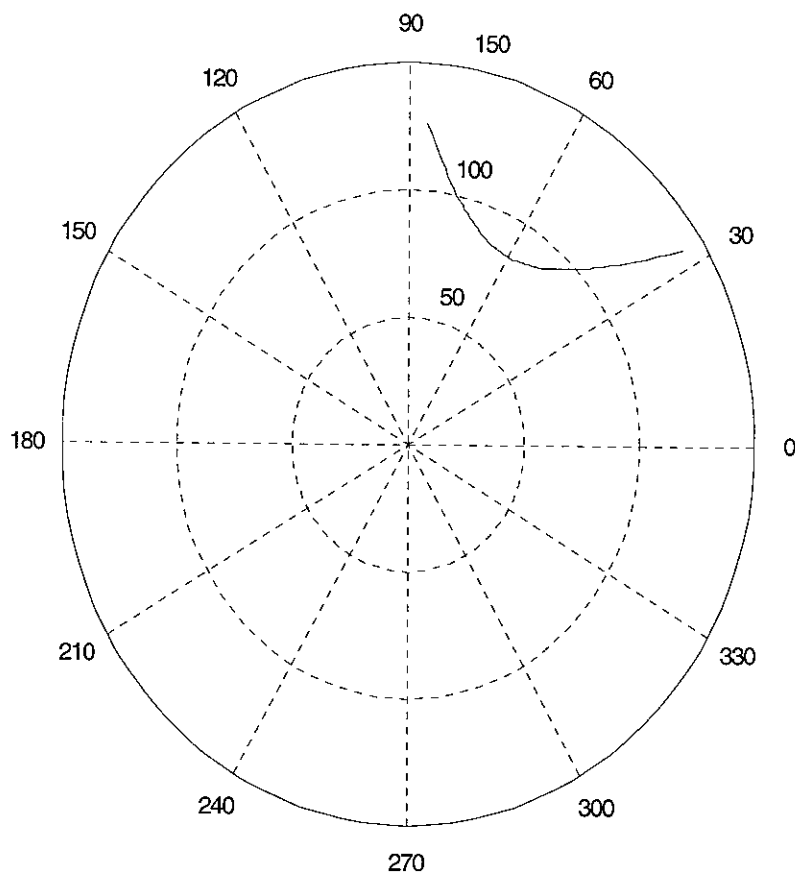


Figure 5 – Geometric places of radiating source hypothetical location calculated from autocorrelation function analysis.

If the system contains more sensors and radiating sources it's necessary to perform suitably more calculations. If calculations are performed for all combinations, the accuracy of results achieves maximum value.

### Summary

The method introduced here could be used in smart antennas technology. At present smart antennas are tuned mainly by determining direction of radiating pattern in cases, where criterion is quality of already known signal. This means that received signal is already known and optimization is made by improving quality of received signal. In cases where the solutions contain local maximums, there is no sure that chosen direction is correct.

Automatic tuning of radiating pattern direction and width is possible on condition that location of radiating sources and scattering objects is known. Objects can change their positions, so the calculations should be performed in real time. This cause that efficient algorithms are needed.

Another way is preprocessing data in sensors (eg. calculating correlation function) and getting results only if necessary. This approach cause sensor network is less loaded

Kamil Wrzosek  
Maciej Odzinkowski  
Jacek Jarkowski

Instytut Łączności  
w Warszawie

# **Rozpoznawanie środowiska EM w sieciach sensorowych w ramach sieci doskonałości CRUISE**

Tematyka artykułu dotyczy realizowanej w 6PR sieci doskonałości CRUISE. W pracy tej przedstawiono zakres prac prowadzonych w ramach sieci CRUISE, a zwłaszcza skupiono się na opisanu zadań projektowych prowadzonych w Instytucie Łączności. Skupiono większą uwagę na omówieniu dotychczasowych prac zespołu IŁ dotyczących metod rozpoznawania źródeł promieniowania elektromagnetycznego oraz przedstawiono przykładowe wyniki prac. Na koniec omówiono krótko perspektywy rozwoju i dalszych prac badawczych dotyczących sieci sensorowych.

## **1. Wprowadzenie**

Istotą sieci doskonałości (ang. Network of Excellence - NoE) jest zbieranie, wymiana i rozpowszechnianie informacji, doświadczeń i wiedzy dotyczącej tematyki podejmowanej przez ową sieć doskonałości.

CRUISE (CReating Ubiquitous Intelligent Sensing Environments) jest siecią doskonałości skupiającą środowiska akademickie i badawcze zajmujące się planowaniem i koordynacją prac dotyczących sensorowych sieci bezprzewodowych w Europie.

Uczestniczą w niej zarówno ośrodki akademickie, badawcze jak i inne, mające osiągnięcia w dziedzinie sieci bezprzewodowych. Całe konsorcjum CRUISE liczy w sumie 32 partnerów. Koordynacja działań sieci doskonałości CRUISE należy do Uniwersytetu w Alborg w Danii. Jest to projekt realizowany w ramach 6PR [1].

Sieć CRUISE, jako sieć otwarta, przyniesie społeczeństwu europejskiemu korzyści związane z wykorzystaniem sieci sensorowych i pomoże zlikwidować obecny brak spójności działań różnych środowisk naukowych i badawczych.

Doświadczenia i wiedza zdobyte w trakcie realizacji różnych projektów pozwolą na stworzenie platformy współpracy zdolnej do wspólnych działań zmierzających do stworzenia publicznie dostępnej bazy wiedzy „State-of-the-Art”.

W odróżnieniu od wielu obecnie prowadzonych prac badawczych w dziedzinie sieci sensorowych, CRUISE skupia się na zagadnieniach istotnych w rozwiązaniu problemów teoretycznych i technicznych zastosowań.

Istnieje wiele możliwości wzbogacających osiągnięcia w dziedzinie sieci sensorowych. Konsorcjum CRUISE zwróci się do wszystkich uczestników prac w tej dziedzinie, określi korzyści zarówno krótkoterminowe, jak i długotrwałe oraz przedstawi plany i kierunki działań. W otwartej dyskusji zostaną poruszone takie kwestie, jak normalizacja, międzynarodowa współpraca i integracja działań oraz własność intelektualna. CRUISE współpracować będzie z przemysłem oraz weźmie pod uwagę wszystkie istniejące i przyszłe europejskie inicjatywy badawcze. Wyniki prowadzonych prac będą udostępniane przez

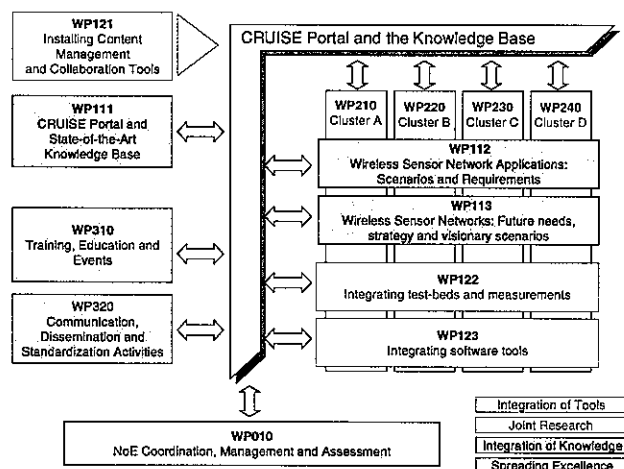
konsorcjum. Członkowie konsorcjum CRUISE będą koordynować prace badawcze zarówno w ramach konsorcjum, jak i poza nim. Dzięki temu mogą zostać wyodrębnione zagadnienia istotne, lecz nie ujęte w sposób wystarczający w prowadzonych obecnie pracach. W celu zwiększenia sprawności w planowaniu badań naukowych i wzajemnych powiązań pomiędzy partnerami konsorcjum będą stosowane te same narzędzia i przyjęta wspólna metodologia. Szczególna uwaga będzie także zwrócona na potrzebę działań szkoleniowych, związanych z zarządzaniem wiedzą, współpracą i wzajemną wymianą informacji.

## 2. Zakres prac prowadzonych w ramach sieci CRUISE

Prace w ramach sieci CRUISE zostały podzielane na zadania tzw. workpackages [2]:

Zadania, w których uczestniczy zespół Instytutu Łączności to:

- WP111: State-of-the-Art knowledge base
- WP122: Platforms, test beds measurements
- WP123: Software tools for modeling, design and simulation
- WP210: Joint research activities in Sensor Network Architecture and Topology Control (Cluster A)
- WP240: Joint research activities in transmission (Cluster D)
- WP310: Training, education and events
- WP320: Communications, dissemination and standardization activities



Rys. 9 – Struktura zadań (workpackages) w sieci doskonałości CRUISE [2]

Skupiają się one głównie na opracowaniu zagadnień związanych z gromadzeniem informacji w sieciach sensorowych oraz rozpoznawaniem środowiska elektromagnetycznego w oparciu o analizę funkcji korelacji.

Ponadto, planowane jest stworzenie platformy e-learningowej oraz określenie wspólnego planu studiów doktoranckich dla tematyki sieci sensorowych. Dzięki tym działaniom możliwa będzie organizacja szkół letnich i zimowych, krótkich kursów, szkoleń i warsztatów, a także wymiana studentów, wykładowców i badaczy oraz organizacja wydarzeń wewnętrznych.

## 3. Prace w zakresie rozpoznawania środowiska EM

W ramach sieci doskonałości CRUISE zespół Instytutu Łączności prowadzi prace polegające na rozpoznawaniu środowiska EM, a w szczególności na wykrywaniu źródeł promieniowania i ich rozmieszczenia, na podstawie analizy funkcji korelacji. Metoda ta polega na badaniu korelacji pomiędzy sygnałami odbieranymi przez dwie lub więcej sond pomiarowych.

Już w czasach, gdy powstały definicje autokorelacji i korelacji skrośnej, pojawiła się koncepcja tak zwanego radaru szumowego. Praktyczne zastosowania jednak były ograniczone ze względu na możliwą do osiągnięcia dokładność w korelatorach lub ze względu na czas, w którym zadowalającą dokładność można było osiągnąć. Jest wiele realizacji systemów opartych na korelacji sygnałów, z których najbardziej znana jest metoda VLBI (Very Large Base Interferometry) stosowana w radioastronomii. W systemach LBSI dzięki długotrwałym obliczeniom przeprowadzanym na komputerach dużej mocy osiąga się dokładności

pozwalające na obserwacje odległych miejsc we Wszechświecie. Dzięki tym systemom odkryto kwazary i pulsary i prowadzi się ich badania.

Obecnie obserwuje się duże zainteresowanie metodami korelacyjnymi w technice radarowej dzięki możliwości zastosowania szybkich komputerów do obliczania współczynników korelacji w czasie quasi rzeczywistym. Dzięki tym zastosowaniom komputerów, rozwój technologii radarowej poszedł w kierunkach ulepszania radarów klasycznych, ale też w kierunku rozwoju tzw. multiradarów.

Definicja funkcji autokorelacji oparta jest na poszukiwaniu operacji w dziedzinie czasu analogicznej do określenia widmowej gęstości mocy w dziedzinie częstotliwości.

Na tej podstawie, definicję funkcji autokorelacji formułuje się jako odwrotną transformatę Fouriera widmowej gęstości mocy sygnału [3]:

$$R_f(\tau) = F^{-1}\{S_f(\omega)\} \quad (1)$$

co prowadzi do wzoru w postaci jawnej:

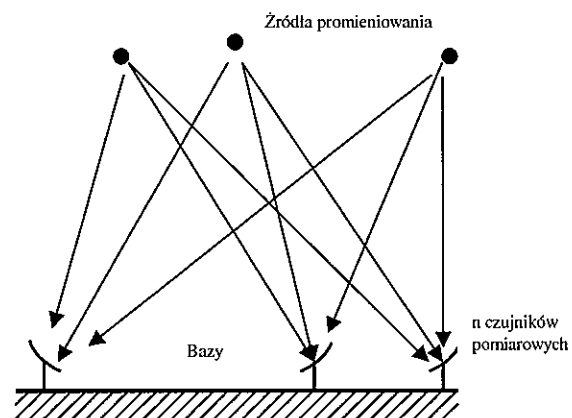
$$R_f(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)f(t+\tau)dt \quad (2)$$

W wielu pozycjach literatury podstawowej przytoczone są i wyjaśnione powyższe definicje funkcji autokorelacji i jej własności.

Analiza korelacyjna pozwala na wyznaczenie skorelowanych składników odbieranego przez sondy widma. Wzajemne opóźnienie czasowe wartości dominujących funkcji korelacji pozwala na określenie położenia źródeł promieniowania elektromagnetycznego i ewentualnie punktów rozpraszających. Struktura skorelowanych sygnałów pozwala na rozpoznawanie cech źródeł i obiektów rozpraszających. Ta właściwość jest wykorzystywana w radarach szerokopasmowych do identyfikacji między innymi obiektów latających „swój-obcy” (samolotów).

Na Rys. 2 została przedstawiona przykładowa struktura systemu.

System tworzy tzw. baza, na którą składają się czujniki pomiarowe. Charakterystyki anten czujników obejmują przestrzeń, w której znajdują się źródła promieniowania. Do czujników docierają sygnały pochodzące od źródeł promieniowania, jak również sygnały odbite i rozproszone na przeszkodach terenowych oraz sygnały o charakterze szumowym nieskorelowanym i zakłócenia. Tak otrzymane sygnały poddawane są obróbce korelacyjnej. Dla każdej pary czujników powstaje jedna funkcja



Rys. 10 – Przykładowa struktura systemu

korelacji. W przypadku większej niż 2 liczby czujników, liczba otrzymanych funkcji korelacji jest równa wartości kombinacji liczby czujników. W kolejnym etapie, otrzymane funkcje korelacji są poddawane analizie i badane są ich lokalne maksima. Taka metodologia prowadzi do identyfikacji rozmieszczenia źródeł promieniowania. Wydłużony czas pomiarów, większa liczba wyników jak i odpowiednio dłuższy czas korelacji sprzyja podwyższeniu dokładności wyznaczania położenia obiektów.

#### 4. Wyniki, wzory, obliczenia

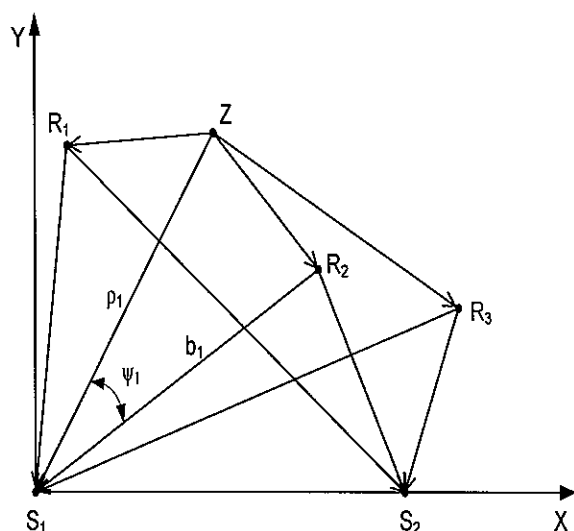
Położenie każdego obiektu opisane jest za pomocą współrzędnych. W układzie współrzędnych prostokątnych rozmieszczone są:

- źródła promieniowania – nadajniki (Z). Parametrami tych źródeł są współrzędne, częstotliwości środkowe, szerokość zajmowanego pasma, poziom mocy, charakterystyka promieniowania – amplitudowa i fazowa, itp.
- obiekty odbijające ( $R_n$ ). Parametrami tych obiektów są współczynniki odbicia (zespolona charakterystyka kierunkowa rozpraszania).
- źródła szumów i zakłóceń ( $N_n$ ).

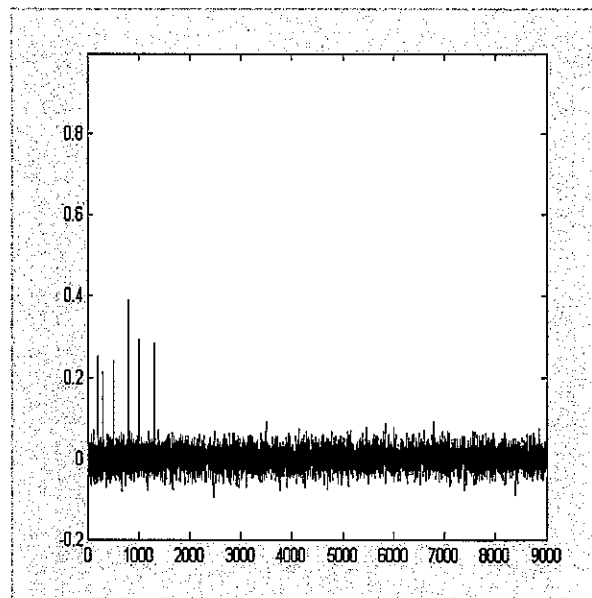
Założono, że system składa się z jednego źródła promieniowania EM, trzech obiektów rozpraszających oraz dwóch sond odbierających sygnały w zadanym paśmie częstotliwości za pośrednictwem dwóch promieni: bezpośredniego i odbitego w każdej z sond. Przykładową konfigurację systemu przedstawiono na Rys. 3.

Funkcja autokorelacji sygnału odbieranego przez  $n$ -tą sondę posiadać będzie lokalne maksima odpowiadające każdemu z odbieranych skorelowanych sygnałów w punktach odpowiadających opóźnieniom sygnałów rozpraszonych.

Dla konfiguracji systemu jak na Rys. 3, funkcja korelacji została przedstawiona na Rys. 4.



Rys. 11 – Przykładowa konfiguracja geometryczna systemu



Rys. 12 – Funkcja korelacji dla sondy  $S_1$

Na podstawie analizy opóźnień poszczególnych promieni wyznacza się linie miejsc geometrycznych położenia źródła Rys. 5.

Tab. 1 – Parametry funkcji korelacji z Rys. 4

Czas wystąpienia istotnej korelacji	Wartość współczynnika korelacji	Interpretacja: sygnałów względem siebie
201	0.25041	Z1R1 - Z1R2
301	0.21097	Z1R2 - Z1R3
501	0.2417	Z1R1 - Z1R3
801	0.39058	Z1 - Z1R1
1001	0.29439	Z1 - Z1R2

Czas wystąpienia istotnej korelacji	Wartość współczynnika korelacji	Interpretacja: sygnałów względem siebie
1301	0.2825	Z1 - Z1R3

Dla układu jednego źródła sygnału i dwóch sond odbierających funkcja, za pomocą której można określić miejsce położenia źródeł ma postać:

$$\rho = \frac{a^2 - \delta^2}{2(\delta + a \cos \varphi)} \quad (3)$$

gdzie

$\delta = c\tau$  - różnica dróg między źródłem sygnału, a sondą  $S_1$  oraz sondą  $S_2$

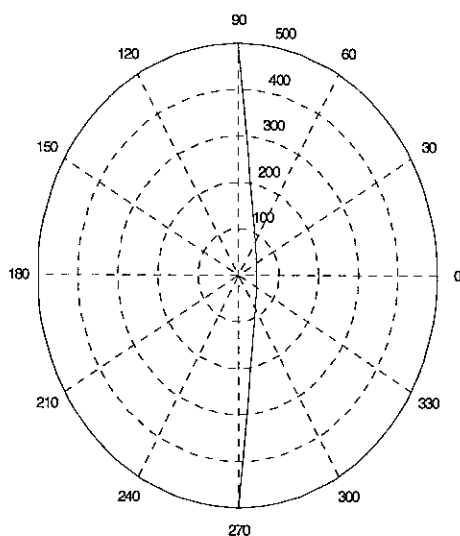
$a$  - długość bazy, czyli odległość między sondami

$\tau$  - opóźnienie sygnału odbieranego przez sondę  $S_2$  względem sygnału odbieranego przez sondę  $S_1$

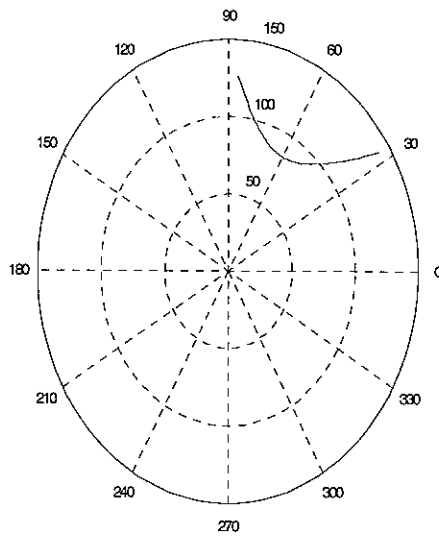
Zakres dozwolonych zmian kąta  $\varphi$  określa zależność:

$$-\left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\delta}{a}\right) < \varphi < \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\delta}{a} \quad (4)$$

Z danych funkcji korelacji dwóch sond nie można jednoznacznie określić położenia źródła promieniującego, dlatego w tym celu korzysta się z analizy funkcji autokorelacji wybranej sondy i obiektów rozpraszających. Postępowanie w tym przypadku jest podobne. Wynik działania tej procedury pokazuje Rys. 6. Nałożenie na siebie wykresów z Rys. 5 i Rys. 6 pozwala wyznaczyć położenie obiektu promieniującego na przecięciu krzywych.



Rys. 13 - Miejsca geometryczne położenia źródeł promieniowania dla przypadku jednego źródła i dwóch baz we właściwej skali dostosowanej do zasięgu sond.



Rys. 14 - Miejsce geometryczne możliwego położenia źródła wyznaczonego w oparciu o analizę obiektów rozpraszających.

W przypadku większej liczby sond i większej liczby źródeł należy dokonać odpowiednio więcej takich obliczeń, chociaż nie wszystkich kombinacji. Pełna liczba obliczeń pozwala na wyznaczenie położenia źródeł z najwyższą dokładnością.

## 5. Podsumowanie

Zaprezentowana metoda określania położenia źródeł sygnału i obiektów rozpraszających może znaleźć zastosowanie w technice antenowej anten inteligentnych. Obecne metody dostrajania anten inteligentnych polegają w głównej mierze na wyznaczaniu kierunku charakterystyki promieniowania, gdzie kryterium jest jakość odbieranego już sygnału. Tak więc, znany jest już odbierany sygnał, a optymalizacja polega na maksymalizacji jakości tego sygnału. W przypadku, gdy rozwiązania mają lokalne maksima, nie ma pewności czy wybrany kierunek jest najlepszy.

Automatyczne przestrajanie kierunku i szerokości charakterystyki promieniowania możliwe jest pod warunkiem dynamicznej znajomości rozmieszczenia źródeł sygnałów użytecznych i zakłócających. Dlatego też, ważnym aspektem jest, aby obliczenia były wykonywane w czasie rzeczywistym. W związku z tym, istnieje duża potrzeba opracowania wydajnych algorytmów. Innym podejściem jest zastosowanie wstępnej obróbki danych (np. obliczanie funkcji korelacji) w sondach oraz pobieranie wyników tylko wtedy, gdy są potrzebne. W ten sposób unika się przesyłania dużych informacji i obciążania sieci sensorowej.

Wyniki niniejszej pracy mają na celu przybliżyć problematykę rozpoznawania środowiska EM w sieciach sensorowych i zbadać możliwość zastosowań omawianych metod w praktyce.

### Literatura

- [1] Jarkowski J., Odzinkowski M., *CRUISE: Creating Ubiquitous Intelligent Sensing Environments – Sieć Doskonałości w 6PR, KKRRiT 2006, Poznań, czerwiec 2006.*
- [2] CRUISE, *Network of Excellence proposal IST Call 4, Sixth Framework Programme, March 2005.*
- [3] Stremler G Ferrel, *Introduction to Communication System*, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.



**FP7-ICT-2007-3: Pre-proposal check form**

First Name **Ralf** Surname **Lehnert**, Gender **M**  
 Organisation name **Technische Universität Dresden**  
 Country **Germany**

Reply Fax **+49 351 463 39742** Reply Fax (alternative)+49 351 463 37163

E-mail **christin.jung@tu-dresden.de** Telephone number **+49 351 463 39629**

Prop osal acronym	CINEM				
Prop osal full name	Cognitive Information Networks for Environment Monitoring				
ICT Call 3 Objective addressed: (as named in the call fiche)	ICT-2007.2.1: Cognitive Systems, Interaction, Robotics Target a				
Instrument type (please indicate one only)	SA	IP	STREP	NoE	CA
Approximate total cost (optional information)	€				

Summary of your proposal's objectives	<p>The CINEM project builds on the FP6 CRUISE Network of Excellence and aims at designing and demonstrating a cognitive system of wireless sensor and actuator nodes to support stakeholders interested in monitoring, exploring and protecting natural environments (eco-systems) such as forests, or rivers. These eco-systems dynamically change their state, which may be expressed by geo-temporal attributes describing the weather (temperature, humidity) and other natural phenomena (movements, erosion), the activity of people (trespassers, tourists) and animals moving in the area, and emergency and management teams. The proposed system will use different types of nodes with wireless communication, sensing, data storing, data processing. It will have reasoning capability to learn the behaviour of the eco-system, by performing data collection, aggregation and fusion, (both at a system-wide and at the sensor devices levels) and to associate each state with a set of alerts or alarms, i.e., actuation events.</p> <p>For this purpose the system will combine nodes statically deployed within the environment with others having the capability to move (also fly).</p>
---	--

Mobile nodes will reach specific positions and perform concrete tasks reacting upon actuation events generated either within the system, or provided by the external stakeholders (in charge of environment monitoring and protection). A communication network will be established so that static devices will be in contact with the mobile nodes, so that application or management information is exchanged. Both kinds of nodes can be specialized in data collection, fusion, data storage, or large scale processing. The communication network will include gateways offering the possibility to connect to other types of networks (e.g. GSM, UMTS), if necessary. In the same time these gateways will support application dependent services improving the intelligence of the network. Proposed system will autonomously and flexibly organize for collection and fusion of geo-temporal information, adapting to the eco-system state. The cognitive capability of the system will also include adaptation of the data fusion process to dynamically and situationally changing requirements of the monitoring and protection tasks.

The cognitive system is expected to extract and analyse relevant information from the environment and to predict its behaviour. Data will be acquired in real-time (with respect to the application or the monitored processes timings requirements), and the environmental risks will be inferred from them and reported to persons. The proposed research will advance the state-of-the-art with respect to cognitive hybrid adaptive data fusion systems including sensor nodes, gateways, data centre. Self-learning and self-adapting are considered as a key to make sensors more autonomous and communication protocols more effective.

Collected data will be efficiently modelled, stored and used to improve the knowledge about the states of eco-system, and to generate and react on different alert and alarm situations. The system will have capability to initiate self-healing actions as measures for increasing robustness and dealing with scalability issues.

In order to appropriately define the system interfaces towards the external stakeholders, a preliminary task will embrace the collection and systemization of relevant expertise about the requirements from the monitoring and protection processes currently enforced and implemented by traditional means. For this purpose we plan a focused event with the legislators and experts on forest (fire?) and flood monitoring, whose expertise will contribute to data gathering activity.

The project objectives will be reached through the implementation of tasks focusing on requirements (WP2), the elaboration of the system architecture (WP3), the work on the data fusion and cognition concepts (WP4), evaluation and design of the communication network based on the existing SoA platforms (WP5), benchmarking of the system performance, including a proof-of-concept by modelling and simulation methods (WP6), a (small-scale) demonstrator (WP7), and dissemination activities (WP8). Additionally, the project will produce a set of exploitable results, including the simulation environment tools, benchmarking tools, a data-base model and collected data.

The project is motivated and driven by various potential applications, including early warning for critical situations (flood and fire detection). The cognitive capabilities of the system will be demonstrated by applying it to



## Wykaz literatury z dziedziny sensoringu

V. Rodoplu and T. H. Meng, "Bits-per-Joule Capacity of Energy-Limited Wireless Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 6, No. 3, pp. 857-865, March 2007

F. Ordóñez and B. Krishnamachari, "Optimal Information Extraction in Energy-Limited Wireless Sensor Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 22, No. 6, pp. 1121-1129, August 2004

P. Gupta and P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 46, No. 2, pp. 388-404, March 2000

P. Gupta and P. R. Kumar, "Towards an Information Theory of Large Networks: An Achievable Rate Region", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 49, No. 8, pp. 1877-1894, August 2003

S. R. Kulkarni and P. Viswanath, "A Deterministic Approach to Throughput Scaling in Wireless Networks", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 50, No. 6, pp. 1041-1049, June 2004

A. V. Kini, N. Singhal and S. Weber, "Broadcast Capacity of a WSN Employing Power Control and Limited Range Dissemination", 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), pp. 238-243, 14-16 March 2007, Baltimore (USA)

J. Suhonen, M. Kohvakka, M. Kuorilehto, M. Hannikainen and T. D. Hamalainen, "Cost-Aware Capacity Optimization in Dynamic Multi-Hop WSNs", Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), pp. 1-6, 16-20 April 2007, Nice (France)

C. Chen and J. Ma, "Mobile Enabled Large Scale Wireless Sensor Networks", 8th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Vol. 1, pp. 333-338, 20-22 February 2006

C. Chen and J. Ma, "MEMOSEN: Multi-Radio Enabled Mobile Wireless Sensor Network", 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), Vol. 2, 18-20 April 2006

G. Bravos, A. G. Kanatas, "Energy Consumption and Trade-Offs on Wireless Sensor Networks", 16th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Vol. 2, pp. 1279-1283, 11-14 September 2005

M. J. Neely and E. Modiano, "Capacity and Delay Tradeoffs for Ad-Hoc Mobile Networks", 1st International Conference on Broadband Networks (BroadNets), pp. 428-438, 2004

G. Sharma, R. Mazumdar and N. Shroff, "Delay and Capacity Trade-Offs in Mobile Ad Hoc Networks: A Global Perspective", IEEE Transactions on Networking

S. Rhee and S. Liu, "Techniques for Addressing Critical Requirements of Production-Grade Wireless Sensor Networks", Sensors for Industry Conference, pp. 84-87, February 2005, Houston (USA).

F. Hu, X. Cao and C. May, "Optimized Scheduling for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks", International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC), Vol. 2, pp. 557-561, 4-6 April 2005

- S. Zou, I. Nikolaidis and J. J. Harms, "Extending Sensor Network Lifetime via First Hop Data Aggregation", 25th IEEE International Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC), 10-12 April 2006
- M. Lee and V. W. S. Wong, "LPT for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Vol. 5, 28 November-2 December 2005
- F. Hu, C. May and X. Cao, "Data Aggregation in Distributed Sensor Networks: Towards An Adaptive Timing Control", 3rd International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG), pp. 256-261, 10-12 April 2006
- E. Shakshuki, S. Hussain, A. R. Matin and A. W. Matin, "P2P Multi-agent Data Transfer and Aggregation in Wireless Sensor Network", IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), pp. 645-649, October 2006, Vancouver (Canada)
- H. Luo, Q. Li and W. Guo, "RDA: Reliable Data Aggregation Protocol for WSNs", International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), pp. 1-4, 22-24 September 2006, Wuhan
- O. Younis, M. Krunz and S. Ramasubramanian, "Node Clustering in Wireless Sensor Networks: Recent Developments and Deployment Challenges", IEEE Network, Vol. 20, No. 3, pp. 20-25, May-June 2006
- P. Ji, C. Wu, Y. Zhang and Z. Jia, "Research of Directed Spanning Tree Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp. 1406-1410, 5-8 August 2007, Harbin (China)
- C. Bekara and M. Laurent-Maknavicius, "A Secure Aggregation Protocol for Cluster-Based Wireless Sensor Networks With no Requirements for Trusted Aggregator Nodes", International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST), pp. 267-276, 12-14 September 2007, Cardiff (UK)
- X. Zhang and W. Xu, "Multi-Chain Multi-Leader Based Data Aggregation and the Evaluation Metric QoDA", IEEE International Workshop on Service-Oriented System Engineering (SOSE), pp. 170-174, 20-21 October 2005
- Y. Zhu, R. Vedantham, S. J. Park and R. Sivakumar, "A Scalable Correlation Aware Aggregation Strategy for Wireless Sensor Networks", 1st International Conference on Wireless Internet, pp. 122-129, 10-14 July 2005
- Y. Jin, L. Wang, Y. Kim and X. Yang, "Lifetime Analysis of Data Aggregation Tree with Unreliable Sensor Node", 1st International Conference on Communications and Electronics (ICCE), pp. 153-157, 10-11 October 2006, Hanoi (Vietnam)
- S. Kumar, A. Arora and T. H. Lai, "On the Lifetime Analysis of Always-On Wireless Sensor Network Applications", IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, 7-10 November 2005.
- S. A. Munir, B. Ren, W. Jiao, B. Wang, D. Xie and J. Ma, "Mobile Wireless Sensor Network: Architecture and Enabling Technologies for Ubiquitous Computing", 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW), Vol. 2, pp. 113-120, 21-23 May 2007, Niagara Falls (Canada)
- E. Ekici, Y. Gu and D. Bozdog, "Mobility-Based Communication in Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 44, No. 7, pp. 56-62, July 2006
- A. Sobeih, J. C. Hou, L.-C. Kung, N. Li, H. Zhang, W.-P. Chen, H.-Y. Tyan and H. Lim, "J-Sim: a Simulation and Emulation Environment for Wireless Sensor Networks", IEEE Wireless Communications, Vol. 13, No. 4, pp. 104-119, August 2006

C. Chen and J. Ma, "Mobile Enabled Large Scale Wireless Sensor Networks", 8th International Conference Advanced Communication Technology (ICACT), Vol. 1, pp. 333-338, 20-22 February 2006

C. Chen and J. Ma, "MEMOSEN: Multi-Radio Enabled Mobile Wireless Sensor Network", 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), Vol. 2, 18-20 April 2006

P. Raviraj, H. Sharif, M. Hempel, S. Ci, H. H. Ali and J. A. Youn, "A Mobility Based Link Layer Approach for Mobile Wireless Sensor Networks", IEEE International Conference on Electro Information Technology, 22-25 May 2005

R. El-Marakby and M. Enugula, "Enhanced QoS for Real-time Multimedia Delivery over the Wireless Link using RFID Technology", IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, pp. 728-734, August 2006, Vancouver (Canada)

C. Chen and J. Ma, "Simulation Study of AODV Performance over IEEE 802.15.4 MAC in WSN with Mobile Sinks", 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW), Vol. 2, pp. 159-164, 21-23 May 2007, Niagara Falls (Canada)

Y. Zhang, W. Liu and Y. Fang, "Secure Localization in Wireless Sensor Networks", IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Vol. 5, pp. 3169-3175, 17-20 October 2005

J. Kong, J.-H. Cui, D. Wu and M. Gerla, "Building Underwater Ad-Hoc Networks and Sensor Networks for Large Scale Real-Time Aquatic Applications", IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Vol. 3, pp. 1535-1541, 17-20 October 2005

M. Grossglauser and D. N. C. Tse, "Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks", IEEE Transactions on Networking, Vol. 10, No. 4, pp. 477-486, August 2002.

D. Cassioli, M. Z. Win, and A. F. Molisch, "The ultrawide bandwidth indoor channel: From statistical model to simulations," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 20, no. 6, pp. 1247-1257, Aug. 2002.

M. Z. Win and R. A. Scholtr, "On the energy capture of ultrawide bandwidth signals in dense multipath environments," IEEE Commun. Lett., vol. 2, no. 9, pp. 245-247, Sept. 1998.

D. Porcino and W. Hirt, "Ultra-wideband radio technology: potential and challenges ahead," IEEE Commun. Mag., vol. 41, no. 7, pp. 66-74, Jul. 2003.

M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse radio: How it works," IEEE Commun. Lett., vol. 2, no. 2, pp. 36-38, Feb. 1998.

J. D. Choi and W. E. Stark, "Performance of ultra-wide band communications with suboptimal receivers in multipath channels," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 20, no. 9, pp. 1754-1766, Dec. 2002.

D. Ganesan, B. Krishnamachari, A. Woo, D. Culler, D. Estrin and S. Wicker, "An empirical Study of Epidemic Algorithms in Large Scale Multihop Wireless Networks". Intel Research, IRB-TR-02-003, Mar. 14, 2002.

David L. Mills, "Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol", Global States and Time in Distributed Systems. IEEE Computer Society Press, 1994.

J. Elson and K. Römer, "Wireless Sensor Networks: A New Regime for Time Synchronization", Proc. First Workshop on Hot Topics in Networks (HotNetsI). 28-29 Oct, 2002.

K. Römer, P. Blum, L. Meier, "Time Synchronization and Calibration in Wireless Sensor Networks", Ivan Stojmenovic (Ed.): Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures. John Wiley & Sons, ISBN 0-471-68472-4, pp. 199-237, Sept. 2005.

D. Cassioli, M. Z. Win, and A. F. Molisch, "The ultrawide bandwidth indoor channel: From statistical model to simulations," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 1247-1257, Aug. 2002.

A. F. Molisch, J. R. Foerster, and M. Pendergrass, "Channel models for ultrawideband personal area networks," *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 10, pp. 14-21, Dec. 2003

A. F. Molisch, "Ultrawideband propagation channels - theory, measurement, and models," (invited paper) *IEEE Trans. Vehicular Techn.*, special issue on UWB, in press, 2005.

Molisch, A.F.; Balakrishnan, K.; Cassioli, D.; Chia-Chin Chong; Emami, S.; Fort, A.; Karedal, J.; Kunisch, J.; Schantz, H.; Siwiak, K., "A comprehensive model for ultrawideband propagation channels", *Proc. of the Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM '05*.

S. U. H. Qureshi, "Adaptive equalization," *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, no. 9, pp. 1349-1387, 1985.

D. Falconer, S. L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 4, pp. 58-66, 2002.

D. Cassioli, M. Z. Win, and A. F. Molisch, "The ultra-wide bandwidth indoor channel: from statistical model to simulations," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 1247-1257, 2002

A. F. Molisch, Y. G. Li, Y.-P. Nakache, et al., "A low-cost timehopping impulse radio system for high data rate transmission," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2005, no. 3, pp. 397-412, 2005.

W. Namgoong, "A channelized digital ultrawideband receiver," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 3, pp. 502-510, 2003.

R. Harjani, J. Harvey, and R. Sainati, "Analog/RF physical layer issues for UWB systems," in *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on VLSI Design (VLSID '04)*, vol. 17, pp. 941-948, Mumbai, India, January 2004.

Morosi, S.; Bianchi, T., "Frequency domain detectors for ultra-wideband indoor communications", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Volume 5, Issue 10, Oct. 2006 Page(s):2654 - 2658.

M. G. D. Benedetto and G. Giancola, *Understanding Ultra Wide Band, Radio Fundamentals*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall Pearson Education, Inc., 2004.

S. Morosi, R. Fantacci, E. Del Re, and L. Goratti, "Performance of the bi-orthogonal modulation for ultra-wideband communications with multiple access interference," *Wireless Communications and Mobile Computing Journal*, Special Issue on Emerging Multiple Access Technologies, vol. 5, no. 1, pp. 5-14, Feb. 2005.

Morosi, S.; Marabissi, D.; Fiorina, J., "Higher Order Impulsive Signals for UWB Communications", 2006 IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications.

W. U. Bajwa, J.D. Haupt, A. M. Sayeed, R. D. Nowak, "Joint Source-Channel Communication for Distributed Estimation in Sensor Networks", *IEEE trans. on Information Theory*, Vol. 53 (10). Pp: 3629 - 3653, Oct 2007.

T.C Aysal.; K.E. Barner, "Decentralized Estimation Over Noisy Channels for Bandwidth-Constrained Sensor Networks", *Proc. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Vol 3, pp: III-929 - III-932, 15 - 20 April 2007.

Zhi-Quan Luo, "An Isotropic Universal Decentralized Estimation Scheme for a Bandwidth Constrained Ad Hoc Sensor Network", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 32 (4). Pp: 735 – 744, April 2007.

Mi-Kyung Oh; Xiaoli Ma; Giannakis, G.B.; Dong-Jo Park , "Cooperative synchronization and channel estimation in wireless sensor networks", Proc. IEEE Conference on Signals, Systems and Computers. Vol 1, pp: 238 – 242, 9 – 12 Nov. 2003.

Li. Xiaohua , "Blind channel estimation and equalization in wireless sensor networks based on correlations among sensors", IEEE trans. On Signal Processing, Vol 53 (4), pp: 1511 – 1519, April 2005.

M. Huang, S. Dey, "Dynamic Quantization for Multisensor Estimation Over Bandlimited Fading Channels", IEEE trans. On Signal Processing, Vol. 55 (9), pp: 4696 – 4702, Sept. 2007.

Darbari, F.; Stewart, R.W.; MaGregor, I.; Whyte, G.; Thayne, I., "Channel estimation for short range wireless sensor network," DSPEnabledRadio, 2005. The 2nd IEE/EURASIP Conference on (Ref. No. 2005/11086) , vol., no., pp. 10 pp.-, 19-20 Sept. 2005.

C. Ribeiro, A. Gameiro, "Direct time-domain channel impulse response estimation for OFDM-based systems," in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, Baltimore, USA, Oct. 2007.

C. Ribeiro, A. Gameiro, "Uplink time-domain MMSE channel estimation for MC-CDMA systems," in Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, Sept. 2007.

Carlos Ribeiro, M. Julia Garcia, Victor Jimenez, Atilio Gameiro, Ana Garcia Armada, "Uplink channel estimation for multi-user OFDM-based systems", in Proc. 4th COST 289 Workshop, Gothenburg, Sweden, April 2007.

Federal Communications Commission, FCC 03-289.

Gastpar, M.; "On Capacity Under Receive and Spatial Spectrum-Sharing Constraints", Information Theory, IEEE Transactions on, Volume 53, Issue 2, Feb. 2007, Page(s):471 – 487.

Zhang, Fan; Zhu, Guangxi; Kang, Xiaoyun; "Scalability of UWB Cognitive Radio Networks with Interference Constraint", WIRELESS AND MOBILE COMMUNICATIONS, 2006. ICWMC'06. INTERNATIONAL CONFERENCE ON, July 2006 Page(s):19 – 26.

Banerjee, Torsha; Ghosh, Chittabrata; Agrawal, Dharma P.; "Wireless Sensor based Dynamic Channel Selection in Cellular Communication by Cognitive Radio Approach",

Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2006. 1st International Conference on, 8-10 June 2006 Page(s):1 – 5.

Roosta, T.; Mishra, S.M.; Ghazizadeh, A.; "Robust Estimation and Detection in Ad Hoc and Sensor Networks", MOBILE ADHOC AND SENSOR SYSTEMS (MASS), 2006 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, Oct. 2006 Page(s):236 – 245.

Gao, S.; Qian, L.; Vaman, D. R.; Qu, Q.; "Energy Efficient Adaptive Modulation in Wireless Cognitive Radio Sensor Networks", Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on, 24-28 June 2007 Page(s):3980 – 3986.

Peng Qihang; Zeng Kun; Wang Jun; Li Shaoqian; "A Distributed Spectrum Sensing Scheme Based on Credibility and Evidence Theory in Cognitive Radio Context", Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on, Sept. 2006 Page(s):1 – 5.

Zhi Tian; Giannakis, G.B.; "Compressed Sensing for Wideband Cognitive Radios", Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007. IEEE International Conference on, Volume 4, 15-20 April 2007 Page(s):IV-1357 - IV-1360.



Pollin, Sofie; Ergen, Mustafa; Timmers, Michael; Dejonghe, Antoine; van der Perre, Liesbet; Catthoor, Francky; Moerman, Ingrid; Bahai, Ahmad; "Distributed cognitive coexistence of 802.15.4 with 802.11", Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2006. 1st International Conference on, 8-10 June 2006 Page(s):1 – 5.

Ghosh, C.; Agrawal, D. P.; "Cross Layer Performance Evaluation of a Software Defined Radio UWB Receiver using Turbo Decoding", Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2007. SECON '07. 4th Annual IEEE Communications Society Conference on, 18-21 June 2007 Page(s):639 – 646.

Granelli, F.; Honggang Zhang; "Cognitive ultra wide band radio: a research vision and its open challenges", Networking with Ultra Wide Band and Workshop on Ultra Wide Band for Sensor Networks, 2005. Networking with UWB 2005. 2nd International Workshop, 4-6 July 2005 Page(s):55 – 59.

Fabrizio Granelli, Honggang Zhang, Xiaofei Zhou; Stefano Maranò; "Research advances in cognitive ultra wide band radio and their application to sensor networks", Mobile Networks and Applications, Volume 11, Number 4, Springer, Aug. 2006, pp. 487-499, July 2006 Page(s):19 – 19.

"D2.1 Autonomic Communication Roadmap Outline", AUTONOMIC COMMUNICATION COORDINATION ACTION, IST-6475 ACCA, September, 2005.

Juhani Hirvonen, Mikko Sallinen, Hannu Maula and Marko Suojanen, "Sensor Networks Roadmap", 2007.

J.F.M. Gerrits and J.R. Farserotu, "Wavelet generation circuit for UWB impulse radio applications", Electronics Letters, 5th December 2002, Vol. 38, No. 25

IST-507102 My Personal Adaptive Global NET (MAGNET)

IST-507102 My Personal Adaptive Global NET and Beyond (MAGNET Beyond)

John Farserotu, "Applications in LDR PAN/BAN Optimised PN", IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), May 2006, Jacksonville, Fl.

R. Hahn, S. Wagner, A. Schmidz, H. Reichl, "Development of a planar micro fuel cell with thin film and micro patterning technologies", Journal of Power Sources 131, pp. 73-78, 2004.

Roy Want, Keith Farkas, Chandra Narayanaswami, "Energy harvesting and conservation", IEEE CS, pp. 1536-1268, 2005

Y.B. Jeon, R. Sood, J.H. Jeong, S.G. Kim, "MEMS power generator with transverse mode thin film PZT", Sensor and Actuators, 2005.

Warneke, B.A.; Scott, M.D.; Leibowitz, B.S.; Lixia Zhou; Bellew, C.L.; Chediak, J.A.; Kahn, J.M.; Boser, B.E.; Pister, K.S.J. "An autonomous 16 mm/sup 3/ solar-powered node for distributed wireless sensor networks", Proceedings of IEEE on Sensors, V2 , pp. 1510-1515, 12-14 June 2002.

Chee, Y.H.; Rabaey, J.; Niknejad, A.M., "A class A/B low power amplifier for wireless sensor networks", ISCAS, V4 , pp. 409-412 23-26 May 2004

Amirtharajah, R.; Chandrakasan, A.P., "A micropower programmable DSP using approximate signal processing based on distributed arithmetic", IEEE Journal of Solid-State Circuits , V39 #2, pp. 337 – 347, Feb. 2004

Scott, M.D.; Boser, B.E.; Pister, K.S.J., "An ultralow-energy ADC for Smart Dust", IEEE Journal of Solid-State Circuits, V38 #7 , pp. 1123 – 1129, July 2003.

Joseph Polastre, Robert Szewczyk Cory, Sharp, David Culler "The Mote Revolution:

Low Power Wireless Sensor Network Devices", Hot Chips 2004 : Aug 22-24, 2004.

W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. Proceedings of the IEEE Infocom, pages 1567–76, New York, NY, July 2002..

A. Bachir, Lifetime Extension of WSNs due to Optimized MAC and Routing, PhD Dissertation, INPG, Grenoble, 2007.

Carlos Pomalaza-Ráez “Wireless Ad Hoc & Sensor Networks”, Nordic Radio Symposium 2004 August 16 – 18, 2004, University of Oulu, Finland.