ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996

Seria: INFORMATYKA z. 31 Nr kol. 1348

Bartłomiej ZIELIŃSKI

WYBRANE ZAGADNIENIA BEZPRZEWODOWEJ TRANSMISJI DANYCH

Streszczenie. Podano przykłady zastosowań bezprzewodowej transmisji danych. Scharakteryzowano fale radiowe jako przykładowe medium transmisyjne. Opisano wybrane istniejące standardy protokołów transmisyjnych. Zaproponowano kierunek badań bezprzewodowej transmisji danych.

SELECTED PROBLEMS OF WIRELESS DATA TRANSMISSION

Summary. Application examples of wireless data transmission were given. Radio waves as an example of transmission medium were characterized. Chosen existing transmission protocols were described. Research directions of wireless data transmission were proposed.

DIE GEWÄHLTEN PROBLEME DER LEITUNGSLOSDATENSENDUNG

Zusammenfassung. Die Beispiele der Anwendungen der Leitungslosdatensendung wurden gegeben. Die Radiowelle als der Beispiel des Transmissionsmedium wurden charakterisiert. Die gewählten vorhandenen Standards der Sendungprotokoll wurden beschrieben. Die Richtung der Untersuchungen der Leitungslosdatensendung wurde vorschlägt.

1. Przyczyny stosowania transmisji bezprzewodowej

Postępująca komputeryzacja różnych instytucji, przedsiębiorstw i zakładów produkcyjnych pociąga za sobą konieczność łączenia komputerów w sieci komputerowe. Stosowane do tego celu tradycyjne rozwiązania, tzn. przewody elektryczne lub światłowody, charakteryzują się korzystnymi parametrami (np. maksymalna szybkość transmisji), nie zawsze jednak ich wykorzystanie jest możliwe. Zdarzają się także sytuacje, kiedy użycie mediów przewodowych, jakkolwiek możliwe, z różnych powodów nie jest wygodne. Należy wówczas rozważyć możliwość zastąpienia ich mediami bezprzewodowymi, np. falami radiowymi, podczerwienią lub transmisją satelitarną.

1.1. Możliwości zastosowania mediów bezprzewodowych

Literatura [1] podaje kilka najbardziej typowych przypadków, w których wykorzystanie transmisji bezprzewodowej jest pożądane lub wręcz konieczne:

1. Stacje, które mają komunikować się ze sobą, rozmieszczone są na dużych obszarach, ubogich w środki łączności, np. telefonicznej. Transmisja radiowa jest wówczas względnie prostym i tanim sposobem uzyskania łączności na stosunkowo duże odległości (zależnie od mocy nadajnika i topografii terenu).
2. Projektowana sieć może charakteryzować się dużymi wahaniami obciążenia lub małą szybkością transmisji. Wówczas zastosowanie mediów bezprzewodowych jest korzystniejsze z ekonomicznego punktu widzenia, a to ze względu na niewielkie wykorzystanie posiadanych kanałów łączności przewodowej.
3. Stacje mogą poruszać się względem siebie. W tym przypadku zalety transmisji bezprzewodowej, szczególnie radiowej, są najbardziej oczywiste, ponieważ przewody elektryczne praktycznie uniemożliwiają swobodne poruszanie się stacji.

Powyższe sytuacje rozpatrywane są głównie w kontekście zastosowania transmisji radiowej. Obecnie jednak coraz bardziej popularne stają się także inne rozwiązania, jak np. transmisja satelitarna, która w wielu przypadkach z powodzeniem może zastąpić radiową, a także łączność z użyciem podczerwieni. Jako przykładowe można wymienić następujące sytuacje:

4. Sieć składa się z niewielkiej liczby stacji i zlokalizowana jest na stosunkowo małym obszarze. Wówczas, jeśli instalacja połączeń przewodowych jest niewygodna, można wykorzystać, w zależności od wymagań, fale radiowe lub podczerwień.
5. W środowisku pracy sieci istnieją silne zakłócenia elektromagnetyczne, które oddziałują niekorzystnie na parametry transmisji, a często ją uniemożliwiają. Dość

dobrym rozwiązaniem jest wówczas wykorzystanie podczerwieni jako medium transmisyjnego.

6. Stacje sieci umieszczone są w ten sposób, że przewody łączące muszą zostać poprowadzone drogą okrężną, co znacznie zwiększa koszt sieci, a także obniża jej niezawodność. Z sytuacją taką mamy do czynienia w centrach aglomeracji miejskich. Również tutaj można wykorzystać podczerwień lub fale radiowe.

Użytkowanie urządzeń pracujących w zakresie podczerwieni nie wymaga zezwoleń, koniecznych w przypadku transmisji radiowej. Zastosowanie podczerwieni rozproszonej umożliwia poruszanie się stacji w obrębie pomieszczenia, natomiast podczerwień skupiona pozwala na uzyskanie większych zasięgów, aczkolwiek praktycznie uniemożliwia poruszanie się stacji.

1.2. Przykłady zastosowań mediów bezprzewodowych

Wymienione powyżej przypadki stanowią jedynie przesłanki stosowania mediów bezprzewodowych. Istnieje jednak wiele ciekawych zastosowań, jak np.:

1. System monitorowania stanu lasu i ochrony przeciwpożarowej. Stacje lokalne, rozmieszczone w punktach obserwacyjnych, wyposażone są w czujniki podczerwieni, co pozwala na zlokalizowanie miejsca o podwyższonej temperaturze. W przypadku wykrycia pożaru informacja o tym fakcie, zawierająca dane umożliwiające określenie zagrożonego obszaru, przesyłana jest do stacji centralnej za pomocą fal radiowych.
2. System zbierania danych dla energetyki. Stacja centralna umieszczona jest w samochodzie, natomiast stacje lokalne są nieruchome, umieszczone na budynkach. Podczas przejazdu ulicą stacje lokalne przesyłają do stacji centralnej np. dane z liczników zużycia energii. W tym przypadku, ze względu na mobilność stacji, konieczne jest użycie fal radiowych.
3. System sterowania oparty na inteligentnych przetwornikach pomiarowych. Każdy przetwornik jest stacją lokalną i realizuje pewne funkcje pomiarowo-kontrolne. W sieci wymieniane są wówczas tylko niezbędne informacje o stanie urządzeń, np. komunikaty o błędach lub innego typu sytuacjach awaryjnych. Istnieje także możliwość przekazywania fragmentów kodu programu, a więc daleko idąca rekonfiguracja funkcji poszczególnych przetworników. Przykładem może być sterowanie światłami ulicznymi wykorzystujące dane o natężeniu ruchu z poszczególnych kierunków. Stacje mogą wówczas przesyłać informacje o natężeniu ruchu oraz komunikaty o blokowaniu się skrzyżowań. Odpowiednie wykorzystanie takich danych powinno

zwiększyć przepustowość głównych ciągów komunikacyjnych przez kierowanie samochodów trasą alternatywną lub wyprowadzenie "korków" poza miasto.

4. System zbierania danych w medycynie. Liczne urządzenia pomiarowe, stosowane do badania i rejestrowania stanu chorych, emitują silne zakłócenia elektromagnetyczne wpływające niekorzystnie na parametry transmisji przewodami elektrycznymi czy przez fale radiowe. Ponieważ stacje sieci są w tym przypadku nieruchome, można zastosować transmisję z użyciem podczerwieni.
5. Łączność pomiędzy urzędami w dużych miastach. Zdarza się, że zapewnienie łączności przewodowej pomiędzy dwoma bliskimi budynkami w centrum miasta wymaga prowadzenia kabli drogami okrężnymi. Spowodowane jest to istnieniem różnorodnych przeszkód, jak np. sieć gazowa czy wodno-kanalizacyjna, a także tory tramwajowe. Wydłużanie połączeń wpływa niekorzystnie na parametry transmisji, obniżając jakość sieci i jej niezawodność, a także zwiększa koszty instalacji. Wykorzystanie łączy bezprzewodowych jest bardzo prostym i eleganckim rozwiązaniem tego problemu, szczególnie gdy poszczególne stacje mogą "widzieć się" wzajemnie. Można wówczas wykorzystać zarówno fale radiowe, jak i podczerwień.
6. Systemy obsługi w dużych magazynach lub domach towarowych. Elektroniczne kasy fiskalne, rozpoznające rodzaj towaru na podstawie np. kodów paskowych, muszą mieć do dyspozycji dane dotyczące cen poszczególnych artykułów. W przypadku zmiany którejś ceny informacja o tym fakcie może zostać rozesłana do wszystkich kas jednocześnie. Ze względu na nieruchomość stacji korzystne jest użycie podczerwieni jako medium transmisyjnego.
7. System monitorowania przewozu materiałów i substancji niebezpiecznych. Ciężarówki, transportujące tego typu materiały, wysyłają sygnały identyfikacyjne, umożliwiające precyzyjną lokalizację poszczególnych pojazdów. Ze względu na wielkość obszaru monitorowania (praktycznie cały kraj lub nawet kontynent) oraz nieograniczone możliwości poruszania się stacji, jedynym rozwiązaniem jest zastosowanie łączności satelitarnej. Jako ciekawostkę można przytoczyć fakt wykorzystywania tego typu rozwiązań w armii Stanów Zjednoczonych do celów lokalizacji żołnierzy, z których każdy wyposażony jest w nadajnik.

W chwili obecnej obserwuje się szybki rozwój sprzętu i oprogramowania pozwalającego tworzyć sieci bezprzewodowe wewnątrz budynków (WIN, *Wireless In-building Network*) [2]. Sieć taka składa się zazwyczaj z pojedynczej stacji sterującej (*Control Module*) i stacji użytkowników (*User Module*) [3]. Każda z tych stacji może być także dołączona do segmentu sieci przewodowej. Stacje użytkowników komunikują się ze sobą tylko za pośrednictwem stacji sterującej, której zasięg (w przypadku transmisji radiowej) określa rozmiary tzw. mikrokomórki sieci. Sąsiednie mikrokomórki muszą korzystać z różnych kanałów

radiowych; niemniej jednak struktura budynku ogranicza zasięg stacji, toteż sieci pracujące na różnych piętrach mogą pracować w tym samym kanale bez wzajemnego zakłócania. Parametry użytkowe sieci są zbliżone do parametrów przewodowych sieci lokalnych.

Inne zastosowanie mediów bezprzewodowych to tzw. mosty bezprzewodowe, umożliwiające połączenie ze sobą kilku odległych segmentów przewodowej sieci lokalnej. Ogólny przegląd rozwiązań stosowanych w bezprzewodowej transmisji danych zawarty jest w [4].

2. Charakterystyka fal radiowych jako medium transmisyjnego

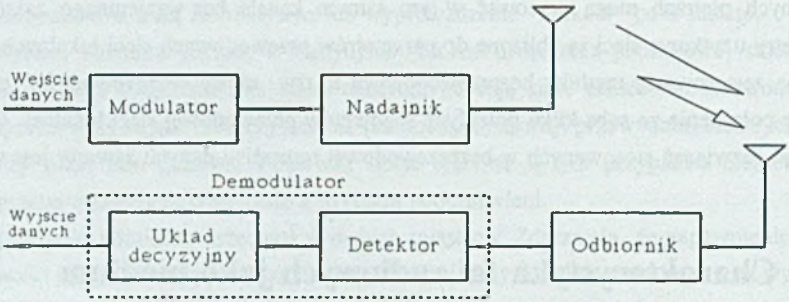
Podczas projektowania cyfrowego systemu radiokomunikacyjnego należy uwzględnić cechy charakterystyczne fal radiowych, w szczególności zaś różnice między transmisją radiową a przewodową. Jest to konieczne w celu lepszego wykorzystania medium radiowego, a więc i uzyskania możliwie dobrych parametrów transmisji.

2.1. Struktura cyfrowego systemu radiokomunikacyjnego

W celu wykorzystania fal radiowych jako medium służącego transmisji danych cyfrowych niezbędne jest przetworzenie tych danych na postać akceptowalną dla systemów transmisyjnych [5]. Przetworzenie to, podobnie jak dla "tradycyjnej" transmisji analogowej, oparte jest na technice modulacji, przy czym w cyfrowych systemach łączności wykorzystuje się inne metody modulacji. Sygnał wyjściowy z modulatora przekazywany jest do nadajnika (rys. 1), skąd, poprzez odpowiednie medium transmisyjne (w tym przypadku fale radiowe), trafia do odbiornika. W celu wyodrębnienia, z uzyskanego przebiegu, przesyłanych danych stosuje się demodulator, składający się z detektora i układu decyzyjnego. Możliwe są dwa rodzaje detekcji:

- *detekcja koherentna*, wymagająca sinusoidalnego sygnału odniesienia, zsynchronizowanego w fazie i częstotliwości z odebranym sygnałem nośnym,
- *detekcja niekoherentna*, nie wymagająca takiego sygnału.

Zadaniem układu decyzyjnego (tzw. synchronizatora elementowego) jest zdekodowanie zdemodulowanego sygnału i przekształcenie go w ciąg bitów danych.



Rys. 1. Schemat cyfrowego systemu radiokomunikacyjnego
Fig. 1. Diagram of digital radio communication system

2.2. Modulacja w cyfrowych systemach radiokomunikacyjnych

Modulacja jest to modyfikacja przebiegu nośnego wielkiej częstotliwości za pomocą sygnału informacyjnego malej częstotliwości (sygnału w paśmie podstawowym). Fala nośna jest opisana równaniem:

$$S(t) = A(t)\sin[2\pi f(t)+\Phi(t)] \tag{1}$$

gdzie:

$S(t)$ – modulowany sygnał nośny,

$A(t)$ – amplituda,

$f(t)$ – częstotliwość,

$\Phi(t)$ – faza.

W zależności od tego, który z parametrów przebiegu nośnego jest modyfikowany sygnałem informacyjnym, wyróżnia się modulację amplitudy (AM), częstotliwości (FM) lub fazy (PM). W cyfrowych systemach radiokomunikacyjnych występują dwa etapy modulacji [6]. Pierwszy z nich to modulacja cyfrowa, w której modyfikowany parametr przybiera tylko pewne określone wartości. Proces ten wykonywany jest przez modem, na wyjściu którego pojawia się zmodulowana fala podnośna. Drugi etap to modulacja analogowa przebiegu nośnego wielkiej częstotliwości falą podnośną, odbywająca się w nadajniku. Należy zwrócić uwagę na fakt, że przed wykorzystaniem sygnału informacyjnego w procesie modulacji może on zostać poddany filtracji, korekcji lub innym przekształceniom w celu poprawy parametrów systemu, np. ograniczenia szerokości pasma.

W celu zwiększenia szybkości bitowej przy niezmienionej szybkości modulacji stosuje się modulacje wielowartościowe (np. 4-, 8- lub 16-wartościowe) zamiast binarnych (2-war-

tościowych). W metodach tych często stosowana jest modulacja mieszana, będąca kombinacją dwóch podstawowych metod modulacji. Modulacja wielowartościowa, ze względu na większą liczbę rozróżnialnych stanów sygnału, a więc i mniejszą odporność na błędy, wymaga jednak lepszego toru transmisyjnego.

Tabela 1

Względne szybkości wybranych metod modulacji

Typ	Metoda modulacji	Szybkość [bit/s/Hz]
AM	**OOK** (kluczowanie amplitudy) – detekcja koherentna	0.8
	QAM (4-wartościowa modulacja amplitudy)	1.7
	QPR (4-wartościowa modulacja o częściowej odpowiedzi)	2.25
FM	**FSK** (kluczowanie z przesuwem częstotliwości) – detekcja niekoherentna	0.8
	CP-FSK (kluczowanie z przesuwem częstotliwości o ciągłej fazie) – detekcja niekoherentna	1.0
	MSK (szybkie kluczowanie z przesuwem częstotliwości)	1.9
	DE-MSK (szybkie kluczowanie z przesuwem częstotliwości kodowane różnicowo)	1.9
PM	**BPSK** (binarne kluczowanie z przesuwem fazy) – detekcja koherentna	0.8
	DE-BPSK (binarne kluczowanie z przesuwem fazy kodowane różnicowo)	0.8
	DPSK (różnicowe kluczowanie z przesuwem fazy)	0.8
	QPSK (4-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy)	1.9
	DQPSK (różnicowe 4-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy)	1.8
	8-Φ PSK (8-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy) – detekcja koherentna	2.6
	16-Φ PSK (16-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy) – detekcja koherentna	2.9
AM/PM	**16-Φ APK** (16-wartościowe kluczowanie z przesuwem amplitudy i fazy)	3.1

2.3. Dobór parametrów systemu radiokomunikacyjnego

Projektując cyfrowy system radiokomunikacyjny należy dokonać wyboru częstotliwości nośnej oraz szerokości pasma. Wpływ na te czynniki ma rodzaj modulacji, w szczególności zaś jej szybkość oraz pożądana szybkość transmisji. Każda metoda modulacji charakteryzuje się maksymalną liczbą bitów przesyłanych w jednostce czasu przy określonej częstotliwości. Tabela 1 podaje tę wartość dla najczęściej używanych metod modulacji.

Kolejnym istotnym parametrem jest moc nadajnika. Zależy ona przede wszystkim od pożądanego zasięgu transmisji, lecz także od ukształtowania terenu, na którym planuje się rozmieszczenie sieci radiowej, oraz parametrów stosowanych anten.

2.3.1. Dobór częstotliwości nośnej i szerokości pasma

Mając daną żądaną szybkość transmisji R oraz względną szybkość wybranej metody modulacji V_m, można wyznaczyć częstotliwość nośną f zgodnie z poniższą zależnością:

$$f = \frac{R}{V_m} \tag{2}$$

Z kolei szerokość pasma w uzależniona jest od żądanej szybkości transmisji i, zgodnie z twierdzeniem Nyquista [5], określona jest zależnością:

$$w = \frac{R}{2} \tag{3}$$

Szerokość pasma, wyliczona według powyższego wzoru i wyrażona w hercach, teoretycznie wystarcza do przesłania R bitów na sekundę. Jest ona zwana szerokością Nyquista. W praktyce jednak, ze względu na obecność szumów, liczba bitów, jaką można przesłać w jednostce czasu, wynosi:

$$R_{praktyczna} = w \cdot \log_2\left(\frac{S}{N}+1\right) \tag{4}$$

gdzie:

S – średnia moc sygnału,

N – średnia moc szumu.

Zależność powyższa, wyprowadzona przez Shannona, jest prawdziwa dla optymalnego kodu Shannona, zapewniającego pomijalnie małą stopę błędu oraz swobodny dobór mocy sygnału, rozłożonej równomiernie w całej szerokości pasma. Kod ten nie jest możliwy do zrealizowania w praktyce, a więc osiągalna szybkość transmisji jest jeszcze niższa.

Oczywiście, ze względu na przyjęte w radiofonii założenia, nie jest możliwy swobodny dobór częstotliwości nośnej oraz szerokości pasma transmisji. Przepisy dotyczące możliwości doboru tych parametrów zawarte są w ustawie o radiofonii i telekomunikacji.

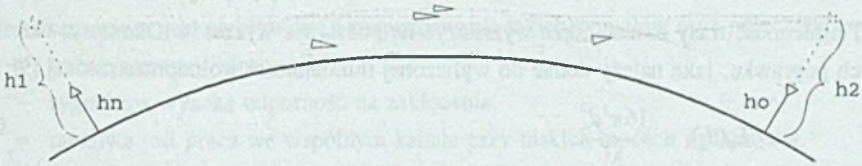
2.3.2. Zakresy częstotliwości w systemach cyfrowych

Właściwości fal elektromagnetycznych, w tym radiowych, zależą od ich częstotliwości. Ze względu na dużą liczbę stacji nadających w zakresie fal długich i średnich (o częstotliwościach poniżej 3 MHz), istnieją duże ograniczenia na szerokość pasma [7]. Z tego powodu do wykorzystania pozostają jedynie fale krótkie (3 ÷ 30 MHz) i ultrakrótkie (powyżej 30 MHz).

Fale krótkie pozwalają na uzyskanie dużych zasięgów, obejmujących nawet całą kulę ziemską [8]. Niestety, propagacja fal krótkich silnie zależy od pory dnia i roku, dlatego też do łączności dziennej wykorzystuje się na ogół inne zakresy niż do łączności w nocy. Ponadto, ze względu na wielodrogowość propagacji, sygnał radiowy podlega różnorodnym zanikom, w wyniku których powstają m. in. strefy milczenia, w których odbiór jest niemożliwy, podczas gdy przed i za taką strefą łączność jest możliwa. W związku z ciągłą zmiennością parametrów łącza na falach krótkich do łączności cyfrowej lepiej nadają się fale ultrakrótkie.

2.3.3. Dobór mocy nadajnika

W przypadku fal ultrakrótkich (30 ÷ 1000 MHz), najczęściej stosowanych w radiowej łączności cyfrowej ze względu na korzystniejsze niż w przypadku fal krótkich parametry transmisji, występuje tzw. przyziemna propagacja fal (rys. 2). W propagacji tej, prócz zjawisk rozpraszania i pochłaniania fal, duże znaczenie mają zjawiska odbicia, dyfrakcji i refrakcji. Tłumienność trasy przyziemnej jest znacznie większa niż trasy wolnoprzestrzennej, a ponadto jest silnie zależna od rodzaju terenu. Ostatni czynnik ma szczególne znaczenie zwłaszcza dla sieci mobilnych.



Rys. 2. Trójskładnikowy model propagacji przyziemnej przedhoryzontowej
Fig. 2. Three-component model of direct before-horizon propagation

Bezinterferencyjny zasięg użytkowy [9] jest to taka odległość pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, przy której przeciętny sygnał odbierany ma moc równą rzeczywistej czułości odbiornika ($P_{0\,min}$). Zasięg ten zależy nie tylko od mocy nadajnika, lecz także od parametrów anten (zysk energetyczny) oraz ukształtowania terenu, które z kolei wpływa

na tłumienność trasy. Ogólnie, zasięg użytkowy d_u związany jest z medianą mocy sygnału odbieranego następującą zależnością:

$$P_{0\,\min} = \frac{P_n G_n G_o}{L(d_u)} \tag{5}$$

gdzie:

P_n – moc nadajnika,

G_n – zysk energetyczny anteny nadajnika,

G_o – zysk energetyczny anteny odbiornika,

$L(d_u)$ – tłumienność trasy jako funkcja zasięgu (odległości).

Rozwiązanie tego równania względem d_u pozwala na wyznaczenie zasięgu użytkowego.

Dla tras przedhoryzontowych, tzn. takich, dla których odległość transmisji nie przekracza horyzontu radiowego (czyli kiedy stacje "widzą się" wzajemnie), przy częstotliwościach nie większych niż 100 MHz, tłumienność określona jest wzorem [9]:

$$L(d_u) \cong \frac{d_u^4}{h_1^2 h_2^2} \tag{6}$$

gdzie h_1 i h_2 są skorygowanymi wzniesieniami anten odpowiednio nadawczej i odbiorczej (rys. 2), zależnymi od rodzaju polaryzacji (pozioma lub pionowa) i parametrów elektrycznych (przenikalność elektryczna, konduktancja właściwa) gruntu.

Dla częstotliwości powyżej 100 MHz, ze względu na wzrost tłumienności wraz ze wzrostem częstotliwości nośnej, stosuje się oszacowanie wzorem Egli [9]:

$$L(d_u)[\mathrm{dB}] \cong 88 + 40\log d_u[\mathrm{km}] - 20\log(h_n[\mathrm{m}]h_o[\mathrm{m}]) + 20\log f[\mathrm{MHz}] \tag{7}$$

lub Grzybkowskiego [9]:

$$L(d_u)[\mathrm{dB}] \cong 100 + 40\log d_u[\mathrm{km}] - 20\log(h_n[\mathrm{m}]h_o[\mathrm{m}]) + 10\log f[\mathrm{MHz}]. \tag{8}$$

Tłumienność trasy można także wyznaczyć na podstawie wykresów Okumury, określających poprawkę, jaką należy dodać do wyliczonej tłumienności wolnoprzestrzennej [9]:

$$L_0(d_u) = \frac{16\pi^2 d_u^2}{\lambda^2}, \tag{9}$$

gdzie λ jest długością fali nośnej. Wykresy podstawowe, wykonane dla prawie gładkiego terenu miejskiego, uzupełnione są o wykresy określające poprawkę ze względu na wzniesienie anteny nadawczej i odbiorczej oraz typ terenu.

Dla tras pozahoryzontowych, jak dotychczas, nie znaleziono opisu analitycznego tłumienności, dlatego też stosuje się opracowane przez CCIR *krzywe medianowe* [9]. Ponieważ empirycznie wykazano, iż tłumienność pozahoryzontowa zależy głównie od częstotliwości i odległości, zaś tylko nieznacznie od wzniesienia anten, przyjmuje się zależność

$$L_c[\mathrm{dB}] = L[\mathrm{dB}] + \Delta L[\mathrm{dB}] \tag{10}$$

w której L oblicza się ze wzoru:

$$L[\mathrm{dB}] \cong 120 + 40\log d[\mathrm{km}] - 20\log(h_1[\mathrm{m}]h_2[\mathrm{m}]) \tag{11}$$

natomiast $\Delta L(f,d)$ odczytuje się z nomogramu Bullingtona, określającego poprawki pozahoryzontowe do wzorów przedhoryzontowych dla propagacji przyziemnej [9].

Oprócz zasięgu użytkowego nadajnik charakteryzuje się także *zasięgiem zakłóceniowym*, czyli odległością, w której zakłócana jest praca innych nadajników wykorzystujących ten sam kanał radiowy. Zasięg ten jest na ogół 1.5 ÷ 2 razy większy od zasięgu użytkowego. Z kolei interferencja pochodząca od innych nadajników uwzględniona jest w koncepcji *zasięgu ograniczonego interferencją*. Szczegółowe rozważania na ten temat można znaleźć w literaturze [9]. W praktyce obliczenia teoretyczne służą jedynie do orientacyjnego wyznaczenia mocy nadajnika. Silna zależność zasięgu od kształtu terenu powoduje bowiem, iż słyszalność stacji w różnych kierunkach może być trudna do przewidzenia. Dlatego też konieczne jest próbne uruchomienie nadajnika i empiryczne sprawdzenie, czy w pożądanych miejscach istnieje zadowalająca jakość odbioru. Uzyskane w ten sposób dane służą następnie do korekty mocy nadajnika. Należy także zaznaczyć, iż nadajnik powinien posiadać pewną rezerwę mocy, która pozwala zapobiec zerwaniu transmisji wskutek zaników fal.

2.4. Systemy radiowe z widmem rozproszonym

Metoda modulacji z widmem rozproszonym (ang. *Spread Spectrum*), w której szerokość pasma przesyłanego sygnału jest znacznie większa niż wymagana dla przesłania informacji w paśmie podstawowym [5], charakteryzuje się następującymi zaletami w stosunku do klasycznych metod modulacji [9]:

- utrudnione jest wykrywanie i rozpoznawanie takich sygnałów oraz przechwytywanie transmitowanej informacji,
- sygnał ma wysoką odporność na zakłócenia,
- możliwa jest praca we wspólnym kanale przy niskich mocach nadajników.

W celu transmisji sygnału o poszerzonym widmie wykorzystuje się szerokopasmowy, pseudolosowy przebieg rozpraszający. Jest on wprowadzany wraz z przesyłanym sygnałem na wejście modulatora zarówno w nadajniku, jak i w odbiorniku. Istnieje kilka metod rozpraszania sygnału [5, 9]:

- bezpośrednia modulacja sygnału pseudolosowym przebiegiem szerokopasmowym (ang. *Direct Sequence*),
- przeskoki częstotliwości nośnej (ang. *Frequency Hoping*),
- przeskoki w czasie (ang. *Time Hoping*),

– szerokopasmowa, liniowa modulacja częstotliwości (ang. *Linear Frequency Modulation*).

Wielodostęp uzyskuje się metodami [5]:

– rozdziału kodowego (*Code Division Multiple Access*), w którym różnym stacjom przyporządkowuje się różne przebiegi rozpraszające, dzięki czemu uzyskuje się zwiększenie liczby kanałów,
– rozdziału czasowego (*Time Division Multiple Access*), w którym stacje nadają naprzemiennie we wspólnym kanale.

2.5. Synchronizacja

Zapewnienie prawidłowego odbioru nadawanych sygnałów wymaga zsynchronizowania odbiornika z nadajnikiem [5]. W przypadku systemów radiokomunikacyjnych proces synchronizacji przebiega w kilku etapach:

– synchronizacja przebiegu nośnego (w przypadku demodulacji koherentnej),
– synchronizacja zegara odbiornika z odebranym strumieniem danych cyfrowych (synchronizacja elementowa),
– synchronizacja słowa, ramki lub pakietu (w zależności od systemu).

Synchronizacja przebiegu nośnego realizowana jest najczęściej w oparciu o układy pętli fazowej PLL (*Phase Lock Loop*). Układy te zapewniają dostrojenie się do fazy sygnału odbieranego poprzez śledzenie przebiegu nośnego [5].

Synchronizacja elementowa (bitowa) zapewnia rozpoznawanie wartości bitu we właściwym momencie. Najczęściej spotykaną metodą uzyskiwania synchronizacji jest stosowanie kodowania samosynchronizującego. Przebieg danych zakodowany taką metodą zawiera także informację pozwalającą na wydzielenie impulsów zegara. Przykładem takiego kodu jest kod RZ (*Return to Zero*) lub Manchester. W przypadku odbioru sygnałów zaszumionych można posłużyć się filtrami pasmowymi lub układami pętli fazowej [5].

Synchronizacja ramki jest konieczna w celu prawidłowego rozpoznania początku i końca ramki, oczywiście pod warunkiem, że uzyskana jest synchronizacja elementowa (błąd synchronizacji elementowej, np. zgubienie lub powielenie bitu danych, powoduje błąd synchronizacji ramki). Najczęściej synchronizację ramki uzyskuje się poprzez wprowadzenie specjalnych ciągów bitowych, które nie występują w ciągu danych (przezroczystość protokołu).

2.6. Propagacja sygnałów radiowych wielkiej częstotliwości

Do tworzenia sieci bezprzewodowych stosuje się najczęściej urządzenia pracujące w zakresie od kilkuset MHz do kilkunastu GHz. Przy takich częstotliwościach fale radiowe zachowują się podobnie jak promienie świetlne [10], tzn. ulegają odbiciom, załamaniom, rozproszeniu i blokowaniu przez różne obiekty, np. budynki czy przedmioty wewnątrz budynków. Transmisja radiowa napotyka wówczas następujące problemy:

- zaniki chwilowe, spowodowane np. poruszaniem się ludzi lub przedmiotów lub krótkotrwałymi zakłóceniami elektromagnetycznymi,
- zaniki, wywołane docieraniem do odbiornika fal różniących się w fazie (fale w przeciwfazie wygaszają się wzajemnie), np. prostej i odbitej (rozproszenie lokalne),
- różnice w czasie propagacji fal zmierzających do odbiornika różnymi drogami, np. wprost i po wielokrotnym odbiciu (rozproszenie opóźnienia, ang. *delay spread*)

Analizę efektów propagacji wielodrogowej przeprowadzono w [9]. W celu zapobieżenia efektom propagacji wielodrogowej stosuje się następujące metody [10]:

- wyrównywanie adaptatywne, polegające na wprowadzaniu własnego "echa" o tak dobranej amplitudzie i fazie, aby wyeliminować sygnały odbite,
- rozpraszanie widma sygnału (punkt 2.4), pozwalające na wyeliminowanie efektów rozpraszania lokalnego,
- stosowanie odpowiednich zbiorczych anten kierunkowych.

Podczas projektowania sieci radiowych i analizy dróg sygnałów można wykorzystać technikę śledzenia promieni (*ray tracing*). Podejście takie opisane jest w [11]. Zbiorcze podsumowanie tej problematyki zawarte jest w [12].

3. Istniejące systemy transmisji bezprzewodowej

Zapewnienie bezbłędnej transmisji między wieloma stacjami sieci wymaga zaopatrzenia przesyłanych danych w dodatkowe informacje, jak np. adres nadawcy i odbiorcy czy suma kontrolna. Dane są wówczas dzielone na fragmenty, zwane pakietami lub ramkami, których specyfikacja zawarta jest w protokole transmisji.

3.1. Podział systemów transmisji bezprzewodowej

Wśród spotykanych obecnie systemów transmisji bezprzewodowej można wyróżnić następujące grupy [4]:

- cyfrową telefonię komórkową (np. GSM),

- cyfrowe telefony bezprzewodowe (np. DECT),
- bezprzewodowe sieci lokalne (projekty standardów IEEE 802.11, HIPERLAN, IrDA),
- mobilne sieci rozległe (np. Mobitex, ARDIS, RD-LAP),
- sieci rozległe stacjonarne (np. Aloha).

3.2. Telefonia cyfrowa

Wśród telefonów cyfrowych można wyróżnić telefony komórkowe, zapewniające łączność na dużym obszarze, oraz bezprzewodowe, umożliwiające łączność lokalną. Zostały one stworzone z myślą o komunikacji głosowej, umożliwiają jednak transmisję danych cyfrowych nawet ze znacznymi prędkościami (do ok. 500 kb/s). Jako przykładowe systemy telefonii cyfrowej można wymienić GSM oraz DECT.

3.2.1. System komórkowy GSM

GSM (*Global System for Mobile communication*) [9, 13] jest europejskim standardem cyfrowej telefonii komórkowej, wprowadzanym obecnie również w Polsce. Podstawowym przeznaczeniem systemu jest łączność foniczna, jednak umożliwia on przesyłanie danych cyfrowych z prędkością 9.6 kb/s.

Dla przesyłu od stacji ruchomych do stacji bazowych wykorzystywane jest pasmo 890 ÷ 915 MHz, zaś w przeciwnym kierunku 935 ÷ 960 MHz (istnieje także wersja pracująca w pasmie 1.8 GHz – DCS 1800). W celu uzyskania wielodostępu stosowana jest kombinacja metod podziału czasu i częstotliwości. Pasmo o szerokości 25 MHz podzielone jest na 124 kanały o szerokości 200 kHz. Każdej stacji bazowej przyporządkowany jest przynajmniej jeden kanał, który następnie dzielony jest czasowo pomiędzy stacje ruchome.

Podział czasowy kanału reprezentowany jest jako wieloramka (*multiframe*) o czasie trwania 120 ms. Jest ona podzielona na 26 ramek o równej długości, z których 24 używane są do przesyłania danych lub mowy, a pozostałe do celów sterowania. Każda ramka jest następnie podzielona na 8 okresów wymiatania (*burst period*), podczas trwania których poszczególne stacje posiadają dostęp do łącza.

Mowa kodowana jest cyfrowo z szybkością 13 kb/s z wykorzystaniem koderów liniowo-predykcyjnych. Pasmo przenoszenia wynosi 3.3 kHz, a częstotliwość próbkowania 8 kHz. Strumień bitów wyposażony jest w informację umożliwiającą korekcję błędów, dodaną z kodera konwolucyjnego. Uzyskany w ten sposób ciąg bitów dzielony jest na fragmenty o długości 57 bitów i po uzupełnieniu w niezbędną informację sterującą poddawany modulacji metodą GMSK z szybkością 270.8 kb/s.

3.2.2. System DECT

System DECT (*Digital European Cordless Telecommunications*) [14, 15] jest standardem cyfrowej telefonii bezprzewodowej, zapewniającym łączność na stosunkowo krótkie odległości. System ten zawiera elementy telefonii komórkowej, np. mechanizm przełączania stacji (*handover*). Prócz komunikacji głosowej możliwa jest także transmisja danych cyfrowych z szybkościami z przedziału 24 ÷ 552 kb/s. Rozważana jest możliwość współpracy systemów DECT i GSM.

DECT pracuje w zakresie częstotliwości 1.88 ÷ 1.9 GHz. Pasmo to podzielone jest częstotliwościowo na 10 kanałów o szerokości 1728 kHz, z których każdy dzielony jest na 12 przedziałów czasowych w każdym z kierunków, co daje w sumie 120 kanałów dupleksowych lub 240 simpleksowych. Dwukierunkowość łącza uzyskuje się metodą podziału czasowego (*Time Division Duplex*). Przydział kanałów jest dynamiczny, możliwe jest też przyporządkowanie kilku przedziałów jednej stacji, dzięki czemu wybrane stacje mogą nadawać z większą szybkością.

Mowa jest kodowana cyfrowo z szybkością 32 kb/s z wykorzystaniem adaptatywnej, różnicowej modulacji kodowo-impulsowej (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*). Strumień bitów, wyposażony w informacje sterujące, modulowany jest metodą GFSK z prędkością 1152 kb/s.

Moc nadajnika w systemie DECT wynosi do 250 mW, co zapewnia zasięg transmisji rzędu 100 m w przestrzeni otwartej i 30 ÷ 50 m wewnątrz budynków.

3.3. Mobilne sieci rozległe

Mobilne sieci rozległe posiadają strukturę zbliżoną do telefonii komórkowej i dzięki temu zapewniają duży zasięg transmisji oraz swobodne poruszanie się stacji. Prędkość transmisji jest jednak niska i nie przekracza 20 kb/s. Jako przykłady mobilnych sieci rozległych można wymienić systemy Mobitex oraz RD-LAP.

3.3.1. System Mobitex

System Mobitex szwedzkiej firmy Ericsson [16] powstał jako cyfrowy system komunikacyjny małej szybkości (1.2 kb/s) z możliwością przesyłu mowy, został jednak rozbudowany i obecnie umożliwia transmisję przy szybkości 8 kb/s. Informacje przesyłane są pakietowo, bez łączności w czasie rzeczywistym [9]. Istotną cechą jest możliwość dowolnej konfiguracji systemu abonenta z wykorzystaniem urządzeń systemu Mobitex. Łączność w systemie Mobitex jest obecnie dostępna w Polsce dzięki usługom Telbanku.

Struktura systemu Mobitex jest zbliżona do struktury telefonii komórkowej. Składają się na nią stacje ruchome i bazowe oraz centrale obszarowe. Łączność pomiędzy centralami

jest przewodowa z szybkością do 64 kb/s. Komunikacja pomiędzy stacjami ruchomymi i bazowymi odbywa się w pasmie 800 MHz, w kanałach o szerokości 12.5 kHz, z wykorzystaniem modulacji GMSK.

3.3.2. Protokół Motorola RD-LAP

Protokół RD–LAP (*Radio Data Link Access Procedure*) [17] stosowany jest w komunikacji pomiędzy stacjami ruchomymi, połączonymi w sieć komórkową. Łączność pomiędzy stacjami odbywa się za pośrednictwem stacji bazowej (jednej w każdej podsieci). Wykorzystywana jest transmisja wąskopasmowa z kwadraturową (4-poziomową) modulacją częstotliwości w preferowanym zakresie powyżej 400 MHz. Szerokość pasma wynosi 25 kHz dla szybkości 19200 b/s i 12.5 kHz dla 9600 b/s.

Podobnie jak w systemie Aloha, wykorzystywane są dwie częstotliwości, jedna dla transmisji ze stacji lokalnych (strumień wchodzący), a druga dla transmisji ze stacji centralnej (strumień wychodzący). Stacje lokalne działają w trybie *half-duplex*, natomiast stacja centralna w trybie *full-duplex*.

Strumień wychodzący podzielony jest na szczeliny czasowe, z których każda składa się z całkowitej liczby mikroszczelin. Mikroszczelina jest to ciąg 22 (24 dla synchronizacji ramki) symboli zakończonych symbolem stanu łącza (bezczynność, zajętość lub stan nieznany). Zajętość oznacza, że któraś ze stacji lokalnych nadaje, podczas gdy bezczynność oznacza ciszę na łączu. Stan bezczynności lub zajętości łącza sygnalizowany jest jedynie na końcu szczeliny (stan nieznany oznacza zatem jedynie koniec mikroszczeliny).

Jeżeli stacja lokalna ma ramkę do wysłania, przechodzi do stanu poszukiwania synchronizacji ramki. Po wykryciu sekwencji synchronizującej odczekuje losowo wybrany czas i czeka na koniec szczeliny czasowej w celu odczytania stanu łącza. Jeżeli kanał jest zajęty, odczekuje losowo wybrany czas i ponawia próbę dostępu. Jeżeli kanał jest wolny, ramka jest nadawana. Brak zajętości kanału zakłada się również wtedy, gdy w zadanym czasie nie zostanie wykryta sekwencja synchronizująca.

3.4. Sieci rozległe stacjonarne

Sieci rozległe stacjonarne posiadają parametry zbliżone do sieci mobilnych, ale stacje nie są ruchome, mimo iż jest to możliwe. Prędkość transmisji nie przekracza 20 kb/s.

3.4.1. Sieć Aloha

Sieć Aloha [1] jest pierwszym znanym systemem transmisji radiowej. Został on opracowany w roku 1971 na Uniwersytecie Hawajskim i uważany jest obecnie za protoplastę systemów rozsiewczej transmisji pakietów.

W systemie Aloha występuje jedna stacja centralna oraz wiele stacji lokalnych. Stacje lokalne mogą się łączyć ze stacją centralną, nie mogą natomiast komunikować się ze sobą bezpośrednio. Stacja centralna posiada łączność ze wszystkimi stacjami lokalnymi. Wykorzystywane są dwa oddzielne pasma częstotliwości o szybkości transmisji 9600 b/s, jedno dla transmisji od stacji lokalnych do centralnej i jedno w przeciwnym kierunku.

Algorytm dostępu stacji lokalnych do łącza radiowego jest losowy z możliwością wystąpienia kolizji. Jeżeli stacja lokalna ma pakiet do nadania, rozpoczyna transmisję niezależnie od stanu zajętości łącza. Kolizje nie są w żaden sposób wykrywane, dlatego też konieczne jest potwierdzenie poprawnego odbioru pakietu przez stację centralną. Jeżeli w określonym czasie (zazwyczaj 200 ÷ 1500 ms) potwierdzenie nie przyjdzie, powtarza się transmisję pakietu.

Algorytm dostępu stacji centralnej do łącza jest sterowany przez tę stację. Ze względu na konieczność możliwie szybkiego wysłania potwierdzenia poprawnego odbioru pakietu wprowadzone są dwie kolejki nadawanych pakietów: jedna, o wyższym priorytecie, dla potwierdzeń i jedna dla "zwykłych" odpowiedzi stacji centralnej. Odbiór pakietu zawierającego taką odpowiedź musi zostać potwierdzony przez stację lokalną, problemy może jednak stwarzać wykorzystanie do tego celu łącza o dostępie losowym. Dlatego też przyjęto numerację pakietów wyjściowych oraz następujący algorytm: stacja centralna nie wyśle kolejnego pakietu, dopóki nie odbierze potwierdzenia poprawnego odbioru pakietu poprzedniego. Z kolei stacja lokalna, odbierając następny pakiet, przyjmuje, że jej potwierdzenie zostało odebrane przez stację centralną.

3.4.2. Sieć Packet Radio

Sieć Packet Radio [6] jest systemem amatorskiej komunikacji cyfrowej. Wykorzystywany jest tu protokół AX.25 [18], będący nieco zmodyfikowaną wersją protokołu X.25, dostosowaną do potrzeb komunikacji amatorskiej, tym niemniej spotykane są profesjonalne rozwiązania lokalnych sieci bezprzewodowych, w których wykorzystuje się właśnie protokół AX.25 [6]. Protokół ten definiuje warstwę 2 modelu ISO, tzw. warstwę łącza danych [1].

Wszystkie stacje, pomiędzy którymi istnieje łączność, są równoprawne, a więc mogą bez przeszkód porozumiewać się ze sobą, o ile pozwala na to zasięg nadajników. Komunikacja odbywa się z szybkością 300 b/s na falach krótkich, 1200 b/s na falach ultrakrótkich oraz 9600 ÷ 56000 b/s w zakresie mikrofalowym [6]. Algorytm dostępu do łącza jest rywalizacyjny, odbywający się według zasady CSMA/CD. Stacje mogą rozpocząć nadawanie

w dowolnej chwili, o ile tylko łącze nie jest zajęte (brak podnośnych pochodzących od innych stacji). W przypadku wykrycia "obcej" podnośnej (co faktycznie oznacza wystąpienie kolizji) nadawanie jest przerywane, po czym stacja odczekuje losowo dobrany czas i ponawia próbę nadania pakietu.

Format pakietu wykorzystywanego w protokole AX.25 jest wzorowany na pakiecie formatu HDLC [1], a jedyna różnica polega na tym, że AX.25 posiada bardziej rozbudowane pole adresowe – pakiet może zawierać adresy nadawcy, odbiorcy oraz do ośmiu przekaźników (stacji pośredniczących w transmisji).

3.5. Bezprzewodowe sieci lokalne

Bezprzewodowe sieci lokalne mogą w wielu przypadkach z powodzeniem zastąpić sieci przewodowe, szczególnie jeżeli jest wymagana np. szybka rekonfiguracja sieci. Oferują one duże szybkości transmisji (powyżej 1 Mb/s), jednak poruszanie się stacji, jakkolwiek często możliwe, jest mocno ograniczone, głównie ze względu na mały zasięg nadajników.

W chwili obecnej wielu producentów oferuje środki do tworzenia sieci lokalnych [19]. Produkty te na ogół nie mogą jednak ze sobą współpracować i dlatego prowadzone są obecnie prace nad standaryzacją transmisji bezprzewodowej w sieciach lokalnych.

3.5.1. Projekt standardu IEEE 802.11

IEEE 802.11 [20] jest opracowywanym obecnie standardem uniwersalnej łączności bezprzewodowej w sieciach lokalnych. Obejmuje on definicję warstwy fizycznej i liniowej modelu odniesienia ISO. Przyjęto, że prędkość transmisji jest nie mniejsza niż 1 Mb/s. Sieć może być stała (topologia gwiazdy) lub tymczasowa (topologia magistralowa).

Zdefiniowano trzy rodzaje warstwy fizycznej, w których transmisja może się odbywać:

- w paśmie podstawowym z wykorzystaniem podczerwieni,
- z widmem rozproszonym metodą *Direct Sequence*,
- z widmem rozproszonym metodą *Frequency Hoping*.

Komunikacja radiowa może odbywać się w jednym z pięciu pasm częstotliwości: 915 MHz, 1.9 GHz, 2.4 GHz, 5.2 GHz lub 5.8 GHz. Dla metody *Direct Sequence* przyjęto 11-elementową sekwencję rozpraszającą Barkera oraz różnicową modulację fazy (*Differential Phase Shift Keying*). Dla metody *Frequency Hoping* przyjęto częstość przeskoków 2.5 na sekundę i modulację GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), określono także 3 sekwencje przeskoków i 79 częstotliwości. W obu metodach założono szybkość transmisji 1 lub 2 Mb/s przy niezmienionej szybkości modulacji (dla 2 Mb/s stosowana jest modulacja 4-wartościowa).

Komunikacja w podczerwieni odbywa się w zakresie 850 ÷ 950 nm. Wykorzystywana jest podczerwień rozproszona, co umożliwia przemieszczanie się stacji, jednak rozwiązanie to może być stosowane tylko wewnątrz budynków. Zasięg transmisji wynosi 10 ÷ 20 m. Przyjęto prędkości transmisji 1 lub 2 Mb/s oraz modulację odpowiednio 16- lub 4-PPM (*Pulse Position Modulation*).

Warstwa liniowa standardu IEEE 802.11 jest niezależna od używanej warstwy fizycznej. Algorytm dostępu do łącza jest rywalizacyjny, odbywający się według zasady CSMA/CA (wykrywanie nośnej z unikaniem kolizji). Każda stacja może rozpocząć nadawanie w dowolnej chwili, jeżeli tylko łącze nie jest zajęte. W przypadku zajętości łącza stacja odczekuje losowo wybrany czas i ponawia próbę transmisji. Ponieważ nie jest możliwe wykrycie ewentualnych kolizji, po wysłaniu ramki stacja czeka na przyjście potwierdzenia poprawnego odbioru. Jeżeli potwierdzenie nie przyjdzie, ramka jest retransmitowana po upływie losowo wybranego czasu.

W projekcie przewidziano możliwość wysyłania ramek o wyższym priorytecie. W tym celu posłużono się tzw. zasadą superramki, zapewniającą ważnym informacjom wolny od rywalizacji dostęp do łącza.

3.5.2. Standard HIPERLAN

HIPERLAN (*High Performance Radio Local Area Network*) [21] jest projektem standardu radiowych sieci lokalnych o dużej przepustowości. W chwili obecnej do wykorzystania w systemie HIPERLAN przygotowane są dwa zakresy częstotliwości: 5.150 ÷ 5.30 GHz oraz 17.1 ÷ 17.3 GHz. W pierwszym z tych pasm szybkość transmisji wynosi około 24 Mb/s, natomiast drugie powinno zapewnić szybkość transmisji zgodną ze standardem ATM (155 Mb/s).

Standard HIPERLAN umożliwia przesył danych asynchronicznych lub o określonym czasie oczekiwania (*time-bounded*), z szybkościami odpowiednio 1 ÷ 20 Mb/s lub 64 ÷ 2048 kb/s. Zasięg transmisji wynosi 50 ÷ 800 m, zależnie od szybkości transmisji. Długość pakietu danych nie przekracza 16 KB.

W systemie HIPERLAN przewidziano możliwość przekazywania pakietów (*forwarding*). Oznacza to, że stacje, znajdujące się poza swoim zasięgiem, mogą się również komunikować, przesyłając pakiety za pośrednictwem innych stacji. W tym celu zdefiniowano dwa protokoły: Intra-HIPERLAN Forwarding, zapewniający przekazywanie wewnątrz podsieci, oraz Inter-HIPERLAN Forwarding, umożliwiający komunikację między podsieciami.

3.5.3. Standard IrDA

Standard IrDA (*Infrared Data Association*) [22] precyzuje cechy urządzeń umożliwiających transmisję z wykorzystaniem podczerwieni. Opisuje on warstwę fizyczną (IrSIR) i liniową (IrLAP i IrLMP), a także (opcjonalnie) emulację standardowych łączy typu RS-232C albo Centronics przy użyciu produktów zgodnych ze standardem (IrCOMM), protokół transportowy (IrTTP) i rozszerzenia technologii *plug-and-play* (IrPNP).

Prędkość transmisji wynosi 2.4 kb/s do 4 Mb/s, a odległość stacji co najmniej 1 m. Jako medium wykorzystuje się podczerwień skupioną o długości fali 850 ÷ 900 nm. Protokół transmisyjny warstwy liniowej jest wzorowany na protokole HDLC i posiada identyczny format i typy ramek.

W zależności od prędkości transmisji obowiązują różne zasady kodowania sygnałów. W zakresie 2.4 ÷ 115.2 kb/s oraz dla prędkości 576 i 1152 kb/s stosowane jest kodowanie RZI (*Return to Zero Inverted*), a dla prędkości 4 Mb/s stosuje się kwadraturową modulację pozycji impulsu (4PPM, *Pulse Position Modulation*). Przezroczystość protokołu w poszczególnych zakresach uzyskuje się odpowiednio metodą wstawiania bajtów (*byte stuffing*), wstawiania bitów (*bit stuffing*) oraz przez wykorzystywanie zabronionych ciągów bitów jako sekwencji sterujących.

Stacje posiadają możliwość negocjacji parametrów łącza, w szczególności prędkości transmisji oraz rozmiaru pola danych. Wymiana informacji podczas negocjacji odbywa się z prędkością 9.6 kb/s.

4. Problemy w transmisji radiowej

Cechy charakterystyczne fal radiowych wpływają na parametry użytkowe radiowych systemów transmisyjnych. Szczególną uwagę należy zwrócić na zaprojektowanie odpowiedniego algorytmu dostępu do łącza oraz wyboru trasy, ponieważ ich efektywność ma znaczny wpływ na przepustowość sieci.

4.1. Transmisja dwukierunkowa

Podstawowym ograniczeniem, wynikającym bezpośrednio z własności sprzętu radiowego, jest niemożność uzyskania transmisji w trybie *full-duplex* w pojedynczym pasmie częstotliwości. Zastosowanie trybu *half-duplex* zmniejsza dwukrotnie praktyczną szybkość transmisji. Ze względu na duże czasy przełączania stacji pomiędzy odbiorem a nadawaniem (rzędu kilkudziesięciu do kilkuset milisekund), porównywalne z czasem transmisji pakietu,

przy częstej zmianie kierunku transmisji spowolnienie to może być jeszcze większe. Należy też zwrócić uwagę na fakt, że uzyskanie dużych prędkości transmisji jest dość trudne, gdyż wymaga to wysokich częstotliwości nośnych i dużej szerokości pasma. Zwłaszcza ten drugi warunek, ze względu na obowiązujące przepisy, znacznie ogranicza możliwości systemów radiowych.

4.2. Dostęp do łącza

W przypadku sieci o większej złożoności problemem będzie dobór odpowiedniego algorytmu dostępu do łącza, szczególnie dla sieci zdecentralizowanych. W sieciach scentralizowanych, w których stacja centralna wprost wskazuje stację, która ma odpowiedzieć, trudność może sprawić jedynie zapewnienie poprawnego odbioru pakietu pytania i odpowiedzi, co w praktyce sprowadza się do wyboru trasy, i to tylko w systemach, w których nie wszystkie stacje lokalne mają bezpośrednie połączenie ze stacją centralną. W sieciach zdecentralizowanych istnieje ryzyko interferencji w odbiorniku sygnałów z dwóch lub więcej nadajników, które znajdują się poza swoim zasięgiem, a więc nie "wiedzą", że zakłócają się wzajemnie.

4.3. Wybór trasy

Kolejnym problemem występującym w sieciach radiowych jest dobór odpowiedniego algorytmu wyboru trasy. Jest to szczególnie widoczne w przypadku sieci z ruchomymi węzłami, w których widzialność stacji ulega nieustannym zmianom, a zatem zmienia się także konfiguracja sieci. Przy założeniu że niektóre stacje mogą nie widzieć się wzajemnie, a więc wówczas, gdy mogą one także pełnić funkcję przekaźników, konieczne jest odpowiednio częste sprawdzanie stanu połączeń między poszczególnymi węzłami i uaktualnianie parametrów sieci.

W przypadku sieci radiowej, której stacje pracują jako przekaźniki, w celu zwiększenia niezawodności sieci można przesyłać pakiety różnymi drogami. Ze względu na właściwości fal radiowych (rozchodzenie się we wszystkich kierunkach) powstaje tu problem zbędnego powtarzania się pakietów, które w efekcie znacznie zmniejsza przepustowość sieci. Należy zatem wprowadzić pewne reguły, ograniczające możliwość retransmisji pakietu przez stacje przekaźnikowe. Przykłady algorytmów wyboru trasy w sieci oraz ograniczania czasu życia pakietu zawarte są w [1].

W pierwszym z nich pakiet zawiera licznik etapów, który jest dekrementowany przez każdy kolejny przekaźnik. Wyzerowanie licznika powoduje zaniechanie dalszej retransmisji. Istotnym problemem jest tu wybór początkowej wartości licznika. Jeżeli będzie

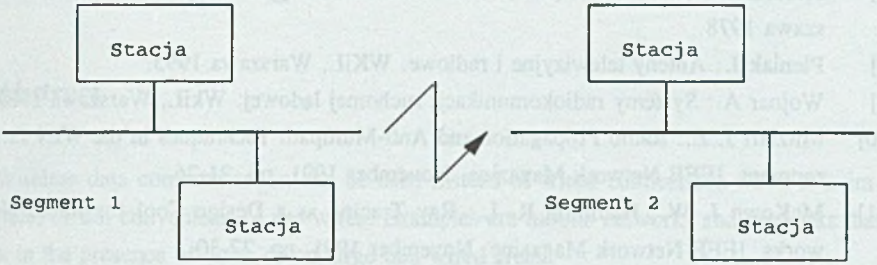
ona zbyt mała, niektóre pakiety nie osiągną miejsca przeznaczenia, jeśli zbyt duża – pakiety będą niepotrzebnie powielane w sieci. Aby ograniczyć powtarzanie pakietów, każda stacja zapamiętuje pewną liczbę odebranych pakietów (lub tylko ich części charakterystyczne, jak np. adres nadawcy i odbiorcy, numer kolejny itp.) w kolejce typu FIFO, przy czym każdy pakiet natychmiast po odebraniu jest porównywany z zawartością kolejki i może następnie zostać retransmitowany, jeżeli nie jest kopią wcześniej odebranego i nadanego już pakietu. Wadą tej metody jest duża liczba powtórzeń każdego pakietu (każda stacja odbiera go od wszystkich "sąsiednich" przekaźników), natomiast zaletą jest możliwość działania sieci w przypadku częstych zmian konfiguracji (zakres tych zmian ograniczony jest początkową wartością licznika etapów). Może być zatem stosowana w sieciach ruchomych oraz tam, gdzie silne zakłócenia powodują przerwę w łączności pomiędzy poszczególnymi stacjami.

Drugi algorytm wymaga znajomości topologii sieci. Co pewien czas wysyłane są ze stacji centralnej pakiety konfiguracyjne, w których każda stacja pośrednicząca wpisuje swój identyfikator. Odpowiedzi wracające do stacji centralnej zawierają zatem informację o najkrótszej drodze do każdej ze stacji. Wadą tej metody, zwłaszcza w sieciach mobilnych, jest konieczność częstej aktualizacji topologii sieci, jak również niewielka odporność na błędy. W zasadzie wykrycie błędu transmisji (brak potwierdzenia odbioru) wymaga ponownej rekonfiguracji sieci. Zaletą tej metody jest lepsze wykorzystanie kanałów łączności, ponieważ pakiety nie są niepotrzebnie powielane.

Trzeci algorytm także wymaga znajomości topologii sieci, ale jest bardziej elastyczny. Każda stacja musi znać odległość mierzoną w etapach do wszystkich pozostałych stacji, co również wymaga okresowej rekonfiguracji sieci. Stacja pośrednicząca retransmituje pakiet jedynie wówczas, gdy jest bliżej (lub nie dalej) miejsca przeznaczenia niż "poprzedni" przekaźnik. Algorytm ten wykorzystuje zawsze najkrótszą drogę, jeżeli jednak jest ich kilka, to stacja docelowa otrzyma również kilka egzemplarzy tego samego pakietu. Pogarsza to co prawda przepustowość sieci, ale zwiększa odporność na błędy. Ponadto, algorytm ten może być wykorzystany dla bezpośredniej łączności pomiędzy stacjami lokalnymi, jak również może być użyty w sieciach mobilnych.

5. Problemy badawcze

W chwili obecnej interesujący jest problem współpracy sieci przewodowej, np. tradycyjnej sieci lokalnej, z siecią zbudowaną w oparciu o medium bezprzewodowe, np. fale radiowe lub podczerwień. Idea polega na połączeniu segmentów sieci lokalnej (np. Ethernet, Arcnet) za pomocą łącza bezprzewodowego (rys. 3). Połączenie to powinno być skonstruo-



Rys. 3. Połączenie segmentów sieci przewodowej za pomocą medium bezprzewodowego
Fig. 3. Connection of wired network segments by help of wireless medium

wane tak, aby fakt "przerwania" kabla był niewidoczny dla użytkownika. Co prawda rozwiązania takie na świecie są znane [3], jednak znaczne różnice w obowiązujących przepisach istotnie ograniczają możliwości zastosowania ich w Polsce. Urządzenia te wykorzystują fale radiowe lub podczerwień, współpracują z sieciami lokalnymi typu Ethernet lub Token-Ring i charakteryzują się dużą szybkością transmisji (2 ÷ 4 Mb/s), są jednak dość drogie (cena zestawu wynosi około 5000 dolarów).

Wobec powyższego konieczne jest zaprojektowanie odpowiedniego konwertera protokołu między przewodową siecią lokalną i wybranym łączem bezprzewodowym. Następnie należy zbadać wpływ takiego rozwiązania na przepustowość sieci (prędkość transmisji), a także jego odporność na zakłócenia. Wnioski wynikające z tych badań pozwolą na opracowanie praktycznych zasad konstrukcji tego typu urządzeń oraz doboru rodzaju i parametrów mediów bezprzewodowych w zależności od przewidywanych warunków pracy.

LITERATURA

[1] Tannenbaum A. S.: Sieci komputerowe. WNT, Warszawa 1988.

[2] Buchholz D., Odlyzko P., Taylor M., White R.: Wireless In-Building Networks Architecture and Protocols. IEEE Network Magazine, November 91, pp. 68-73.

[3] Berline G., Perratore E.: Wireless LANs. PC Magazine, 11.02.1992, pp. 291-314.

[4] Pahlavan K., Levesque A. H.: Wireless Data Communications. Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 9, September 1994, pp. 1398-1430.

[5] Killen H. B.: Transmisja cyfrowa w systemach światłowodowych i satelitarnych. WKiŁ, Warszawa 1992.

[6] Dąbrowski K.: Amatorska komunikacja cyfrowa. PWN, Warszawa 1994.

[7] Abramson N, Kuo F. F. (red.): Sieci telekomunikacyjne komputerów. WNT, Warszawa 1978.

[8] Pieniak J.: Anteny telewizyjne i radiowe. WKiŁ, Warszawa 1995.

[9] Wojnar A.: Systemy radiokomunikacji ruchomej lądowej. WkiŁ, Warszawa 1989.

[10] Mitzlaff J. E.: Radio Propagation and Anti-Multipath Techniques in the WIN Environment. IEEE Network Magazine, November 1991, pp. 21-26.

[11] McKown J. W., Hamilton R. L.: Ray Tracing as a Design Tool for Radio Networks. IEEE Network Magazine, November 1991, pp. 27-30.

[12] Bertoni H. L., Honcharenko W., Maciel L. R., Xia H. H.: UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications. Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 9, September 1994, pp. 1333-1359.

[13] Scourias J.: Overview of the GSM cellular system. http://ccnga.uwaterloo.ca/-~jscourias/GSM/gsmreport.ps, 19.05.1995.

[14] Padgett J. E., Günter C. G., Hattori T.: Overview of Wireless Personal Communications. IEEE Communications Magazine, January 1995, pp. 28-41.

[15] Falconer D. D., Adachi F., Gudmundson B.: Time Division Multiple Access Methods for Wireless Personal Communications. IEEE Communications Magazine, January 1995, pp. 50-57.

[16] Khan M., Kilpatrick J.: MOBITEX and Mobile Data Standards. IEEE Communications Magazine, March 1995, pp. 96-101.

[17] Radio Data Link Access Procedure, specyfikacja protokołu, Motorola Data Division, 1992.

[18] Fox T. L.: AX.25 Amateur Packet-Radio Link-Layer Protocol, specyfikacja protokołu, American Radio Relay Leangue, Inc., 1984.

[19] Caban D., Małysiak H., Zieliński B.: Możliwości realizacji bezprzewodowych segmentów sieci komputerowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Informatyka, Z. 30, Nr 1315, 1996, pp. 405-419.

[20] Links C., Diepstraten W., Hayes V.: Universal Wireless LANs. Byte, 5.1994, pp. 99-107.

[21] Rune T.: Wireless Local Area Networks. http://www.netplan.dk/netplan/wireless.htm.

[22] Opis standardu IrDA, Infrared Data Association, http://www.irda.org/irda/standard.html.

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Pach

Wpłynęło do Redakcji 19 września 1995 r.

Abstract

Wireless data communication can be used instead of wired connections when it is impossible, or not convenient, to use wires. Examples are mobile networks and networks that work in the presence of noise or on large non-wired areas.

Radio waves are an example of wireless transmission medium. Structure of digital radio communication system is shown on Fig. 1. Digital data must be processed before transmission; to do this, digital modulation is used. Some examples of modulation methods and their speeds are collected in Table 1. Equations (2) and (3) show the relation between this speed, carrier frequency and bandwidth, respectively. For frequencies 30 ÷ 1000 MHz the model of radio waves propagation is shown on Fig. 2. According to equations (5) to (11) broadcast covering can be computed. There are also shortly described spread spectrum techniques and problems corresponding to in-building radio waves propagation.

There are some known protocols of wireless data transmission. Because of their incompatibility, a project of a standard protocol is being prepared.

Wireless communication, especially for systems based on radio waves, brings about problems that are not so difficult to solve for wired networks. Examples are is bi-directional transmission, link access procedure and routing.

It is interesting nowadays how to connect wired network with a wireless one. An example of such a configuration is shown on Fig. 3. It is needed to create a protocol converter to make this kind of connection. This allows to determine the influence that introduction of a wireless medium has upon parameters of wired network.