

Ewolucja mobilnych sieci transmisji danych – od 0G do 3,5G

Przemysław Frasunek

Rys historyczny

Technologie 0G

Pierwsze próby budowania systemów teletransmisyjnych, umożliwiających przyłączenie mobilnych terminali radiowych do istniejących sieci telefonicznych sięgają lat 40. ubiegłego wieku. Jeden z takich systemów – MTS¹ opracowany przez laboratoria firmy Bell, zadebiutował komercyjnie w 1946 roku w USA. Zasada działania systemu była niezwykle prosta i zakładała pośrednictwo telefonistki w zestawianiu wszystkich połączeń, stąd brak konieczności stosowania jakichkolwiek protokołów sygnalizacyjnych. Głos przesyłany był z wykorzystaniem modulacji częstotliwościowej (FM), w paśmie radiowym UKF, w dwóch podzakresach – 35 MHz i 150 MHz, które tradycyjnie były już stosowane do krótkodystansowej radiokomunikacji. Duże gabaryty terminala mobilnego oraz bardzo niewielka pojemność systemu, pozwalająca na zestawienie zaledwie kilkunastu jednoczesnych rozmów w promieniu kilkudziesięciu kilometrów od stacji bazowej, spowodowały niską popularność tego rozwiązania.

W ciągu kolejnych kilkunastu lat, bardzo zbliżone systemy zostały wdrożone w wielu krajach europejskich, w tym również w Polsce, pod nazwą „Telefonia 160”. System zarządzany przez PPTiT, a później TP S.A. od lat 60. ubiegłego wieku, aż do końca lat 90. umożliwił połączenie z abonentami ruchomymi na terenie całego kraju. Radiotelefony samochodowe, pracujące w paśmie 160 MHz, posiadały sześciocyfrowe numery przywoławcze, unikalne w skali kraju, ale niezależne od numeracji PSTN. Zestawienie połączenia do abonenta ruchomego, wymagało kontaktu z telefonistką pod numerem 975, która „głosowo” próbowała wywołać docelowego abonenta. Identyfikacyjny, ale zamknięty system, eksploatowany był również przez Polskie Koleje Państwowe.

1G – NMT i AMPS

Powyższe technologie, nazywane obecnie standardami zerowej generacji (0G), ewoluowały w niewielkim zakresie. Najpoważniejszą zmianą było wprowadzenie automatycznego zestawiania połączeń przy użyciu akustycznej sygnalizacji tonowej (DTMF). Istotne innowacje wprowadzone zostały dopiero w latach 80., kiedy to zadebiutowały pierwsze prawdziwe sieci komórkowe, zbudowane w oparciu o standardy NMT² (w Europie) i AMPS³ (w USA), obecnie nazywane sieciami pierwszej generacji (1G). Ich wspólną cechą były dwie zasadnicze zmiany – wprowadzenie cyfrowej sygnalizacji pomiędzy urządzeniem mobilnym a stacją bazową oraz podział geograficznego obszaru działania sieci na podobszary, nazwane wówczas komórkami. Zmiany te zaowocowały całkowitą automatyzacją procesu zestawiania połączenia telefonicznego i włączeniem numeracji komórkowej do sieci PSTN – sieć „wiedziała” w której komórce znajduje się dany abonent ruchomy i niezwłocznie wywoływała jego terminal przenośny. Kanał radiowy, na którym przesyłany był - w dalszym ciągu analogowo - sygnał głosowy był przydzielany dynamicznie, tylko na czas trwania rozmowy. Taka optymalizacja wykorzystania pasma radiowego, połączona z dużą gęstością komórek, posiadających stosunkowo nieduży zasięg, spowodowała ogromny wzrost pojemności systemu w porównaniu do technologii 0G. Sieć zezwalała także na zmianę stacji bazowej, która obsługiwała abonenta ruchomego, podczas trwania połączenia, bez jego utraty, a korzystając z zewnętrznych modemów akustycznych FSK⁴, możliwe było transmitowanie danych z maksymalną prędkością 1200 bitów na sekundę. Wszystkie te cechy spowodowały szybką popularyzację telefonii komórkowej z której w połowie lat 80. w samej Norwegii korzystało ponad 60 tysięcy abonentów.

W Polsce, sieć telefonii komórkowej pierwszej generacji, opartej na standardzie NMT450i zbudowana została przez firmę PTK Centertel w 1992 roku. Pomimo stosunkowo wysokich cen, w

1995 roku liczba abonentów przekroczyła 50 tysięcy, a sieć objęła swoim zasięgiem całe terytorium kraju. Obecnie jest ona w dalszym ciągu aktywnie eksploatowana, przede wszystkim w roli systemu bezprzewodowej ostatniej mili dla ponad 200 tysięcy abonentów TP S.A. na terenach wiejskich.

Ewolucja obecnie wykorzystywanych systemów

2G – GSM

Wraz z dalszą popularyzacją telefonii komórkowej, zdefiniowane zostały cele dla systemów kolejnej generacji – jeszcze większa pojemność systemu, bezpieczeństwo i poufność rozmów oraz usługi dodatkowe. Zostały one osiągnięte w latach 90., wraz z wprowadzeniem w życie standardów DAMPS⁵ i IS-95⁶ (USA) oraz GSM (pozostałe kraje) – zastosowano w nich algorytmy wielodostępu do medium radiowego, a także wydajniejsze sposoby modulacji. Należy tutaj zwrócić uwagę, że w przeciwieństwie do telefonii pierwszej generacji, sieci drugiej generacji są de facto sieciami przeznaczonymi do transmisji danych, w szczególnym przypadku będących cyfrową reprezentacją mowy.

Najpopularniejszym na świecie systemem telefonii komórkowej jest GSM⁷, ustandaryzowany w 1992 roku. Korzysta z niego obecnie ponad 2 mld abonentów na całym świecie. Sieci GSM działają w czterech pasmach radiowych: 900/1800 MHz (najpopularniejsze), 850/1900 MHz (przede wszystkim w USA). Pasma podzielone jest na kanały o szerokości 200 kHz, osobne dla dwóch kierunków transmisji. Dane w obrębie każdego kanału przesyłane są korzystając z jednego z wariantów modulacji częstotliwościowej FSK – GMSK⁸, dając sumaryczną przepływność ok. 270 kbit/s. Dodatkowo, każdy kanał podzielony jest na osiem szczelin czasowych, pozwalając tym samym na prowadzenie ośmiu niezależnych transmisji w ramach tego samego kanału radiowego o przepływnościach ok. 33 kbit/s. Taki sposób podziału pasma zwany jest wielodostępem TDMA⁹. Dodatkowy wzrost pojemności sieci

osiągnięto przez gęste rozlokowanie dużej ilości stacji bazowych, z których każda dysponuje bardzo małą mocą radiową, a więc i niewielkim zasięgiem.

Bezpieczeństwo sieci GSM osiągnięto przez wprowadzenie kryptograficznego uwierzytelniania abonenta sieci, w oparciu o klucz prywatny, przechowywany na karcie SIM¹⁰. Dane przesyłane na interfejsie radiowym są szyfrowane przy użyciu algorytmu symetrycznego A5 i losowego klucza, uzgodnionego w fazie logowania do sieci.

2,5G – GPRS

Głos przesyłany w sieciach GSM, kompresowany jest przy pomocy adaptacyjnego algorytmu, w wyniku działania którego powstaje sygnał cyfrowy o przepływności ok. 13 kbit/s. Terminale GSM standardowo umożliwiają także przesyłanie danych w ramach pojedynczej szczeliny czasowej, z maksymalną prędkością 9600 bitów na sekundę oraz w ramach kanału sygnalizacyjnego – wiadomości tekstowych o maksymalnej długości 1120 bitów (160 siedmiobitowych znaków). Przepływność ta okazała się niewystarczająca w dobie popularyzacji sieci Internet, a główne ograniczenie technologiczne leżało na poziomie interfejsu radiowego. Aby temu zaradzić, wprowadzone zostały dwie modyfikacje do standardu GSM – HSCSD¹¹ oraz GPRS¹². Pierwsza z nich opierała się na prostym pomysłem agregowania szczelin czasowych oraz zmniejszenia nadmiarowości kodowania, co pozwoliło na uzyskanie prędkości nawet 57,6 kbit/s (4 szczeliny czasowe, każda po 14,4 kbit/s). Alternatywny substandard GPRS opierał się na zdecydowanie innym mechanizmie – zrezygnowano tu z połączeniowej natury sieci GSM i zezwolono terminalowi mobilnemu na dynamiczne wykorzystywanie szczelin czasowych niezajętych przez połączenia głosowe. W połączeniu z dalej idącym zmniejszaniem nadmiarowości kodowania, możliwe jest osiągnięcie prędkości nawet 171,2 kbit/s (8 szczelin czasowych, każda po 21,4 kbit/s), zakładając brak obciążenia sieci połączeniami głosowymi, jednak w praktyce, przepływność rzadko

przekracza ok. 40 kbit/s. Wdrożenie technologii GPRS wymaga od operatora modyfikacji w strukturze sieci GSM oraz budowy szkieletu IP. Sieci GSM wspierające transmisję pakietową GPRS określane są mianem sieci 2,5G.

2,75G – EDGE

Dalsza ewolucja sieci GSM miała na celu umożliwienie transmisji danych z jeszcze wyższymi prędkościami przy niewielkich nakładach finansowych, wynikających z konieczności modyfikacji istniejącej infrastruktury. Osiągnięto to poprzez zmianę opisaną już wcześniej małą wydajnej modulacji GMSK na 8PSK¹³ dla wybranych szczelin czasowych, na których obecnie przebiega transmisja pakietowa. Substandard ten, określony mianem EDGE¹⁴ (2,75G), umożliwił prawie trzykrotne zwiększenie maksymalnych prędkości transmisji danych aż do teoretycznego poziomu 473,6 kbit/s przy zajęciu wszystkich ośmiu szczelin czasowych, jednak w praktyce, z powodu obciążenia sieci połączeniami głosowymi, przepływności powyżej 160 kbit/s są rzadko możliwe do osiągnięcia. Wdrożenie EDGE wymaga jednak sprzętowych modyfikacji na każdej stacji bazowej, co ogranicza dostępność usługi do terenów miejskich i podmiejskich.

3G – UMTS

W połowie lat 90., w obliczu przewidywanego braku możliwości dalszej niskonakładowej ewolucji standardów drugiej generacji, podjęto decyzję o stworzeniu specyfikacji, istotnie zmieniającej sposób budowy sieci komórkowych i nastawionej na współistnienie, a w przyszłości – stopniowe wypieranie standardów 2G. Tą specyfikacją jest UMTS¹⁵ – telefonia komórkowa trzeciej generacji, posiadająca zasadniczo inny interfejs radiowy, pracujący w paśmie 2,1 GHz z wykorzystaniem modulacji QPSK i wielodostępu do medium CDMA¹⁶, polegającego na przypisaniu każdemu urządzeniu niezależnego kodu (sekwencji rozpraszającej), który nie będzie powodować konfliktów podczas jednoczesnego nadawania. Pojedynczy kanał radiowy o szerokości 5 MHz pozwala na transmisję danych z

przepływnością ok. 2,3 Mbit/s, co przy zastosowaniu nadmiarowej korekcji błędów, przekłada się na maksymalnie 196 jednoczesnych rozmów telefonicznych lub transmisję pakietową z szybkością do 1,92 Mbit/s. W dalszych rewizjach specyfikacji UMTS przewidziano także zmianę infrastruktury sieci podkładowej i migrację w kierunku protokołu IP na bazie sieci Ethernetowych, zamiast tradycyjnie stosowanych interfejsów E1 i sygnalizacji SS7¹⁷.

Pierwsze, komercyjne sieci oparte o standard UMTS zaczęły być eksploatowane na świecie w 2002 roku, a w Polsce – w 2004 roku. Obecnie, technologie UMTS i EDGE dostępne są za pośrednictwem operatorów Plus, Era i Orange w większości dużych miast w Polsce. Ich powszechność doprowadziła do zdefiniowania szeregu nowych usług trzeciej generacji, takich jak wideokonferencje, push-to-talk, czy wideo na żądanie, jednak w dalszym ciągu, najważniejszą usługą 3G jest pakietowy dostęp do Internetu, oferowany w formie usługi abonamentowej, bez konieczności ponoszenia opłat za przesłanie każdego megabajta. Na bazie takiego właśnie dostępu, ATM w 2005 roku zbudował sieć rozległą na potrzeby terminali Indoor TV, złożoną z kilkuset terminali wyposażonych w karty UMTS. Sumaryczne przepływności osiągane w tej sieci podczas transmisji materiałów reklamowych, dochodzą nawet do 100 Mbit/s.

Perspektywy dalszego rozwoju

Trendy rozwoju sieci komórkowych nierozłącznie związane są z usługami multimedialnymi, w szczególności zaś z triple-play, który – jak do tej pory – był oferowany głównie przez operatorów telewizji kablowej i telekomy, posiadające infrastrukturę xDSL¹⁸. Świadczenie takich usług wymaga łącz abonenckich o przepływności przynajmniej kilku megabitów, co jest stosunkowo trudne do osiągnięcia przy pomocy technologii radiowych, w szczególności zaś, tych funkcjonujących w istniejących sieciach komórkowych. Na

rynku istnieje kilka, zasadniczo różniących się od siebie rozwiązań, które pozwalają na sprostanie wymaganiom wydajnościowym, stawianym przez usługi multimedialne.

WiMAX

Jednym z takich rozwiązań jest WiMAX, będący dość luźnym standardem definiującym radiowe sieci miejskie, działające w różnych pasmach mikrofalowych i pozwalające na dwukierunkową transmisję danych z przepływnościami do kilkudziesięciu megabitów na sekundę. Na rynku istnieje jednak stosunkowo niewiele terminali abonenckich WiMAX, głównie stacjonarnych, a biorąc pod uwagę niekompatybilność ze standardami używanymi w telefonii komórkowej, budowa sieci WiMAX wiąże się z dużymi nakładami finansowymi.

DVB-H

Kolejną możliwością jest zastosowanie standardu DVB-H¹⁹, będącego uzupełnieniem naziemnych sieci rozsywczyczych DVB-T i umożliwiającego nadawanie jednokierunkowych, cyfrowych strumieni MPEG2 i MPEG4 o przepływnościach do kilkunastu megabitów na sekundę, w założeniu przeznaczonych przede wszystkim dla przenośnych urządzeń. Kanał zwrotny implementowany jest w oparciu o istniejące sieci GSM/EDGE i UMTS.

3,5G – HSDPA

Standardem najbardziej komponującym się z istniejącymi sieciami komórkowymi jest HSDPA²⁰, określanym mianem technologii 3,5G i wymagającym stosunkowo niewielkich zmian w infrastrukturze istniejących sieci UMTS. Maksymalna teoretyczna przepływność to 14,4 Mbit/s, osiągana dzięki zastosowaniu wydajniejszego typu modulacji (16QAM²¹) oraz inteligentnemu kolejkowaniu pakietów wysyłanych przez stację bazową – kolejność zależy od jakości sygnału odbieranego przez urządzenie przenośne. Ze względu na istotny problem zmiennej jakości sygnału, wynikającej ze zmian położenia przenośnego urządzenia, wdrożono także inkrementalny i nadmiarowy mechanizm

korekcji błędów (HARQ²²). Pozwala on na odzyskanie nieznacznie uszkodzonych pakietów danych, a w przypadku braku takiej możliwości, retransmisji ulega nie cały pakiet, a jedynie transmitowane są kolejne nadmiarowe informacje, które docelowo pozwolą na odbudowę uszkodzonego pakietu.

Komercyjne wdrożenia HSDPA w polskich sieciach komórkowych zakończone zostaną jeszcze w 2006 roku. Początkowo, maksymalna możliwa do uzyskania przepływność będzie na poziomie 2 Mbit/s.

Kolejne rewizje standardu HSDPA pozwolą na zwielenokrotnienie maksymalnej przepływności przez zastosowanie wielu anten nadawczo-odbiorczych i wykorzystanie wielu ścieżek propagacji fal radiowych (MIMO²³). Rozważane jest także zastosowanie transmisji OFDM²⁴, zakładającej podział strumienia bitów na wiele podstrumieni, emitowanych jednocześnie w osobnych podkanałach.

¹ Mobile Telephone System

² Nordic Mobile Telephone

³ Advanced Mobile Phone System

⁴ Frequency Shift Keying – najprostszy sposób cyfrowej modulacji, w której bity reprezentowane są przez dwie różne częstotliwości sygnału o stałej amplitudzie

⁵ Digital Advanced Mobile Phone System

⁶ Interim Standard 95 – standard, znany również pod handlową nazwą cdmaOne, zaproponowany przez firmę Qualcomm i oparty o technologię CDMA

⁷ Global System for Mobile Communications

⁸ Gaussian Minimum Shift Keying – sposób cyfrowej modulacji, zbliżony do FSK, z impulsami o kształcie gaussowskim zamiast prostokątnego, co wpływa na zmniejszenie interferencji pomiędzy kanałami

⁹ Time Division Multiple Access

¹⁰ Subscriber Identity Module

¹¹ High Speed Circuit Switched Data

¹² General Packet Radio Service

¹³ Phase Shift Keying – sposób cyfrowej modulacji, w które bity lub grupy bitów (symbole) reprezentowane są przez przesunięcia fazy sygnału o stałej amplitudzie i częstotliwości

¹⁴ Enhanced Data rates for GSM Evolution

¹⁵ Universal Mobile Telephone System

¹⁶ Code Division Multiple Access

¹⁷ Signaling System 7

¹⁸ Digital Subscriber Line

¹⁹ Digital Video Broadcasting - Handheld

²⁰ High Speed Downlink Packet Access

²¹ Quadrature Amplitude Modulation – sposób cyfrowej modulacji, w której bity lub grupy bitów

(symbole) reprezentowane są przez zmiany amplitudy dwóch sinusoidalnych sygnałów, przesuniętych w fazie o 90°

²² Hybrid Automatic Repeat-reQuest

²³ Multiple input, multiple output

²⁴ Orthogonal Frequency Division Multiplexing