Pomiary stopy błędów urządzeń cyfrowych linii radiowych

Jan Bogucki

Rozpatrzono zagadnienie pomiaru cyfrowych urządzeń horyzontowych linii radiowych. Przedstawiono sposób pomiaru stopy błędów urządzeń, ze szczególnym zwróceniem uwagi na badanie własnej i szczątkowej elementowej stopy błędów.

linie radiowe, urządzenia, jakość transmisji

Wprowadzenie

Wymagania dotyczące urządzeń cyfrowych linii radiowych [3, 6, 9] oraz sposób pomiaru [11] ich parametrów są jednoznacznie określone w dokumentach ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), normach europejskich EN (*European Standard*) i zaleceniach ITU (*International Telecommunication Union*) [10]. Testując linię radiową mierzy się wiele parametrów, takich jak: moc wyjściowa, rozkłady widma, emisje uboczne, tolerancje częstotliwości, tłumienność niedopasowania, tłumienie sygnału o częstotliwości lustrzanej, poziom mocy sygnału generatora lokalnego na wejściu odbiornika, sygnały progowe, odporność na zakłócenia, zakres działania automatycznej regulacji wzmocnienia i własną elementową stopę błędów. Pomiary te, w zależności od typu badanej linii radiowej i dostępnych urządzeń pomiarowych, są bardziej lub mniej pracochłonne i czasochłonne.

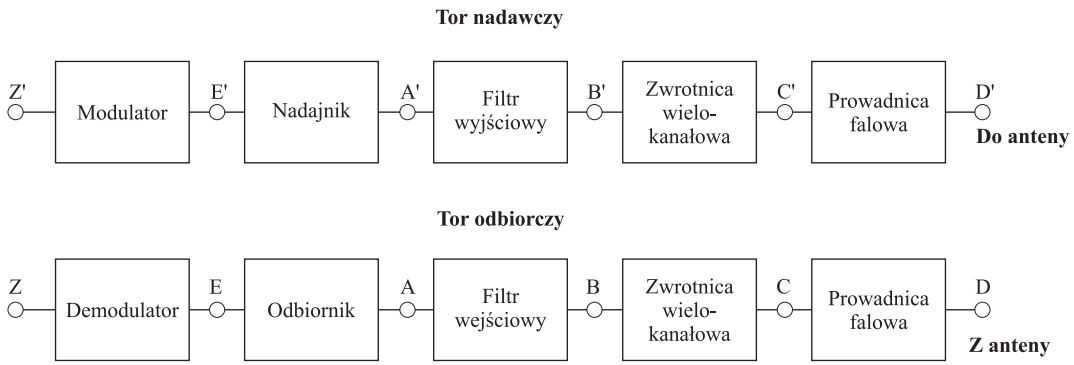
Szczególnie uciążliwe jest badanie własnej elementowej stopy błędów. Podczas pomiaru urządzenie powinno pracować w warunkach odpowiadających normalnym warunkom pracy, a własna elementowa stopa błędów powinna być mierzona w określonym – ale niestety dość długim – czasie, np. 24 godzin. Wynika to z właściwości tego parametru, co uwzględniono w wymaganiach dotyczących urządzeń linii radiowych [7, 8]. ETSI systematycznie prowadzi modyfikację wymagań i metody pomiarowej własnej elementowej stopy błędów. W artykule opisano dotychczas wykonywane pomiary własnej elementowej stopy błędów BBER (*Background Bit Error Rate*) i nowo zaproponowanej przez ETSI szczątkowej elementowej stopy błędów RBER (*Residual Bit Error Rate*).

Urządzenia linii radiowej

Teletransmisyjna linia radiowa (rys. 1) umożliwia przesyłanie sygnałów między dwoma punktami przestrzeni za pomocą fal elektromagnetycznych, rozchodzących się wzdłuż trasy określonej przede wszystkim kierunkowymi właściwościami anten. Systemy horyzontowych linii radiowych należą do systemów telekomunikacyjnych, które realizują bezprzewodowe kanały transmisyjne. W skład linii radiowej wchodzi wiele urządzeń, a elementem sprzęgającym antenę nadawczą i odbiorczą jest środowisko propagacji fal elektromagnetycznych – atmosfera ziemska [2]. W cyfrowych liniach radiowych stosuje się modulacje kluczowane: kluczowanie częstotliwości FSK (*Frequency Shift Key*), kluczowanie fazy PSK (*Phase Shift Keying*) lub modulacje wielopoziomowe. Praktycznie nie jest

wykorzystywane kluczowanie z przesuwem amplitudy ASK (*Amplitude Shift Key*) ze względu na jego dużą wrażliwość na zakłócenia zewnętrzne oraz nieefektywne wykorzystanie mocy nadajnika.

Większość urządzeń cyfrowych linii radiowych pracuje z modulacją fali ciągłej pośredniej częstotliwości, lecz w niektórych urządzeniach jest stosowana modulacja bezpośrednia fali ciągłej bardzo wielkiej częstotliwości. Natomiast przy odbiorze sygnałów cyfrowych jest powszechnie stosowana detekcja koherentna.



Rys. 1. *Schemat blokowy linii radiowej*

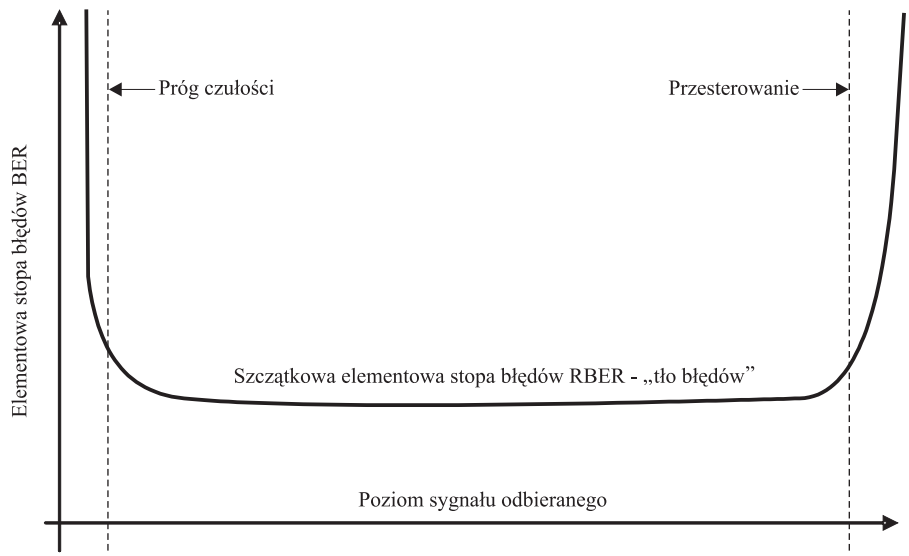
Podstawowymi parametrami stacji nadawczo-odbiorczej są:

- **czułość odbiornika** – z charakterystyki elementowej stopy błędów w funkcji mocy odbieranej definiuje się minimalną wartość mocy sygnału na wejściu odbiornika, zapewniającą określoną wartość elementowej stopy błędów mniejszą niż przewidziano w normie dla danego typu urządzenia; pomiar powinien być dokonany w warunkach odpowiadających warunkom pracy, bez zakłóceń, z poziomem mocy sygnału wejściowego odniesionym do pkt. B (rys. 1);
- **własna elementowa stopa błędów** określa stabilność parametrów urządzenia, tzw. „tło błędów"; należy ją mierzyć w warunkach pracy bez zakłóceń z odpowiednim poziomem mocy sygnału wejściowego odniesionym do pkt. B (rys. 1); jest ona mierzona zwykle w ciągu 24 godzin;
- **odporność na zakłócenia sąsiedniokanałowe i wspólnokanałowe** – w rzeczywistych warunkach często na jedną wspólną antenę pracuje kilka urządzeń nadawczo-odbiorczych; odporność na zakłócenia określa minimalną wartość mocy sygnału na wejściu odbiornika do pkt. B (rys. 1) i maksymalny poziom sygnału zakłócającego, przy których BER $= 10^{-6}$ dla danego stosunku mocy sygnału do mocy zakłóceń;
- **odporność na zakłócenia falą ciągłą** – w odbiorniku, pracującym z poziomem sygnału wejściowego równym wartości mocy sygnału progowego dla BER $= 10^{-6}$, wprowadzenie sygnału zakłócającego w postaci niemodulowanej fali ciągłej o poziomie mocy o 30 dB większym od poziomu sygnału pożądanego i o dowolnej częstotliwości, z wyjątkiem przedziału częstotliwości o szerokości dwóch odstępów kanałowych, nie powinno powodować wzrostu wartości BER powyżej 10^{-5};
- **poziom mocy sygnału generatora lokalnego na wejściu odbiornika** – poziom mocy sygnału generatora lokalnego, będącego częścią odbiornika, mierzony w pkt. B (rys. 1), powinien być nie większy niż przewidziano w normie dla danego typu urządzenia;

- **tolerancja częstotliwości generatora lokalnego** – niedokładność nastawienia częstotliwości i czynniki krótkookresowe oraz długookresowe nie powinny powodować zmian tolerancji częstotliwości generatora lokalnego większych niż dopuszczono w normie dla danego typu urządzenia;
- **tłumienie sygnału o częstotliwości lustrzanej** nie powinno być mniejsze niż przewidziano w normie dla danego typu urządzenia;
- **poziom mocy i tolerancja częstotliwości nadajnika** powinny być zgodne z wymaganiami dla danego typu urządzenia;
- **poziom emisji ubocznych**, mierzony w pkt. C' (rys. 1), nie powinien być większy niż przewidziano w normie dla danego typu urządzenia.

Stopy błędów

W liniach radiowych liczba przesyłanych błędnych bitów jest funkcją poziomu sygnału odbieranego RSL (*Received Signal Level*). Bardzo słabe sygnały są transmitowane z wieloma błędnymi bitami. Poziom sygnału transmisji, przy którym następuje zmiana z kilku do wielu błędów, jest nazywany progiem czułości odbiornika. Gdy natężenie sygnału odbieranego wzrasta, wówczas liczba błędów maleje do bardzo małego poziomu, zwanego „tłem błędów" (rys. 2). Gdy poziom sygnału odbieranego jeszcze wzrasta i osiąga punkt, powyżej którego odbiornik jest przesterowany, wówczas liczba błędnych bitów zaczyna gwałtownie wzrastać.



Rys. 2. *Zmiany elementowej stopy błędów w zależności od poziomu sygnału odbieranego*

Jednym z parametrów określających jakość linii radiowej są stopy błędów: elementowa stopa błędów, własna elementowa stopa błędów i szczątkowa elementowa stopa błędów.

Elementowa stopa błędów BER (*Bit Error Rate*) jest parametrem statystycznym i dobrze oddaje jakość transmisji tylko wtedy, gdy błędy są spowodowane głównie przez addytywny szum gaussowski, natomiast w przypadku błędów seryjnych są potrzebne inne miary jakości transmisji.

Własna elementowa stopa błędów BBER lepiej określa jakość urządzeń, a ponadto wykonywana w warunkach laboratoryjnych precyzuje tylko parametry zestawu nadawczo-odbiorczego, eliminując czynniki propagacyjne, co jest niewątpliwie zaletą tej metody. Mierzy się wówczas, przy nominalnym poziomie sygnału wejściowego, czas transmisji z wieloma błędami SES (*Severely Errored Second*), tzn. policzonymi w czasie jednej sekundy, w sytuacji gdy w odbieranym sygnale cyfrowym stopa błędu jest większa od wartości wymaganej.

Szczątkowa elementowa stopa błędów RBER daje bardziej miarodajną ocenę jakości urządzeń cyfrowych linii radiowych niż pomiar własnej elementowej stopy błędów. Mierzy się wówczas liczbę sekund z błędami ESR (*Errored Second Rate*), tzn. liczbę jednosekundowych okresów czasu, w których w odbieranym sygnale cyfrowym wystąpił przynajmniej jeden błąd. Umożliwia to precyzyjną ocenę jakości urządzeń cyfrowej linii radiowej w warunkach pracy bez zaników sygnału, ale z uwzględnieniem własnych błędów, wpływu środowiska, a przede wszystkim efektu interferencji. Pomiar wykonuje się przy nominalnym poziomie sygnału odbiornika, ale w obecności zakłócającego sygnału interferującego.

Własna elementowa stopa błędów

Własna elementowa stopa błędów BBER określa jakość urządzeń danej linii radiowej w normalnych warunkach jej pracy bez zakłóceń wspólnokanałowych i sąsiedniokanałowych.

Warunki pomiarów własnej elementowej stopy błędów

Własną elementową stopę błędów urządzenia odbiorczego należy mierzyć w warunkach odpowiadających normalnym warunkom pracy przęsła linii radiowej, bez zakłóceń, z poziomem mocy sygnału wejściowego (odniesionym do wejścia urządzenia przed zwrotnicą wielokanałową – pkt. C na rys. 1) o 10 dB większym od wyznaczonego poziomu mocy sygnału progowego dla wartości elementowej stopy błędów BER = 10^{-6}. Wartość elementowej stopy błędów BER jest zdefiniowana jako stosunek błędnie odtworzonych bitów (0 zamiast 1 lub 1 zamiast 0) do całkowitej liczby bitów przesłanych w określonym przedziale czasu:

$$\mathrm{BER} = \frac{\text{liczba bitów błędnie odebranych}}{\text{całkowita liczba bitów nadanych}}.$$

Własna elementowa stopa błędów urządzenia odbiorczego cyfrowej linii radiowej, mierzona w ciągu 24 godzin, nie powinna być wówczas większa niż:

- 10^{-10} w przypadku linii o przepływności do 34 Mbit/s;
- 10^{-11} w przypadku linii o przepływności powyżej 34 Mbit/s.

Definiuje się też minimalny czas trwania pomiaru w zależności od przepływności badanej cyfrowej linii radiowej i określa liczbę błędów, jakie mogą pojawić się w tym czasie (tabl. 1). W rzeczywistych warunkach transmisji zawsze towarzyszą szumy, które mogą objawić się jako:

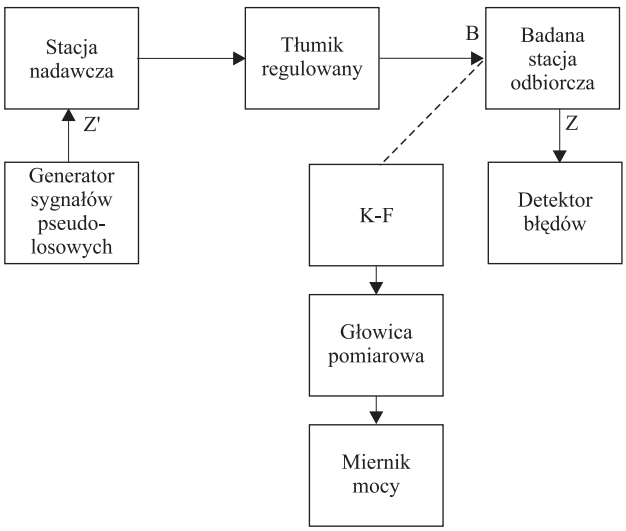
- **błąd podstawienia** – synchronizator elementowy zastępuje omyłkowo zero jedynką lub odwrotnie jedynkę zerem;
- **błąd straty** – zegar elementowy rozstraja się skokowo i zostaje zgubiony bit danych;
- **błąd nadmiaru** – w zegarze elementowym powstaje dodatkowy impuls, co jest źródłem dodatkowego bitu.

Tabl. 1. Dopuszczalna liczba błędów wykryta podczas testu BBER dla linii o przepływności od 2 Mbit/s do STM-1 (Synchronous Transport Module Level 1)

Przepływność [Mbit/s]	Minimalny czas pomiaru [godz]	Maksymalna liczba błędów
2	24	17
8	16	38
34	24	27
51	16	27
140/STM-1	8	36/41

Pomiary własnej elementowej stopy błędów

Pomiary własnej elementowej stopy błędów przeprowadza się w takim układzie, jak na rys. 3.



Rys. 3. *Układ do pomiaru własnej elementowej stopy błędów*

Wymagane są następujące przyrządy:

– generator sygnałów pseudolosowych,
– tłumik regulowany,
– miernik mocy wraz z głowicą pomiarową,
– detektor błędów.

Przed pomiarami BBER należy ustawić wymagany poziom mocy sygnału progowego na wejściu odbiornika, a tym samym należy wykonać pomiary parametrów stacji nadawczej, która będzie wykorzystywana jako źródło znanego sygnału pseudolosowego. Pomiary te – sprawdzające tylko zgodność parametrów deklarowanych przez producenta – powinny obejmować:

– pomiar częstotliwości fali nośnej,
– pomiar rozkładu widma sygnału,
– pomiar mocy wyjściowej.

Przy wykonywaniu pomiaru stacja nadawcza jest w trybie normalnej pracy (sygnał zmodulowany), a generator sygnałów pseudolosowych, dołączony do wejścia stacji nadawczej, zapewnia odpowiednią długość sekwencji ciągu bitów ($2^{15}-1$ lub $2^{23}-1$) oraz odpowiedni kod: HDB3 (*High Density Bipolar Order 3*) lub CMI (*Coded Mark Inversion*). Nadajnik emituje sygnał o poziomie mocy, zgodnie ze specyfikacją dla danego urządzenia, o 10 dB większym od poziomu mocy sygnału progowego dla elementowej stopy błędów BER $= 10^{-6}$. Przykładowo dla linii radiowej z modulacją 4-wartościową, np. 4-FSK lub 4-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), pracującej z przepływnością 2×8 Mbit/s w pasmie 38 GHz, poziom mocy dla elementowej stopy błędów BER $= 10^{-6}$ jest równy $-73{,}5$ dBm. Po wymaganym okresie pracy urządzenia, np. 24 godz., odczytuje się zmierzoną, za pomocą detektora błędów, wartość BBER. Uzyskany wynik porównuje się z wymaganiami dla danego typu urządzeń linii radiowej.

Szczątkowa elementowa stopa błędów

Szczątkowa elementowa stopa błędów RBER dostarcza operatorowi sieci informacji o jakości zastosowanych urządzeń, a mianowicie cyfrowego modulatora, nadajnika, odbiornika i demodulatora, a więc określa, czy modem i układy wielkiej częstotliwości, zapewniają transmisję sygnału, przy zachowaniu odpowiedniego „tła błędów".

Warunki pomiaru szczątkowej elementowej stopy błędów RBER są symulacją pracy urządzeń linii radiowej w obecności zakłóceń. Umożliwia to zmniejszenie czasu pomiaru (w porównaniu z BBER) kosztem rozbudowania układu pomiarowego. Poza tym przybliża warunki pomiaru do rzeczywistych, gdy urządzenie często pracuje w obszarze ze szczególnie dużym zagęszczeniem linii radiowych [1, 5].

Warunki pomiarów szczątkowej elementowej stopy błędów

Szczątkową elementową stopę błędów urządzenia należy mierzyć w warunkach odpowiadających pracy przęsła linii radiowej w warunkach zakłóceń. Poziom mocy sygnału wejściowego (odniesionego do wejścia urządzenia przed zwrotnicą wielokanałową – pkt. C na rys. 1) powinien być większy o 15 dB ÷ 35 dB od poziomu mocy sygnału progowego dla elementowej stopy błędów BER = 10^{-6}. Natomiast sygnałem zakłócającym jest sygnał o częstotliwości pierwszego kanału sąsiedniego analogicznie zmodulowanego o poziomie mocy:

- mniejszym o 4 dB od poziomu mocy sygnału pożądanego, dla urządzeń z 64- lub 128- wartościową modulacją (np. 64 QAM lub 128 QAM) – dla urządzeń klasy 5a [4]; w klasie 5a są urządzenia o przepływności 155 Mbit/s z ortogonalnym polaryzacyjnie 28 MHz kanałem sąsiednim ACAP (*Adjacent Channel Alternate Polarization*) [4];
- większym o 3 lub 4 dB od poziomu mocy sygnału pożądanego, dla urządzeń z 64- lub 128-wartościową modulacją (np. 64 QAM lub 128 QAM) – dla urządzeń klasy 5b [5]; w klasie 5b są urządzenia o przepływności 155 Mbit/s ze zgodnym polaryzacyjnie 28 MHz kanałem sąsiednim ACCP (*Adjacent Channel Co-Polarization*) [4];
- większym o 6 dB od poziomu mocy sygnału pożądanego – dla pozostałych urządzeń.

Określa się minimalny czas pomiaru, w którym nie powinny pojawić się błędy (tabl. 2).

Tabl. 2. Minimalny czas pomiaru RBER bez występowania błędów

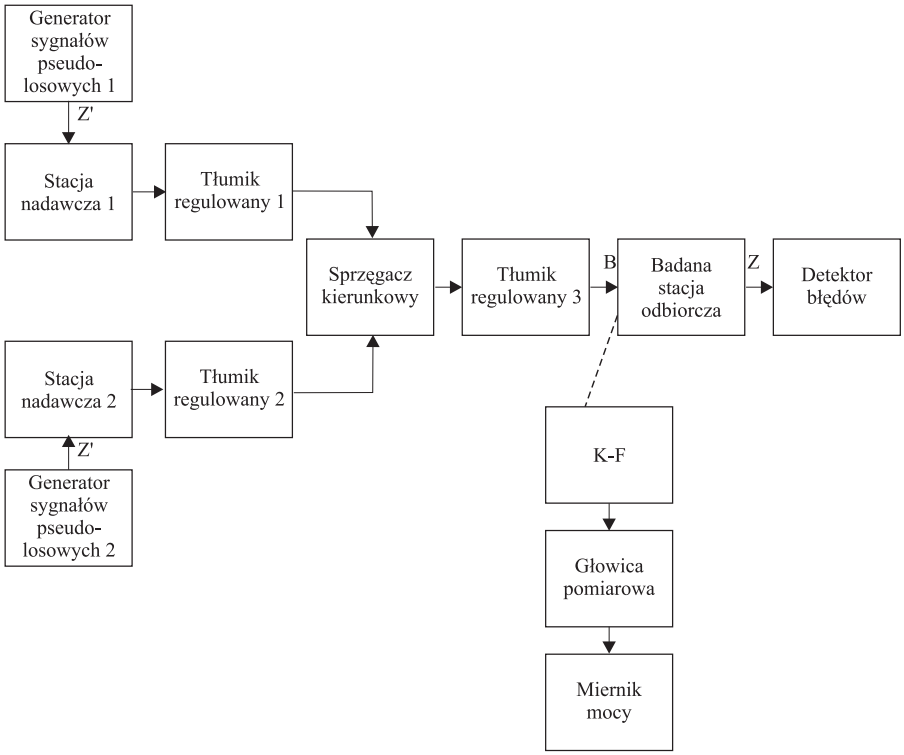
Przepływność [Mbit/s]	Minimalny czas pomiaru [min]	Błędy
2	82	0
8	21	0
34	50	0
51	34	0
140/STM-1	108	0
622	27	0

Pomiary szczątkowej elementowej stopy błędów

Pomiary szczątkowej elementowej stopy błędów przeprowadza się w układzie takim, jak na rys. 4, przy czym stacja nadawcza 1 i badana stacja odbiorcza stanowią właściwy zestaw nadawczo-odbiorczy przęsła linii radiowej, natomiast stacja nadawcza 2 jest stacją zakłócającą.

Na wyjściach stacji nadawczych znajdują się trakty falowodowe, zawierające mikrofalowe tłumiki regulowane dołączone do odpowiednich wrót sprzęgacza kierunkowego, którego trzecie wrota są połączone przez trzeci tłumik regulowany z wejściem falowodowym badanego odbiornika (na rys. 1 – punkt B dla urządzeń jednokanałowych, a punkt C dla urządzeń wielokanałowych).

Zakres nastawianych wartości tłumienności w traktach falowodowych jest tak dobrany, aby zapewnić pożądane zakresy poziomów mocy sygnałów na wejściu odbiornika.



Rys. 4. *Układ do pomiaru szczątkowej elementowej stopy błędów*

Wymagane są następujące przyrządy:

– generator sygnałów pseudolosowych,
– trzy tłumiki regulowane,
– miernik mocy wraz z głowicą pomiarową,
– detektor błędów.

Do wejść stacji nadawczych (punkty Z') są dołączone niezależne generatory pomiarowe generujące pseudoprzypadkowe sekwencje bitowe o strukturze ramki sygnału. Natomiast do wyjścia stacji odbiorczej (punkt Z) jest dołączony detektor błędów porównujący bity odebrane z bitami nadawanymi.

Przy wykonywaniu pomiaru stacja nadawcza jest w trybie normalnej pracy (sygnał zmodulowany), a generator sygnałów pseudolosowych, dołączony do wejścia stacji nadawczej zapewnia odpowiednią długość sekwencji ciągu bitów ($2^{15} - 1$ lub $2^{23} - 1$) oraz odpowiedni kod: HDB3 lub CMI. Nadajnik powinien emitować sygnał o poziomie mocy, zgodnie ze specyfikacją dla danego urządzenia, od 15 dB do 35 dB większy od poziomu mocy sygnału progowego dla elementowej stopy błędów BER = 10^{-6}.

Przykładowo, dla linii radiowej z modulacją 16- lub 32-wartościową, np. 16 QAM lub 32 QAM, pracującej z przepływnością 155 Mbit/s w pasmie 38 GHz, poziom mocy dla elementowej stopy błędów BER = 10^{-6} jest równy –62,5 dBm. Następnie włącza się zakłócającą stację nadawczą 2, z modulacją taką samą jak w nadajniku 1, pracującą na częstotliwości dolnego lub górnego sąsiedniego kanału, a za pomocą tłumika 2 ustawia się wymaganą moc (patrz: warunki pomiarów).

Po wymaganym okresie pracy urządzenia (np. 82 min) odczytuje się wartość RBER. Uzyskany wynik porównuje się z wymaganiami dla danej linii radiowej.

Wnioski

Przy badaniu urządzeń linii radiowych jest istotne określenie „tła błędów", tzn. wpływu zewnętrznych i lokalnych sygnałów zakłócających, nieidealności modemu, fluktuacji fazowych w układach regeneracji nośnej i taktu, wpływu nieliniowej charakterystyki fazowej kanału transmisyjnego oraz nieidealności układów próbkujących i decyzyjnych.

Dotychczasowa metoda pomiaru elementowej stopy błędów polegała na pomiarze własnej elementowej stopy błędów (BBER), który jest uciążliwy ze względu na dość długi czas jego trwania, np. 24 godziny.

Zaproponowana nowa metoda, sprowadzona do pomiaru szczątkowej elementowej stopy błędu (RBER), trwa kilkadziesiąt minut i jest przeprowadzana w warunkach bardziej zbliżonych do rzeczywistych, gdyż w obecności sygnału zakłócającego.

Zmiana metody pomiaru elementowej stopy błędów ma ważne znaczenie dla producentów urządzeń linii radiowych, a także dla laboratoriów akredytowanych przeprowadzających takie badania.

Bibliografia

[1] Bogucki J.: *Cyfrowe linie radiowe z odbiorem zbiorczym*. Infotel, 1999, nr 4, s. 12–14

[2] Bogucki J.: *Struktura i częstotliwości horyzontowych linii radiowych*. Elektronizacja, 2000, nr 7-8, s. 13–16

[3] Bogucki J.: *Wpływ warunków propagacji na niezawodność pracy horyzontowych linii radiowych*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 1997, nr 3, s. 159–164

[4] Bogucki J.: *Współczesne cyfrowe systemy radiowe łączności stałej*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 2004, nr 4, s. 180–184

[5] Bogucki J.: *Zakłócenia interferencyjne*. Infotel, 2001, nr 9, s. 83–86

[6] Bogucki J., Wielowieyska E.: *Propagation reliability of line-of-sight radio relay systems above 10 GHz*. W: Materiały z międzynarodowej konferencji *17th International Wrocław Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, Wrocław, Poland, 2004, s. 37–40

[7] EN 300 197 V1.6.1: *Fixed Radio Systems; Point-to-point equipment; Parameters for radio systems for the transmission of digital signals operating at 32 GHz and 38 GHz*. 2002

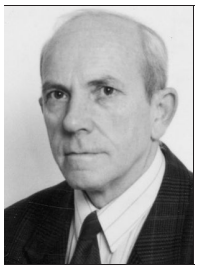
[8] EN 300 234 V1.3.2: *Fixed Radio Systems; Point-to-point equipment; High capacity digital radio systems carrying 1 × STM-1 signals and operating in frequency bands with about 30 MHz channel spacing and alternated arrangements*. 2001

[9] Gęborys L., Dumania E.: *Metodyka projektowania cyfrowych linii radiowych*. Prace IŁ, 1991, nr 98, s. 91–142

[10] ITU-R F.634-4: *Error performance objectives for real digital radio-relay links form-ing part of the high-grade portion of international digital connections at a bit rate below the primary rate within an integrated services digital network*. 1997

[11] Janczurowicz K., Zawiasa R.: *Pomiary linii radiowych*. Pomiary w Telekomunikacji, 1996, nr 2, s. 1–27

Jan Bugucki



Inż. Jan Bogucki (1947) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1972); długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1973); autor ponad stu publikacji naukowych; zainteresowania naukowe: cyfrowe linie radiowe, telewizja cyfrowa, propagacja fal w troposferze, kompatybilność elektromagnetyczna.
e-mail: J.Bogucki@itl.waw.pl