



Metody wyznaczania zasięgów w warunkach zakłóceń interferencyjnych

Projektowanie, a nawet wymiarowanie sieci radiowych, jest zagadnieniem złożonym, wymagającym zarówno wiedzy o systemach radiowych, zjawiskach propagacyjnych i wpływie sygnałów zakłócających, jak też posiadania odpowiednich narzędzi informatycznych, mających zaimplementowane odpowiednie metody analityczne, a także baz danych o stacjach i o topografii terenu (mapy cyfrowe DEM – *Digital Elevation Map*). Zasadniczy element projektowania sieci to wyznaczanie jej zasięgu – a więc obszaru geograficznego, w którym jest zapewniona łączność w dowolnych warunkach pogodowych i w dowolnej porze roku. Właściwie zaprojektowana sieć radiowa w procesie analiz komputerowych, uwzględniających wszystkie wymagane czynniki, może być później z powodzeniem uruchamiana i eksploatowana, a jej użytkownicy nie mają problemów z odbiorem i transmisją – jedyne spośród nich mogą wynikać albo z awarii/uszkodzeń sprzętu nadawczo-odbiorczego albo sporadycznie z innych zakłóceń (np. występujących lokalnie zakłóceń przemysłowych). Niewłaściwie lub niewystarczająco precyzyjnie zaprojektowana sieć radiowa może sprawić użytkownikom problemy związane z niewłaściwym odbiorem/transmisją radiową w trakcie normalnego użytkowania. Mogą też (np. sporadycznie) pojawiać się „zakłócenia” w postaci sygnałów interferencyjnych ograniczających (lub wykluczających) łączność. Autor niniejszej publikacji, kierując badaniami Pracowni Gospodarki i Inżynierii Widma Instytutu Łączności, miał do czynienia z różnymi problemami w eksploatacji sieci radiowych, których użytkownicy czy operatorzy skarżyli się na „braki zasięgu” lub „występujące zakłócenia”. Szczegółowa analiza takich sytuacji prowadziła niemal zawsze do stwierdzenia, że projekt sieci zawierał nadmierne uproszczenia, błędne założenia lub pominięto w nim istotne przy planowaniu czynniki. Powodowało to, że rzeczywisty zasięg był mniejszy, niż wskazywany w uproszczonym projekcie. Z reguły problemem jest stosowanie uproszczonych metod projektowania sieci, które mogą nie dawać dostatecznie precyzyjnych informacji o uzyskiwanych zasięgach, a nawet wskazywać przesadnie optymistyczne zasięgi, niemożliwe do uzyskania w praktyce. Dotyczy to zwłaszcza metod analizy sygnałów użytkowych w obecności zakłóceń interferencyjnych od innych stacji danej sieci lub od innych sieci (także innych służb radiowych), które często w ogóle nie są uwzględniane w procesie projektowania. W niektórych przypadkach problemem jest też posiadanie mało dokładnych (lub nieposiadanie) odpowiednich baz danych zarówno o stacjach swojej sieci, jak i innych sieci (w tym innych służb), mogących mieć wpływ na uzyskiwane zasięgi lub też posiadanie mało dokładnych (lub nieposiadanie) baz danych o wysokości terenu i jego morfologii (mapy cyfrowe DEM). Problemy nieodpowiedniego projektowania sieci wynikające z tych ostatnich powodów nie stanowią jednak przedmiotu niniejszego artykułu. Założono bowiem na

wstępie, że projektant (czy operator) sieci ma stosowne bazy danych o stacjach swojej sieci i innych sieciach radiowych. Skupiono się tu na problemach spowodowanych stosowaniem uproszczeń i niedostatecznie dokładnych metod analitycznych. Przedstawiono metody, które powinny być używane, w celu uwzględniania zakłóceń interferencyjnych, umożliwiające w procesie projektowania sieci wyznaczanie zasięgu stacji w warunkach występowania tych zakłóceń. Przeanalizowano też wpływ zastosowania (lub nie) tych metod na uzyskiwany zasięg. Na podstawie analizy praktycznych przypadków występowania efektu „zakłóceń” w pracach sieci radiowych stwierdzono bowiem, iż zasadniczy problem (poza posiadaniem odpowiednich baz danych) to projektowanie sieci w obecności zakłóceń interferencyjnych, analizowanych w sposób zbyt uproszczony lub też częściej w ogóle bez ich uwzględnienia. Takie podejście może prowadzić później do trudności z użytkowaniem sieci.

ZASIĘG

W celu ustalenia, czym jest „zasięg” sieci/stacji radiowej, trzeba prawidłowo zdefiniować i zrozumieć zjawiska fizyczne występujące w środowisku fal radiowych. Wielokrotnie używany termin „zasięg” występuje w różnych kontekstach i często ma odmienne znaczenie w zależności od tego, czego aktualnie dotyczy także w środowisku specjalistów. Stąd na wstępie konieczne jest jednoznaczne sprecyzowanie tego pojęcia. Jak często termin ten jest niewłaściwie stosowany i nadużywany, wskazano dalej. W praktycznym rozumieniu w danym punkcie terenu „zasięg” stacji jest zapewniony wtedy, gdy istnieje prawidłowa łączność w tym punkcie z daną stacją: jest to pojęcie słuszne, ale dotyczy *konkretnego przypadku w konkretnym czasie* (zasięg w danej chwili, **zasięg chwilowy**). W sytuacji uogólniania występującego na etapie projektowania sieci konieczne jest operowanie pojęciami statystyk sygnałów, gdyż nawet fakt, iż w danym punkcie w danym dniu jest lub będzie zapewniona łączność („zasięg”), nie oznacza, że zasięg ten będzie w owym punkcie w innym dniu roku czy w innych warunkach pogodowych, chociażby ze względu na zmienność zjawisk atmosferycznych i parametrów troposfery. Wszelkie analizy w tym artykule będą odnosić się do **ogólnego pojęcia zasięgu**: rozumianego jako możliwość uzyskania łączności w danym punkcie z *określonym prawdopodobieństwem* w dowolnej chwili roku, przy uwzględnieniu statystyk zjawisk propagacyjnych i interferencyjnych, a nie do **pojęcia chwilowego zasięgu**, dotyczącego uzyskania łączności w konkretnej chwili, w konkretnych warunkach fizycznych i meteorologicznych.

Radiowy sygnał docierający do odbiornika radiowego w terenie otwartym jest sygnałem zmiennym i podlega charakterystykom statystycznym, a w tzw. małych obszarach (ok. 100 x 100 m), podlega rozkładowi logarymiczno-normalnemu, cechują więc go takie wielkości, jak wartość średnia (mediana) czy odchylenie standardowe. Zasadniczo wartość mocy od-

* Instytut Łączności, Wrocław, e-mail: d.wiecek@il.wroc.pl

bieranej w terenach otwartych jest wyrażona następującym wzorem:

$$P(S_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot S_0} e^{-\frac{(\lg S_0 - \lg \bar{S}_0)^2}{2\sigma^2}},$$

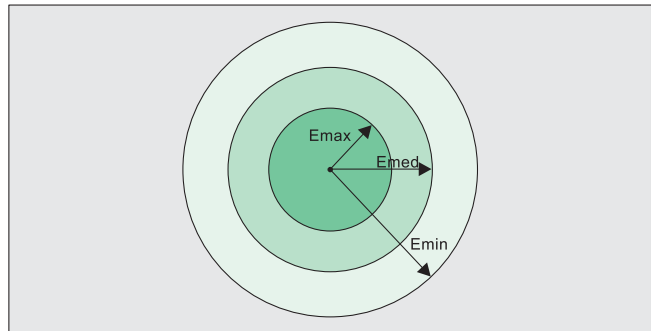
przy czym wartość średnia:

$S_0 = E(S_r^2(t))$ jest średnią mocą odebranego sygnału w małym obszarze, a odchylenie standardowe σ jest równe:

$$\sigma = \sqrt{E(10\lg S_0 - 10\lg \bar{S}_0)^2}.$$

Gdyby w środowisku elektromagnetycznym nie występowały zakłócenia interferencyjne od innych stacji, o zasięgu decydowałby stosunek sygnału użytkowego do występującego szumu, który – w zależności od rodzaju systemu radiowego i techniki transmisyjnej – może przyjmować różne wartości: od ujemnych w przypadku systemów z rozpraszaniem widmem (*Spread Spectrum*) do dodatnich w przypadku klasycznych systemów radiowych. Zasięg nieuwzględniający zakłóceń interferencyjnych jest często nazywany **zasięgiem bezinterferencyjnym** lub **zasięgiem ograniczonym szumami**. Bezinterferencyjny zasięg użytkowy nadajnika wyznacza się na podstawie bilansu łącząca przy uwzględnieniu standardowych metod propagacyjnych, które oddają statystyczny charakter zjawisk propagacyjnych. Najczęściej w projektowaniu stosuje się tzw. krzywe propagacyjne (np. w [8]), umożliwiające wyznaczanie mediany natężenia pola sygnału użytkowego: w 50% czasu w 50% miejsc (50;50), zapewniającej poprawny odbiór w warunkach braku zakłóceń interferencyjnych w średnich wymaganiach jakościowych systemu (50%). Krzywe propagacyjne (50;50) umożliwiają wyznaczenie mediany natężenia pola czasowej i przestrzennej (zasięgu z 50% prawdopodobieństwem), a przy znajomości odchylenia standardowego sygnału odebranego – wyznaczenie wymaganego poziomu sygnału przy dowolnym prawdopodobieństwie odbioru. W przypadku systemów cyfrowych oczekuje się także często wyższej niezawodności odbioru, stąd z reguły wyznacza się wymagane natężenie pola dla wyższych niż 50% wartości miejsc oczekiwanego prawdopodobieństwa odbioru. Np. na podstawie znajomości rozkładu logarytmiczno-normalnego sygnału można zdefiniować poziom natężenia pola, przy którym 90% próbek rozkładu znajduje się powyżej ustalonej wartości, zapewniając zasięg z prawdopodobieństwem 90%. Odnosić się to może zarówno do skali czasu (prawdopodobieństwo czasu), jak i do skali lokalizacji (prawdopodobieństwo miejsc), przy czym w warunkach sygnału użytkowego stosuje się korekcję, ze względu na prawdopodobieństwo lokalizacji, a w przypadku sygnałów zakłócających zwykle stosuje się korekcję czasu. Skorygowana na określony poziom prawdopodobieństwa wartość natężenia pola umożliwia wyznaczenie bezinterferencyjnego zasięgu użytkowego, np. o prawdopodobieństwie lokalizacji 90%. W obliczeniach komputerowych wykorzystujących metody propagacyjne i cyfrowe mapy terenu (DEM) jest możliwe wykonanie mapy zasięgu bezinterferencyjnego wskazującej, w jakim obszarze dla zadanego procentu czasu i procentu miejsc jest przekraczana wymagana wartość natężenia pola. Zasięg bezinterferencyjny jest to „zasięg” w warunkach braku zakłóceń, w praktyce niemal zawsze będą występować zakłócenia interferencyjne, które w mniejszym lub w większym stopniu będą zmniejszać tak wyznaczony „zasięg”. Często w praktyce wykonuje się analizę rozkładu natężenia pola elektrycznego wokół stacji i przy wyznaczonym poziomie wymaganego natężenia pola; wtedy jest mowa o „zasięgu” stacji. Należy mieć świadomość, że w środowisku radiowym, w którym występuje wiele sygnałów, a liczba źródeł sygnałów zakłócających rośnie, „zasięg” odpowiadający rozkładowi na-

tężenia pola często nie jest zasięgiem w rozumieniu poprawnej łączności, a jedynie pojęciem abstrakcyjnym, odpowiadającym „zasięgowi” w teoretycznej sytuacji braku zakłóceń interferencyjnych. Jednak nawet gdyby nie występowały żadne zakłócenia interferencyjne, należy mieć świadomość statystyki zjawisk propagacyjnych, które zmieniają się w czasie i w przestrzeni. Jeżeli więc na podstawie krzywych propagacyjnych wyznaczony „zasięg” będzie odpowiadał wartości mediany (**Emed**), to wskutek statystyki zjawisk propagacyjnych zasięg rzeczywisty można wskazać na podstawie wartości od $Emed - \sigma$ do $Emed + \sigma$ dla ok. 68% (rys. 1) przypad-



■ Rys. 1. Statystyczna natura „zasięgu” bezinterferencyjnego mediany natężenia pola

ków, a od $Emed - 3\sigma$ do $Emed + 3\sigma$ dla ok. 99,7% przypadków. Zatem w warunkach rzeczywistych na 99,7% można wskazać wartość, która będzie odczytana podczas pomiaru natężenia pola, ale będzie ona mogła należeć do dość rozległego przedziału od $Emed - 3\sigma$ do $Emed + 3\sigma$. W przypadku projektowania wymaganej wartości natężenia pola dla wyższego niż mediana procentu miejsc (np. 90%), w zależności od charakteru sygnału i jego odchylenia standardowego, zasięg rzeczywisty będzie w większości przypadków większy, choć wystąpi kilka procent przypadków, w których zasięg rzeczywisty będzie mógł być mniejszy od wyznaczonego, ze względu na właściwości statystyczne zjawisk propagacyjnych.

Mając świadomość statystycznej natury zasięgu bezinterferencyjnego, który i tak w warunkach polskich i europejskich nie jest decydujący o poprawnym odbiorze, można przejść do analizy rzeczywistej sytuacji środowiska elektromagnetycznego, w którym występuje wiele sygnałów różnych systemów zarówno w tym samym, jak i sąsiednich pasmach.

W rzeczywistych warunkach do odbiornika dociera zarówno sygnał użytkowy podlegający opisanemu rozkładowi log-normalnemu, jak również sygnały zakłócające, mające własne rozkłady log-normalne. W wyniku sumowania sygnałów zakłócających powstaje wypadkowy sygnał zakłócający, którego poziom ogranicza zasięg bezinterferencyjny sieci opisany wyżej. Do oceny wpływu sygnałów zakłócających na rzeczywisty zasięg użytkowy jest konieczna znajomość rozkładów sygnałów zakłócających (ich wartości średnich i odchyłeń standardowych), jak również znajomość tzw. współczynników ochronnych **PR** (*Protection Ratios*), definiujących wymagany stosunek mocy sygnału użytecznego do zakłócającego, który gwarantuje poprawną pracę systemu. Współczynniki ochronne wyznacza się metodami eksperymentalnymi i/lub analitycznymi i często stanowią one przedmiot uzgodnień międzynarodowych w ramach konferencji ITU i CEPT. Najczęściej są one podawane w decybelach i dotyczą konkretnych wartości sygnałów użytkowych i zakłócających, odpowiadających poziomom mediany natężenia pola (50% czasu i 50% miejsc). W przypadku potrzeby ochrony systemu przed zakłóceniami w większym procencie, oczekiwanej zwłaszcza w odniesieniu do systemów cyfrowych, współczynniki te koryguje się o wartość wynikają-

czą z rozkładu logarytmiczno-normalnego (współczynnik liczbowy w zależności od procentu) pomnożoną przez pierwiastek kwadratowy sumy kwadratów odchyłeń standardowych poszczególnych sygnałów. Ponieważ może wystąpić kilka różnych sygnałów zakłócających o różnych wartościach i o takim samym charakterze (odchyleniu standardowym), sygnały te „sumuje się”, tworząc wypadkowy sygnał zakłócający, który odpowiada „sumie” zakłóceń. Ponieważ „sumowaniu” podlegają właściwie rozkłady statystyczne sygnałów, jest konieczne umiejętne wybranie i stosowanie metody „sumowania” zakłóceń. Zostaną one przybliżone w dalszej części artykułu.

Na podstawie przedstawionych informacji można stwierdzić, że **dany punkt jest w zasięgu** danej stacji z określonym prawdopodobieństwem w następujących warunkach:

- przekraczana jest wartość natężenia pola (mediana) dla określonego procentu miejsc (skorygowana ze względu na oczekiwane prawdopodobieństwo pokrycia): $E > E_{med} + Corr_E$,
- zapewniony jest wymagany stosunek sygnału użytkowego E do sygnałów zakłócających I równy przynajmniej PR (współczynnik ochronny), skorygowanemu w zależności od oczekiwanego prawdopodobieństwa odbioru: $E - I > PR + Corr_PR$,
- sygnał zakłócający I jest wyznaczany na podstawie „sumy” statystycznej rozkładów prawdopodobieństwa składowych sygnałów zakłócających Ii w określonym procencie czasu (ze względów bezpieczeństwa przyjmuje się 1% lub 10% czasu) i ma on bezpośredni wpływ na ograniczanie zasięgu bezinterferencyjnego.

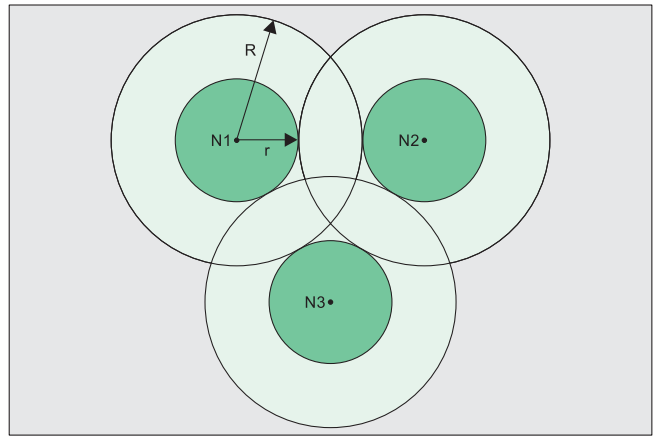
Wyznaczenie mapy zasięgu według wyżej przedstawionych założeń może z wybranym prawdopodobieństwem pokazać statystykę zasięgu. Jeśli analiza była wykonana np. dla 95%, wskazuje ona obszar, w którym z prawdopodobieństwem 95% będzie można odebrać czy uzyskać łączność z daną stacją także w obecności zakłóceń interferencyjnych.

ANALIZY UPROSZCZONE

Ponieważ spełnienie wszystkich wskazanych w poprzednim rozdziale wymagań dotyczących poprawnej analizy szczegółowej jest niezwykle trudne ze względu na niedostateczne bazy danych czy uproszczone narzędzia informatyczne (lub ich brak), projektanci systemów radiowych, jak również ich operatorzy, często wykorzystują uproszczone metody projektowania i wymiarowania sieci radiowych, które w zależności od danego przypadku mogą dać wynik zbliżony do rzeczywistości lub też od niej znacznie oddalony. Uproszczenia te mogą dotyczyć zarówno baz danych o stacjach i topografii terenu, jak również metod analitycznych nieuwzględniających wszystkich wymaganych czynników, np. występowania wielu sygnałów zakłócających, także innych służb radiowych.

W najprostszym przypadku, dość często jednak stosowanym w praktyce, sieć wymiaruje się czy projektuje, opierając się na prostym rozdzieleniu „zasięgów” użytkowych i zakłóceńowych. Polega to na wyznaczeniu z bilansu łącza – na podstawie parametrów odbiornika (czułości), anten, tłumienia doprowadzeń i trasy – średniej mediany (50:50) wymaganego natężenia pola i oszacowaniu średniego bezinterferencyjnego „zasięgu” użytkowego (często bez użycia mapy cyfrowej terenu) oraz „zasięgu” zakłóceńowego danej stacji w postaci wykorzystania krzywych propagacyjnych 1% lub 10% czasu uwzględniających wymagany współczynnik ochronny (PR). Sieć projektuje się wówczas na zasadzie prostego rozdzielenia tak skonstruowanych „zasięgów” użytkowych i zakłóceńowych w danym kanale (rys. 2), uzupełniając powstające ewentualnie obszary lukowe stacjami pracującymi na innych częstotliwościach.

Takie postępowanie w pewnych sytuacjach może dać dość dobre wyniki, mimo swej prostoty. W sytuacji, w której np. mo-



■ Rys. 2. Ilustracja metody „prostego” projektowania sieci radiowej

ce promieniowane są niewielkie, częstotliwość jest stosunkowo duża, gdy stacji zakłócających jest stosunkowo mało lub można zastosować czasowy „podział zakłóceń”, wynikający z natury służby radiokomunikacyjnej i gdy nie występują zakłócenia od innych systemów radiowych. Jednak nawet w wymienionych warunkach konieczne wydaje się zastosowanie przynajmniej map cyfrowych DEM, zapewniających w miarę poprawną ocenę takich uproszczonych „zasięgów” sieci w terenach górzystych. Ponieważ jednak w takim prostym przypadku nie wykonuje się dokładnej analizy zakłóceń, często efekty użytkowania w ten sposób zaprojektowanej sieci mogą być w niektórych przypadkach nieoczekiwane dla projektanta i użytkownika. W rzeczywistości bowiem wystąpią nieuwzględnione w uproszczonej analizie zakłócenia ograniczające zaprojektowany „zasięg” sieci. Na przykład tworzy się projekty sieci w pasmach o dalekim oddziaływaniu zakłócającym w stosunkowo małych zakresach częstotliwości (np. <100 MHz), które planuje się lokalnie np. dla danego województwa lub powiatu nie mając świadomości (lub nie przyjmując do wiadomości), iż o zasięgu w danym analizowanym obszarze będą decydować także stacje umieszczone w innych województwach czy nawet poza granicami kraju. Podczas użytkowania takiej sieci pojawiają się później często narzekania na „zakłócenia”, podczas gdy na etapie projektowania należało uwzględnić sygnały zakłócające i odpowiednio skorygować parametry sieci (moce, liczbę i rozmieszczenie stacji). Wówczas nie wystąpiłby problem zakłóceń.

Często również są stosowane dodatkowe inne uproszczenia lub niewłaściwe założenia przyczyniające się do powstania sytuacji, w której pokazany na mapie „zasięg” nie jest osiągnięty lub powstają w sieci „zakłócenia”. Do takich przypadków można zaliczyć projektowanie sieci dla sygnałów na poziomie czułości maksymalnej odbiornika i wyznaczanie dla niej „zasięgu” z wykorzystaniem krzywych medianowych (dla 50% czasu, 50% miejsc), gdzie – wskutek statystyki zjawisk propagacyjnych i lokalnych – występują wynikające ze statystyki spadki sygnału poniżej poziomu czułości. Powodują one utratę łączności lub pojawiają się sporadyczne zakłócenia (np. tylko w kilka dni w roku), odbierane jako utrata „zasięgu”. Innym przykładem jest projektowanie sieci (głównie cyfrowych) dla wysokiego prawdopodobieństwa pokrycia (np. 90%), ale nieuwzględnianie korekcyjnych współczynników ochronnych, które standardowo są wyznaczane dla mediany zakłóceń (50%). Jeżeli dotyczy to tylko własnej sieci operatora, to objawia się brakami zasięgu, które nie mogą zostać skompensowane podnoszeniem mocy stacji, w związku z tym, iż podnoszenie poziomu sygnału użytkowego oznacza podnoszenie również sygnału zakłócającego, a stosunek obu jest

poniżej wymaganego skorygowanego współczynnika ochronnego. Innym uproszczeniem jest też nieuwzględnianie odpowiednich i dokładnych parametrów anteny odbiorczej, np. wysokości jej zawieszenia, objawiające się tym, że występują „problemy z odbiorem” z anten nisko zawieszonych (np. 1,5 mnpt – metrów nad poziomem morza) w sytuacji, gdy plan sieci dotyczy anten wysoko zawieszonych (np. 10 mnpt). Także przyjęcie nieodpowiadającej rzeczywistości charakterystyki anteny (kierunkowość, zysk, depolaryzacja) i jej zorientowania przestrzennego w stosunku do sygnałów użytkowych i zakłócających może prowadzić do błędnych wyników nawet w sytuacji poprawnej analizy zakłóceń interferencyjnych.

W dzisiejszych czasach, w związku z tym, że liczba stacji radiowych rośnie i wykorzystanie widma się zwiększa, zarówno w tych samych kanałach, jak i w kanałach sąsiednich, „proste” projektowanie sieci staje się coraz częściej niewystarczające. Konieczne staje się uwzględnianie zarówno sumowania sygnałów zakłócających pochodzących z różnych stacji, jak i korzystanie z baz danych o stacjach innych systemów radiowych, baz współczynników ochronnych i szczegółowych map cyfrowych. Na przykład podanie w dzisiejszych czasach informacji o mapie „zasięgu” stacji radiofonicznej czy telewizyjnej w postaci obszaru, w którym jest przekraczana minimalna wymagana mediana wartości natężenia pola – co spotyka się np. w Internecie czy nawet w opracowaniach niektórych firm specjalistycznych – jest nieuprawnionym nadużyciem. W zagęszczającym się środowisku radiowym (zwłaszcza stacji RTV), w którym liczba stacji zakłócających rośnie z dnia na dzień, o zasięgu coraz rzadziej decyduje minimalna mediana natężenia pola odpowiadająca sytuacji bezinterferencyjnej, a niemal zawsze decyduje o zasięgu stosunek sygnałów użytkowych i zakłócających, który musi być szczegółowo analizowany w każdym punkcie odbiorczym. Oczywiście w przypadku niektórych służb radiowych i systemów, które mają „własne” zasoby częstotliwości, analiza zakłóceń interferencyjnych może być upraszczana lub nawet pomijana, choć także w takim przypadku zdarzały się skargi użytkowników na „braki zasięgu” i „zakłócenia”, wynikające z nieuwzględnienia zakłóceń interferencyjnych własnych, oddalonych stacji radiowych albo też np. legalnie pracujących stacji radiowych innych systemów poza granicami Polski.

ANALIZY SZCZEGÓŁOWE ZASIĘGU W OBECNOŚCI ZAKŁÓCEŃ INTERFERENCYJNYCH

Jak wspomniano wcześniej, w celu prawidłowego wyznaczenia zasięgu stacji czy sieci stacji, należy przeprowadzić wiele złożonych analiz komputerowych. Konieczne jest korzystanie z map cyfrowych DEM oraz baz danych o stacjach własnej sieci i stacjach innych służb i systemów krajowych oraz zagranicznych. Niezbędne jest też wykonanie poprawnego bilansu łączą uwzględniającego wszystkie czynniki, które nie mogą być uogólniane lub upraszczane: a więc prawidłowej wysokości zawieszenia anten nadawczych i odbiorczych, szczegółowych charakterystyk anten, precyzyjnych i odpowiednio skorygowanych wartości współczynników ochronnych oraz właściwych metod obliczeń propagacyjnych. W analizie jest konieczne uwzględnienie również sygnałów zakłócających, pochodzących od innych stacji analizowanego systemu, jak również innych systemów radiowych pracujących w Polsce i za granicą w tym samym i w sąsiednich państwach. W niektórych sytuacjach jest także konieczne uwzględnienie „sumowania” sygnałów użytkowych: dotyczy to zwłaszcza sieci jednoczesnościowych (SFN) systemów pracujących w technice OFDM, w której powstaje wypadko-

wy sygnał użytkowy na bazie kilku sygnałów pochodzących od różnych stacji. Taki sygnał wypadkowy ma charakterystykę (medianę i odchylenie standardowe) odmienną od poszczególnych sygnałów i może być wyznaczony np. na podstawie metod przedstawionych dalej, które zasadniczo były przygotowywane w odniesieniu do sygnałów zakłócających. W artykule skupiono się jednak na analizie wpływu sygnałów zakłócających. Zakłada się, że wypadkowy sygnał użytkowy jest poprawnie wyznaczony z uwzględnieniem efektów zysku sieciowego SFN. Zainteresowani problematyką projektowania sieci jednoczesnościowych SFN mogą znaleźć więcej informacji na ten temat w [11,12].

Jak już stwierdzono, o zasięgu stacji czy sieci w większości przypadków decyduje i będzie coraz częściej decydować poziom zakłóceń interferencyjnych pochodzących od innych stacji czy sieci. Tak więc konieczne jest precyzyjne przeanalizowanie wpływu sygnałów zakłócających i ich uwzględnienie w wypadkowym zasięgu. Polega to na analizie umożliwiającej wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa wypadkowego sygnału zakłócającego. Ponieważ sygnały składowe są najczęściej sygnałami o rozkładach logarytmiczno-normalnych, sygnał wypadkowy będzie również sygnałem o takim rozkładzie. Możliwe są różne metody wyznaczania wypadkowego rozkładu sygnału zakłócającego. Te, które przedstawiono dalej, można podzielić zasadniczo na trzy grupy.

Pierwszą z nich są metody uproszczone, które umożliwiają oszacowanie wpływu sygnałów zakłócających na wypadkowy zasięg sieci, lecz nie analizują wypadkowego rozkładu prawdopodobieństwa sygnału zakłócającego, zakładając, że uwzględnia się np. tylko największe zakłócenie, a pomija mniejsze lub też zakładając (upraszczając), że rozkład wypadkowy będzie odznaczał się takim samym odchyleniem standardowym, jak sygnały składowe. Należą do nich metoda dominującego zakłócenia i metoda sumowania mocy.

Drugą grupą są metody analityczne, umożliwiające uzyskanie bardzo dobrej zgodności z metodami precyzyjnymi (w określonych warunkach), opracowanymi w celu praktycznego ich zastosowania podczas projektowania sieci. Zapewniają one uzyskanie bardzo dokładnych (wysoko zbliżonych do metod precyzyjnych) wyników w stosunkowo krótkim czasie obliczeń, możliwych do przeprowadzenia przez projektantów sieci. Do metod tych zalicza się metody log-normalne (LNM, k-LNM, t-LNM), metodę mnożenia prawdopodobieństw, metodę Schwartza i Yeha /Safak.

Trzecią grupę stanowią metody precyzyjne, które umożliwiają uzyskanie wyników najdokładniejszych, ale wymagają znacznych czasów obliczeń i z tego powodu zasadniczo nie są wykorzystywane podczas praktycznego projektowania sieci. Mogą one być natomiast stosowane w celu weryfikacji innych metod czy poprawności wyznaczania konkretnego zasięgu. Do tej grupy należą metoda Monte Carlo i metody całkowania numerycznego.

Zasadniczym założeniem wszystkich przedstawionych metod jest posiadanie przez sygnały (składowe i wypadkowe) charakterystyk logarytmiczno-normalnych rozkładu natężenia pola oraz brak korelacji wzajemnej między sygnałami zakłócającymi. Niektóre metody mogą być jednak zastosowane także w przypadkach innych rozkładów lub w sytuacji występowania korelacji zakłóceń, co zostanie omówione dalej.

Metoda dominującego zakłócenia

Najprostszą metodą uwzględniania sygnałów zakłócających jest metoda dominującego zakłócenia. Jest ona wykorzystywana od bardzo dawna w przypadku sygnałów o dużych mocach promieniowanych, oddziałujących na znaczne odległości, np. nadajników TV, gdzie największe ogranicze-

nia wynikają z jednego zakłócenia dominującego w danym miejscu. Metoda polega na wyborze ze wszystkich sygnałów zakłócających tylko najsilniejszego zakłócenia, a następnie na podstawie analizy stosunku sygnał/zakłócenie – porównaniu uzyskanych wyników z wartością wymaganego współczynnika ochronnego (PR). Ponieważ współczynniki ochronne są wyznaczone z reguły w obecności jednego sygnału zakłócającego, proste porównanie, czy natężenie pola sygnału użytecznego przekracza natężenie pola dominującego sygnału zakłócającego o wartość minimum współczynnika ochronnego, umożliwi szybkie stwierdzenie, czy analizowany punkt zapewnia odbiór w obecności największego zakłócenia czy też nie. Ponieważ metoda ta jest stosunkowo prosta i niewymagająca znacznego wkładu obliczeniowego, była z powodzeniem wykorzystywana przez wiele lat przez administracje państw, np. podczas uzgodnień międzynarodowych dotyczących analogowych stacji telewizyjnych. Daje ona dobre wyniki w sytuacji, gdy jeden sygnał zakłócający rzeczywiście ma poziom dominujący nad innymi, jednak niewątpliwie jest to metoda uproszczona. Nie analizuje wpływu sumarycznego różnych zakłóceń, a sygnał zakłócający (dominujące zakłócenie) ma zadaną, ustaloną charakterystykę rozkładu prawdopodobieństwa. Metoda ta odznacza się największym błędem w sytuacji, gdy kilka sygnałów zakłócających ma podobną wielkość i stanowią one podobnie silne zakłócenia. W takich przypadkach metoda dominującego zakłócenia będzie pokazywać wynik zbyt optymistyczny w stosunku do rzeczywistości. Ponieważ coraz częściej występuje wpływ zakłócający wielu sygnałów, często o zbliżonych poziomach zakłóceń, a możliwości obliczeniowe systemów komputerowych nieustannie rosną, w zasadzie nie ma potrzeby stosowania metody dominującego zakłócenia i zapewne nie będzie się jej stosować przy projektowaniu nowych sieci, zwłaszcza cyfrowych. Metoda prawdopodobnie odejdzie niedługo w przeszłość wraz z wyłączeniem ostatnich stacji telewizji analogowej.

Metoda sumowania mocy

Metoda sumowania mocy (*Power Sum Method – PSM*) jest znana i stosowana od wielu lat, a jej opis jest zawarty w wielu dokumentach międzynarodowych. Używa się jej do oszacowania wielu zakłóceń i została ona przedstawiona na kilku konferencjach ITU, np. [1,3]. Suma poziomu sygnałów jest obliczana przez sumowanie mocy każdego sygnału pojedynczego. Dla sygnału niepożądanego wartość mocy indywidualnego sygnału zakłócającego jest dodawana do mocy minimalnego natężenia pola (reprezentującego szumy).

Metoda ta umożliwia obliczenie w przybliżeniu wartości średniej sumy pól. Jeżeli średnie wartości natężeń poszczególnych pól składowych wyrażonych w mierze logarytmicznej oznaczymy przez \bar{F}_i i wyrazimy w dB μ V/m, ich moce będą wyrażać się wzorem:

$$P = 10^{\bar{F}_i/10}.$$

Dla n pól składowych poszczególne moce dodają się:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_i.$$

Średnia wartość \bar{F}_{Σ} sumy natężeń pól (wyrażona w mierze logarytmicznej) jest obliczana jako:

$$\bar{F}_{\Sigma} = 10 \cdot \log_{10}(P_{\Sigma}).$$

Metoda ta daje dość dobre wyniki przy szacowaniu pokrycia terenu dla ok. 50%, ale także w tym przypadku jej wynik jest nieco większy, niż wypadkowa wartość uzyskana w analizach precyzyjnych. W przypadku szacowania poziomów dla

niższych prawdopodobieństw (np. 1%, 10%), co jest przeważnie stosowane w odniesieniu do sygnałów zakłócających, powyższa jest dość znacznie wypadkowy poziom zakłóceń. Wyniki te świadczą o małej przydatności metody przy wykorzystywaniu jej do dokładnego szacowania zasięgu. Zaletą tej metody jest jednak prostota i mała złożoność obliczeniowa. Stąd jest ona często wykorzystywana w procesie międzynarodowej koordynacji stacji czy w trakcie uzgodnień międzynarodowych, podczas których można szybko i zgrubnie oszacować wypadkowe zakłócenia lub gdy bardziej zaawansowane narzędzia obliczeniowe nie są dostępne. Ponieważ jej wyniki są nieco zawyżone podczas szacowania wypadkowego zakłócenia, zapewnia ona większy margines bezpieczeństwa i umożliwia jednoznaczny i szybką ocenę braku wpływu danej stacji na własną sieć, co jest niezbędne podczas wydawania zgody dla krajów sąsiednich na koordynację danej stacji. Ponieważ metoda została zaakceptowana także podczas niedawno zakończonej konferencji ITU [3], należy spodziewać się jej szerokiego wykorzystywania przez administracje w okresie kolejnych lat: do różnego rodzaju analiz koordynacji międzynarodowej stacji. Dzięki swej prostocie i zapasowi bezpieczeństwa powstającemu wskutek przeszacowania otrzymanych wyników obliczeń, zapewnia łatwe i bezpieczne podejmowanie decyzji przez administrację. W przypadku analiz zasięgu użytkowego stacji (sieci) przez projektantów czy operatorów metoda może niekiedy również być stosowana, jednak wyniki nie będą precyzyjne ze względu na jej niedoskonałość. Stąd projektanci powinni raczej stosować metody dokładniejsze, przedstawione w dalszej części artykułu.

Uproszczona metoda mnożenia prawdopodobieństw

Uproszczona metoda mnożenia jest statystyczną procedurą obliczeniową, używaną do obliczania zakłóceń. Została przedstawiona np. na *Regionalnej Konferencji Planowania Radiofonii VHF* (Genewa, 1984) [2] i jest z powodzeniem stosowana od lat do celów analizy zasięgów stacji radiofonicznych UKF FM.

Metoda wyznacza prawdopodobieństwo odbioru przy występowaniu wielu sygnałów zakłócających. Przyjmuje się, że sygnały te mają rozkład log-normalny i znana jest ich wartość oraz odchylenie standardowe. Całkowity obszar pokrycia może zostać określony przez wyliczenie prawdopodobieństwa w każdym punkcie obszaru. Granice terenu objętego zasięgiem wyznacza się na podstawie miejsc, w których prawdopodobieństwo osiąga wymaganą wartość, założoną na wstępie.

Jeśli w ujęciu statystycznym nie weźmie się pod uwagę szumów, można się spodziewać przeszacowania terenu objętego zasięgiem. Dzieje się to wtedy, gdy poziomy sygnałów zakłócających są małe. Jednakże jest możliwe dodanie efektu wprowadzanego przez szumy na końcu procesu obliczeniowego. Metoda ta jest nieprzydatna do obliczeń zasięgów SFN ze względu na brak możliwości rozpatrywania przypadków z wieloma sygnałami użytkowymi. Dodatkowo w warunkach sygnałów zakłócających dla systemów cyfrowych, dla których odchylenie standardowe rozkładu prawdopodobieństwa jest mniejsze niż dla UKF FM, sprawia ona, że uzyskiwane wyniki są łagodniejsze nie tylko od wyników metody PSM, ale także w stosunku do metod log-normalnych (LNM) przedstawionych dalej. Stąd nie należy oczekiwać stosowania tej metody do celów obliczeń sygnałów zakłócających w koordynacji międzynarodowej stacji cyfrowych i jej głównym zastosowaniem pozostaną wąskopasmowe systemy analogowe, takie jak np. UKF FM.

Metoda ta może być stosowana przy uwzględnieniu następujących założeń:

- sygnał użytkowy i sygnały zakłócające mają rozkład log-normalny ze znaną wartością średnią i odchyleniem standardowym,
- brak jest korelacji między sygnałem użytkowym i sygnałami zakłócającymi,
- jeden z sygnałów zakłócających jest dominujący w punkcie odbioru,
- wpływ szumów, reprezentowanych przez minimalną średnią wartość natężenia pola, jest pomijalny.

Fakt, iż w metodzie tej nie jest uwzględniany efekt szumów, może spowodować przeszacowanie obszaru pokrycia w przypadku, gdy poziom sygnałów zakłócających jest mały. Jednak na koniec procesu obliczeniowego efekt szumów może być dodatkowo uwzględniony, dzięki czemu unika się ryzyka przeszacowania zasięgu.

Wartość natężenia pola sygnału użytecznego jest wyznaczana dla określonego prawdopodobieństwa pokrycia (w odniesieniu do czasu i lokalizacji) i zależy od wartości natężeń pól sygnałów zakłócających [6]:

$$E_{si} = P_i + E_{ni}(50, T) + A_i + B_i,$$

gdzie:

- E_{si} – wartość natężenia pola i -tego nadajnika [dB(μ V/m)],
- P_i – moc promieniowana i -tego nadajnika zakłócającego, wyrażona w dBkW,
- $E_{ni}(50, T)$ – wyrażona w dB(μ V/m) wartość natężenia pola i -tego nadajnika zakłócającego dla 50% miejsc i T% czasu (np.: 1%), znormalizowana do mocy promieniowanej 1 kW,
- A_i – wyrażony w dB współczynnik ochronny skojarzony dla i -tego nadajnika zakłócającego,
- B_i – współczynnik dyskryminacji anteny odbiorczej, podawany w dB.

Wartość natężenia pola sygnału E_u jest funkcją n pól zakłócających i jest obliczana jako:

$$p_c = \prod_{i=1}^n L(x_i),$$

wartość x_i dana jest wzorem:

$$x_i = \frac{E_u - E_{si}}{\delta_n \sqrt{2}},$$

gdzie:

- p_c – prawdopodobieństwo pokrycia obszaru, np. 50% miejsc (100-T) % czasu, w obecności n pól zakłócających,
- $L(x)$ – prawdopodobieństwo pokrycia w obecności pojedynczego pola zakłócającego, które odpowiada całce prawdopodobieństwa dla rozkładu normalnego,
- δ_n – odchylenie standardowe w dB.

Proces wyznaczania wartości natężenia pola E_u jest prowadzony w sposób iteracyjny. Przed jego rozpoczęciem należy predefiniować wartość prawdopodobieństwa pokrycia, np. $p_{cp} = 0,5$. Dla wartości natężenia pola E_u , uzyskanej na końcu procesu iteracji, prawdopodobieństwo pokrycia p_c ma wynosić tyle, ile zakładana wartość p_{cp} (w tym przypadku 0,5).

Obliczenie wartości natężenia pola sygnału użytecznego wykorzystuje całą prawdopodobieństwa rozkładu normalnego:

$$L(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^x \left[\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \right] dt.$$

W funkcji tej x jest różnicą między wartością natężenia pola sygnału użytecznego i sygnałów zakłócających E_{si} .

Zarówno sygnał pożądaný, jak i sygnały zakłócające, mają swoje odchylenia standardowe, które mogą być sobie równe ($\delta_n = \delta_s$). Odchylenie standardowe poziomu wypadkowego, dla składowych o takich samych odchyleniach standardowych, jest wyrażone wzorem:

$$\delta = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_s^2} = \delta_n \sqrt{2}.$$

W praktycznych zastosowaniach całkowanie można zamienić aproksymacją z zastosowaniem wielomianów lub stabelaryzowanymi wartościami funkcji.

Metoda ta umożliwi w sposób iteracyjny wyznaczenie zasięgu, definiowanego przez punkty, w których wypadkowe (pomnożone) prawdopodobieństwo odbioru przekracza określony poziom (np. 50%). Metoda wymaga dość złożonego aparatu obliczeniowego i szczegółowych baz danych o stacjach zakłócających. Będzie zapewne wykorzystywana do czasu zakończenia emisji analogowych sygnałów wąskopasmowych, takich jak UKF FM, raczej nie znajdzie szerszego zastosowania w odniesieniu do systemów cyfrowych, zwłaszcza szerokopasmowych – dla których najbardziej odpowiednią są metody log-normalne opisane dalej.

Metody log-normalne (LNM/ k-LNM)

Metoda log-normalna [5] jest metodą przybliżoną, wykorzystywaną do obliczeń statystycznych sumy rozkładu kilku zmiennych o rozkładzie log-normalnym. Obliczenia dają w wyniku prawdopodobieństwo pokrycia rozpatrywanego obszaru. Metoda ta jest oparta na założeniu, że suma rozkładów pól pożądaných i niepożądaných ma także rozkład log-normalny. Postępowanie składa się z następujących kroków. Najpierw oblicza się rozkłady pól sygnału użytecznego C oraz zakłóceń I . Następnie ocenia się stosunek C/I oraz C/N . W efekcie końcowym kombinacja tych rozkładów daje prawdopodobieństwo pokrycia terenu. Metoda LNM do pewnego stopnia jest w stanie poradzić sobie z przypadkami, gdy odchylenia standardowe poszczególnych pojedynczych rozkładów pola mają różne wartości.

Aby zwiększyć dokładność metody LNM w rejonach, w których jest wymagane duże pokrycie terenu (wysokie prawdopodobieństwo pokrycia), wprowadza się współczynnik korekcyjny k . Ta wersja LNM jest oznaczona jako k-LNM [5]. Metoda k-LNM jest zalecana do analizy sygnałów cyfrowych w przypadku oczekiwania odbioru z wysokim prawdopodobieństwem. W obliczeniach w zakresie przestrzennego prawdopodobieństwa odbioru (procentu miejsc), rzędu 70% – 90%, współczynnik k przyjęto w zależności od konkretnego zastosowania o wartości 0,6–0,7. Zapewnia ona dokładność obliczeń rzędu 0,5 dB. Algorytm sumowania jest następujący.

Załóżmy, że mamy danych n pól F_i o rozkładzie Gaussa (o parametrach $\bar{F}_i, \sigma_i, i = 1 \dots n$) w mierze logarytmicznej (odpowiadające moce mają rozkład logarytmiczno-normalny). Należy określić aproksymujący rozkład logarytmiczno-normalny sumy mocy bądź znaleźć takie parametry rozkładu Gaussa, aby odpowiadały sumie pól logarytmicznych.

Krok 1. Przekształcenie $\bar{F}_i, \sigma_i, i = 1 \dots n$, ze skali dB do skali wyrażonej w Neperach:

$$X_{Neper} = \frac{1}{10 \log_{10}(e)} \cdot X_{dB}.$$

Krok 2. Obliczenie wartości średniej M_i oraz wariancji S_i^2 poszczególnych składowych n :

$$M_i = e^{\bar{F}_i + \frac{\sigma_i^2}{2}}, S_i^2 = e^{2\bar{F}_i + \sigma_i^2} \left(e^{\sigma_i^2} - 1 \right), i = 1 \dots n \text{ (Nepery)}$$

Krok 3. Obliczenie wartości średniej M oraz wariancji S^2 rozkładu sumy mocy:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i, S^2 = \sum_{i=1}^n S_i^2 \text{ (Nepery)}.$$

Krok 4. Określenie parametrów rozkładu \bar{F}_Σ oraz σ_Σ aproksymującego rozkładu logarytmiczno-normalnego sumy:

$$\sigma_\Sigma^2 = \log_e \left(k \frac{S^2}{M^2} + 1 \right), \bar{F}_\Sigma = \log_e(M) - \frac{\sigma_\Sigma^2}{2} \quad (\text{Nepery}).$$

Krok 5. Przeliczenie \bar{F}_Σ oraz σ_Σ z jednostek wyrażonych w Neperach do skali dB:

$$X_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(e) \cdot X_{\text{Neper}}.$$

\bar{F}_Σ oraz σ_Σ są odpowiednio wartością średnią oraz odchyleniem standardowym aproksymującego rozkładu logarytmiczno-normalnego sumy pól – stanowią więc wynik analizy.

Metody LNM i k-LNM z powodzeniem są i będą stosowane w najbliższych latach do szacowania zasięgów sieci systemów cyfrowych, mogą być także stosowane dla sieci pracujących w technice SFN. Ze względu na prostotę w stosunku do podanych dalej metod (t-LNM, Schwartza i Yeha/Safak), metody LNM i k-LNM są z powodzeniem szybko implementowane w różnych narzędziach informatycznych. Z przeprowadzonych prac analitycznych w Instytucie Łączności wynika, że zastosowanie metody k-LNM daje bardzo dobre rezultaty w odniesieniu do wysokiego prawdopodobieństwa pokrycia (ok. 90%), w przypadku obszarów o gorszym prawdopodobieństwie pokrycia dokładniejsze wyniki dają metody t-LNM i Schwartza oraz Yeha/Safak. W przypadku istnienia bardzo wielu sygnałów składowych (10 i więcej) w [4] stwierdzono, iż metoda k-LNM daje najlepsze wyniki w odniesieniu do wypadkowej mediany natężenia w stosunku do wszystkich analizowanych metod, niestety nie daje tak dobrych wyników w odniesieniu do wypadkowego odchylenia standardowego. Niemniej metoda k-LNM jest wysoce atrakcyjna dzięki stosunkowo dobrym wynikom (zwłaszcza w odniesieniu do wysokiego prawdopodobieństwa pokrycia) i prostocie obliczeniowej. W przypadku istnienia tylko kilku sygnałów zakłócających lepsze wyniki są osiągnięte w metodzie t-LNM przedstawionej dalej, która jednakże wymaga bardziej złożonego aparatu obliczeniowego.

Metoda t-LNM

Metoda t-log-normalna [5] jest metodą przybliżoną dla obliczeń statystycznych sumy rozkładu kilku zmiennych o rozkładzie log-normalnym. Ma strukturę podobną do LNM i opiera się na tej samej zasadzie działania (zakłada się, że suma dwóch zmiennych o rozkładzie log-normalnym także ma rozkład log-normalny). Jednakże parametry rozkładu sumy są obliczane w inny sposób i w konsekwencji różnią się od parametrów wyliczonych za pomocą metod LNM.

Podejście to prowadzi do uzyskania wyższej dokładności w rejonach o mniejszym prawdopodobieństwie pokrycia w porównaniu do metody standardowej LNM i k-LNM. Wymaga to jednak zastosowania obliczeń o większej złożoności matematycznej. Metoda ta umożliwi obliczenie w warunkach różnych odchylen standardowych poszczególnych sygnałów z pewnymi restrykcjami. W szczególnym przypadku szum może być rozpatrywany jako sygnał zakłócający ze standardowym odchyleniem równym 0 dB.

Niech f_1 oraz f_2 będą nieskorelowanymi oraz mającymi rozkład normalny natężeniami dwóch pól, stanowiących ich składowe. Na podstawie [5] opis metody można przedstawić następująco.

Odpowiadające wynikowe natężenie pola dane jest zależnością:

$$f = \log_e(e^{f_1} + e^{f_2}),$$

która może być zastąpiona wzorem:

$$f = \frac{1}{2}(f_1 + f_2) + \log_e \left(e^{x/2} + e^{-x/2} \right),$$

gdzie:

$$x = f_1 - f_2.$$

Z zależności tej wynika, że wartość średnia $\langle f \rangle$ odpowiadająca sumie pól wynosi:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{2} (\langle f_1 \rangle + \langle f_2 \rangle) + U(\bar{x}, \sigma_x),$$

gdzie $\langle f_1 \rangle$ oraz $\langle f_2 \rangle$ są wartościami średnimi odpowiednio f_1 oraz f_2 oraz

$$U(\bar{x}, \sigma_x) = \langle \ln(e^{x/2} + e^{-x/2}) \rangle.$$

W kilku kolejnych równaniach w miejsce $\langle f \rangle$ będzie użyte \bar{f} .

Funkcja $U(\bar{x}, \sigma_x)$ zależy tylko od parametrów rozkładu x ; przykładowo x może mieć rozkład normalny z wartością średnią $\bar{x} = \bar{f}_1 - \bar{f}_2$ i wariancją $\sigma_x^2 = \sigma_{f_1}^2 - \sigma_{f_2}^2$. Wariancja f może być zapisana jako:

$$\langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2 = \frac{1}{4} \sigma_x^2 + V(\bar{x}, \sigma_x) - [U(\bar{x}, \sigma_x)]^2 + \tilde{W}(\bar{x}, \sigma_1, \sigma_2),$$

gdzie:

$$V(\bar{x}, \sigma_x) = \langle [\ln(e^{x/2} + e^{-x/2})]^2 \rangle$$

oraz:

$$\tilde{W}(\sigma_1, \sigma_2) = \langle (f_1 - \bar{f}_1 + f_2 - \bar{f}_2) \times \ln(e^{x/2} + e^{-x/2}) \rangle.$$

Wyraz $\ln(e^{x/2} + e^{-x/2})$ może być aproksymowany przez:

$$\ln(e^{x/2} + e^{-x/2}) = \frac{1}{2} |x| + C e^{-A|x| - Bx^2}$$

z użyciem współczynników:

$$\begin{aligned} A &= 0,685437037, \\ B &= 0,08198801, \\ C &= 0,686850632. \end{aligned}$$

Błąd maksymalny w równaniu tym jest mniejszy niż 7×10^{-3} , dla x należącego do przedziału $[-4, 4]$.

Okazuje się, że:

$$\begin{aligned} U(\bar{x}, \sigma_x) &= \bar{x} \left[\Phi\left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right) - \frac{1}{2} \right] + \frac{\sigma_x}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\bar{x}^2}{2\sigma_x^2}} + \\ &+ \frac{C e^{-\frac{\bar{x}^2}{2\sigma_x^2}}}{\sqrt{1+2B\sigma_x^2}} \left[\frac{K_+}{e^{\frac{K_+}{2}} \Phi(-K_+)} + \frac{K_-}{e^{\frac{K_-}{2}} \Phi(K_-)} \right], \end{aligned}$$

gdzie:

$$K_{\pm} = \frac{\bar{x}/\sigma_x \pm A\sigma_x}{\sqrt{1+2B\sigma_x^2}}$$

i gdzie

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{m^2}{2}} dm$$

jest znormalizowaną dystrybucją.

V jest dane jako:

$$\begin{aligned} V(\bar{x}, \sigma_x) &= \frac{1}{4} (\bar{x}^2 + \sigma_x^2) + \frac{C\sigma_x}{1+2B\sigma_x^2} e^{-\frac{\bar{x}^2}{2\sigma_x^2}} \left[\frac{2}{\pi} - K_+ e^{\frac{K_+^2}{2}} \Phi(-K_+) + K_- e^{\frac{K_-^2}{2}} \Phi(K_-) \right] + \\ &+ \frac{C^2}{\sqrt{1+4B\sigma_x^2}} e^{-\frac{2B\bar{x}^2 + 2A^2\sigma_x^2}{1+4B\sigma_x^2}} \cdot \left[\frac{2A\bar{x}}{1+4B\sigma_x^2} \cdot \Phi\left(\frac{\bar{x}/\sigma_x + 2A\sigma_x}{\sqrt{1+4B\sigma_x^2}}\right) + e^{\frac{-2A\bar{x}}{1+4B\sigma_x^2}} \cdot \Phi\left(\frac{\bar{x}/\sigma_x - 2A\sigma_x}{\sqrt{1+4B\sigma_x^2}}\right) \right] \end{aligned}$$

Ostatecznie \tilde{W} może być zapisane jako:

$$\tilde{W} = (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) \cdot W(\bar{x}, \sigma_x),$$

gdzie:

$$W(\bar{x}, \sigma_x) = \phi\left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right) - \frac{1}{2} + C e^{-\frac{\lambda}{2\sigma_x^2}}$$

$$\left\{ \frac{1}{\sigma_x(1+2B\sigma_x^2)} \left[K_+ e^{\frac{k_+^2}{2}} \Phi(-K_+) + K_- e^{\frac{k_-^2}{2}} \Phi(K_-) \right] - \frac{\bar{x}}{\sigma_x^2 \sqrt{1+2B\sigma_x^2}} \right.$$

$$\left. \left[\frac{k_+^2}{e^{\frac{k_+^2}{2}} \Phi(-K_+) + e^{\frac{k_-^2}{2}} \Phi(K_-)} \right] \right\}$$

Funkcje U , V , W można stabelaryzować, zatem kombinacja dwóch sygnałów może zostać sprowadzona do obliczenia kolejno \bar{x} oraz σ_x , następnie znalezienia odpowiadających wartości funkcji U , V oraz W z użyciem biliniowej interpolacji na podstawie tabel i ostatecznie obliczenia średniej wartości sumy natężenia pól oraz wariancji jako:

$$\langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2 = \frac{1}{4} \sigma_x^2 + V(\bar{x}, \sigma_x) - [U(\bar{x}, \sigma_x)]^2 + (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) W(\bar{x}, \sigma_x).$$

Błąd obliczeń jest uzależniony głównie od wielkości zawartych w tabelach U , V , W . Metoda t-LNM odznacza się bardzo dokładnymi wynikami w przypadku kilku sygnałów zakłócających przy wyznaczaniu dowolnego prawdopodobieństwa pokrycia (zarówno dla małych, jak i dużych prawdopodobieństw). Mimo swej złożoności, dzięki bardzo dużej dokładności i stosunkowo krótkim czasom obliczeń przy wykorzystaniu współczesnych serwerów obliczeniowych, jest ona coraz częściej wykorzystywana w przypadku analiz systemów radiowych, zwłaszcza systemów cyfrowych, dla których oczekiwana jest duża dokładność obliczeń. Prowadzone prace analityczne [4] wykazują, że obecnie jest ona jedną z najlepszych metod przybliżonej analizy prawdopodobieństwa pokrycia. W większości przypadków daje wyniki dokładniejsze. Tylko w specyficznych przypadkach jest minimalnie mniej dokładna od takich metod, jak k-LNM czy metoda Schwartza i Yeha/Safak. Stąd w przyszłości należy oczekiwać szerszego jej stosowania, także w połączeniu z metodami k-LNM/Schwartza i Yeha/Safak dla szczególnych przypadków, w celu maksymalizowania precyzji analiz.

Metoda Schwartza Yeha/Safak

W roku 1982 ukazała się praca Schwartza i Yeha [10], której zasadniczym celem było zaproponowanie dobrze przybliżającej metody sumowania rozkładów log-normalnych dla dowolnych parametrów odchylenia standardowego, także w warunkach sygnałów skorelowanych. Jest ona w swej istocie zbliżona do metody t-LNM, z tym że przybliżenia poprawki do sumy sygnałów są obliczane na podstawie wyznaczonych przez autorów funkcji wielomianowych. Metoda daje dobre przybliżenia w szerokim zakresie argumentów. W roku 1993 została ona rozwinięta przez Safak [9] o wyprowadzone analityczne funkcje zastępujące aproksymację wielomianową, co przyczyniło się do zwiększenia jej dokładności, zwłaszcza w przypadku sygnałów skorelowanych. Metoda – mimo swej dużej dokładności w stosunku do wyznaczanej mediany rozkładu normalnego w porównaniu do metod k-LNM i t-LNM – zapewnia jednak nieco słabsze rezultaty w odniesieniu do wyznaczanego odchylenia standardowego [4] przy dużej złożoności obliczeniowej. W przypadku jednak samej wartości średniej na podstawie [4] można stwierdzić, że chociaż w niektórych przypadkach daje minimalnie gorsze wyniki, niż metody k-LNM czy t-LNM, to jednak są one najbardziej stabilne (w sensie dokładności). Dla dowolnego prawdopodobieństwa generuje co prawda minimalnie większy błąd, niż któraś z metod LNM, ale jest to przez cały przedział wartości prawdopodobieństwa błąd stosunkowo niedu-

ży. Nie jest więc tak jak w przypadku metody k-LNM, która w zakresie wysokich prawdopodobieństw daje wynik bardzo dokładny, ale w zakresie niskich prawdopodobieństw dokładność jest znacznie mniejsza. Stąd metodę Schwartza i Yeha, uzupełnioną przez Safak, można z powodzeniem stosować w podobnych przypadkach, jak metody LNM, uzyskując w całym zakresie prawdopodobieństw odbioru stabilny, nieduży błąd analizy. Drugim istotnym elementem, ważnym w przypadku stosowania tej metody, jest możliwość uwzględnienia czynnika korelacji wzajemnej dwóch sygnałów, co zapewnia dokładniejsze analizy sygnałów skorelowanych (pod warunkiem znajomości współczynnika korelacji wzajemnej). Stąd metoda ta jest szczególnie predestynowana do analizy sygnałów wielodrogowych obecnych np. w warunkach propagacji miejskiej w radiokomunikacji ruchomej lądowej, gdy do odbiornika dociera wiele sygnałów odbitych pochodzących od tego samego nadajnika, które są wzajemnie skorelowane. Szczegóły metod można znaleźć w [9, 10], ze względu na ich obszerność nie będą tu przytaczane.

Metody precyzyjne

Wszystkie wymienione wcześniej metody analizowały wpływ zakłóceń albo w sposób uproszczony (metoda dominującego zakłócenia, metoda PSM), albo w sposób przybliżony (metoda mnożenia, LNM, k-LNM, t-LNM, Schwartza i Yeha/Safak). Dawaty one w wielu przypadkach dość dobre wyniki. Metody LNM (k-LNM, t-LNM) czy Schwartza i Yeha/Safak zapewniają w wielu sytuacjach błąd wyznaczania wartości średniej i odchylenia standardowego na poziomie dziesiątych części decybel, zaś przy zastosowaniu dobrze wybranej metody właściwie nigdy nie przekraczają 0,5 dB. Oznacza to, iż w praktycznych zastosowaniach – przy projektowaniu sieci radiowej, mogą one być z powodzeniem wykorzystywane, pod warunkiem jedynie wyboru odpowiedniej metody w odniesieniu do konkretnego systemu radiowego. Z praktycznego punktu widzenia stosowanie dokładniejszych metod właściwie nie jest konieczne. Celem jednak posiadania i stosowania metod precyzyjnych jest po pierwsze sprawowanie dokładności metod przybliżonych, a po drugie możliwość precyzyjnego analizowania sieci w przypadkach wątpliwych czy krytycznych, np. dla systemów specjalnego zastosowania (służby wojskowe, ratunkowe) w trudnych warunkach topograficznych (góry, zabudowa), gdy jest wymagana najwyższa dokładność analiz w celu zwiększenia bezpieczeństwa uzyskiwanych wyników i pewnego zagwarantowania łączności.

Można mówić o dwóch typach metod precyzyjnych: metodzie Monte Carlo i metodzie całkowania numerycznego. Obie wymagają wykonania wielu obliczeń numerycznych. Stąd uzyskiwane przy ich zastosowaniu dokładne wyniki wymagają znacznego czasu obliczeń. Obie metody w zasadzie polegają na szczegółowej analizie rozkładów prawdopodobieństwa sygnałów – w przypadku metody Monte Carlo za pomocą generowania odpowiednich przebiegów losowych, a w przypadku metod całkowania numerycznego – za pomocą analizy prawdopodobieństwa rozkładu normalnego przez całkowanie wypadkowego rozkładu normalnego.

Idea metody Monte Carlo polega na wygenerowaniu w każdym punkcie terenu odpowiedniej, dużej liczby próbek rozkładów log-normalnych o parametrach odpowiadających analizowanemu sygnałom, a następnie wykonaniu dla każdego zestawu próbek analizy sumy sygnałów. W efekcie otrzymuje się próbki tworzące rozkład log-normalny, którego parametry (mediana, odchylenie standardowe) wyznacza się na podstawie parametrów próbek. Przy odpowiednio wysokiej liczbie próbek uzyskiwany wynik jest bardzo dokładny. Dodatkowo, zwiększając liczbę próbek, błąd można dalej zmniejszać.

Metodę Monte Carlo można opisać następująco. Znając poziom sygnału i standardowe odchylenie każdego sygnału, możliwe jest przeprowadzenie symulacji dla dużej liczby lokalizacji w obszarze testowym (np. 100 km x 100 km). Robi się to generując pojedyncze losowe wartości poziomu natężenia dla każdego sygnału i pojedyncze losowe wartości poziomu natężenia dla każdego sygnału zakłócającego. Dla każdej kombinacji możliwe jest sprawdzenie, czy w danej lokalizacji odbiór jest możliwy czy nie, przez porównanie sumy mocy sygnałów użytkowych z sumą mocy sygnałów zakłócających i szumów. Im większa liczba kombinacji, tym metoda jest dokładniejsza, a jednocześnie wymagająca dłuższej pracy komputera. Ponadto symulacje muszą być wykonane dla dużej liczby miejsc, tak aby wyniki były reprezentatywne dla całego obszaru.

Symulacja Monte Carlo daje wiarygodne wyniki pod warunkiem dysponowania liczbą próbek w danym punkcie równą 10 000 do 50 000, opisujących sytuację interferencyjną dla każdego niewielkiego fragmentu powierzchni, zawierającego się wewnątrz danego obszaru pokrycia.

Zakładamy, że są dane:

n użytkowych sygnałów F_i^w o rozkładzie gaussowskim, wyrażonych w mierze logarytmicznej (o parametrach $\bar{F}_i^w, \sigma_i, i = 1 \dots n, i = 1 \dots n$),

m zakłócających sygnałów F_k^{int} o rozkładzie gaussowskim, wyrażonych w mierze logarytmicznej (o parametrach $\bar{F}_k^{int}, \sigma_k^{int}, k = 1 \dots m$),

współczynnik ochronny PR oraz szum N ,

przy czym wszystkie wielkości wyrażone są w dB.

Należy znaleźć prawdopodobieństwo pokrycia :

- Wytworzenie, z użyciem generatora liczb losowych, n zestawów:

$$\{F_{ij}^w, j=1 \dots s\}, i=1 \dots n,$$

o rozkładzie Gaussa (parametry \bar{F}_i^w, σ_i^w) dla n pól sygnałów użytkowych, gdzie s oznacza liczbę wartości natężeń pól zwartych w każdym z zestawów.

- Wytworzenie, z użyciem generatora liczb losowych, m zestawów:

$$\{F_{kj}^{int}, j=1 \dots s\}, k=1 \dots m,$$

o rozkładzie Gaussa (parametry $\bar{F}_k^{int}, \sigma_k^{int}$) dla m pól sygnałów zakłócających.

- Przekształcenie natężeń pól F_{ij}^w oraz F_{kj}^{int} na odpowiadające im moce P_{ij}^w oraz P_{kj}^{int} :

$$P_{ij}^w = 10^{F_{ij}^w/10}, P_{kj}^{int} = 10^{F_{kj}^{int}/10}.$$

- Zsumowanie mocy sygnałów pożądaných:

$$P_j^w = \sum_{i=1}^n P_{ij}^w, j=1 \dots s$$

- Zsumowanie mocy sygnałów zakłócających oraz dodanie szumu, którego wartość bezwzględna jest wyznaczona jako różnica pomiędzy minimalną wartością natężenia pola, F_{min} (wartość logarytmiczna) i wymaganym stosunkiem poziomu nośnej do szumu R (wartość logarytmiczna):

$$P_j^w = N + \sum_{k=1}^m P_{kij}^{int}, j=1 \dots s$$

gdzie:

$$N = 10^{\frac{(F_{min}-R)}{10}}.$$

- Obliczenie stosunku sygnału do szumów wraz z zakłóceniami:

$$\frac{P_j^w}{P_j^{int}}, j=1 \dots s.$$

- Przekształcenie stosunku sygnał/(szumy + zakłócenia) do skali logarytmicznej:

$$\left(\frac{C}{I+N}\right)_j = 10 \log_{10} \left\{ \frac{P_j^w}{P_j^{int}} \right\}, j=1 \dots s.$$

- Uszeregowanie wyrażeń:

$$\left\{ \left(\frac{C}{I+N}\right)_j, j=1 \dots s \right\}$$

oraz wyznaczenie, przy zastosowaniu normalizacji, gęstości prawdopodobieństwa:

$$g\left(\frac{C}{I+N}\right).$$

- Wyprowadzenie z wyznaczonej funkcji gęstości prawdopodobieństwa g rozkładu prawdopodobieństwa P :

$$P\left(\frac{C}{I+N}\right).$$

- Wartość prawdopodobieństwa P przy stosunku $C/(I+N)$ równym współczynnikowi ochronnemu PR daje prawdopodobieństwo pokrycia CP na danym obszarze.

Metoda Monte Carlo w swej istocie oddaje statystyczny charakter sygnału użytkowego i sygnałów zakłócających, wyznaczając „po kolei” wypadkowy rozkład prawdopodobieństwa. Do celów analizy sieci radiowych można przyjąć, że dla 50 tys. próbek jest ona wystarczająca, jednak w przypadku występowania wielu sygnałów zakłócających dla każdego z nich musi być również generowana i analizowana taka sama liczba próbek. Sprawia to, iż nawet przy użyciu współczesnych serwerów obliczeniowych wyniki analiz zasięgu np. na obszarze 100 km x 100 km przy analizie z krokiem co 100 m (1000 x 1000 = 1 mln punktów) uzyskiwane są po wielu godzinach. Stąd można uznać właściwie jej małą przydatność w procesie praktycznego projektowania sieci radiowej, nie mówiąc o próbach wykorzystania w algorytmach automatycznej optymalizacji. Metoda pozostanie więc aplikowana w specjalnych zastosowaniach: w przypadku konieczności uzyskania wysokiej precyzji wyników lub w przypadkach weryfikacji projektów sieci wykonanych metodami przybliżonymi.

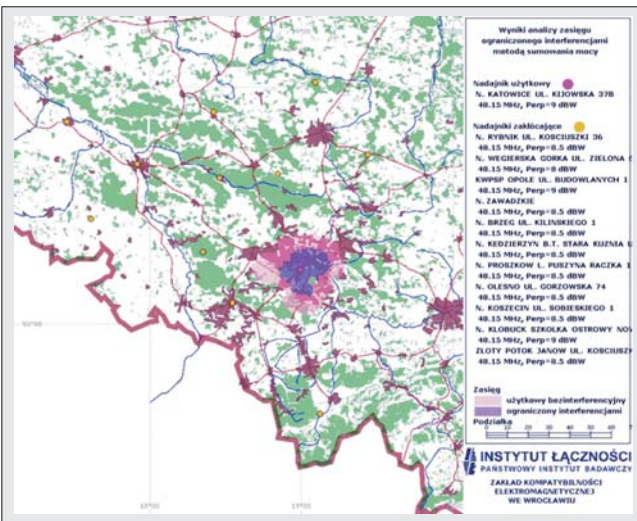
Metody całkowania numerycznego zapewniają również uzyskanie dokładnych wyników, podobnie jak metoda Monte Carlo. Opierają się one na wyznaczeniu numerycznym dokładnych wartości dystrybucyj (całki rozkładu normalnego) wypadkowego rozkładu prawdopodobieństwa uzyskiwanego z parametrów rozkładów normalnych sygnałów składowych. Możliwe jest zastosowanie różnych metod całkowania numerycznego, ich opisy są przedstawiane szeroko w podręcznikach matematycznych. Uzyskanie bardzo precyzyjnych wyników wymaga stosowania metod analizujących wąskie przedziały całkowania, co prowadzi do znacznego nakładu czasu obliczeń komputerowych, porównywalnego lub nawet dłuższego niż w przypadku metody Monte Carlo. Z tego względu częściej jednak wykorzystuje się metodę Monte Carlo, umożliwiającą uzyskanie równie precyzyjnych wyników w krótszym czasie.

Dodatkową zaletą metod precyzyjnych jest możliwość ich stosowania także w przypadku sygnałów o innych znanych rozkładach sygnału, niż rozkład log-normalny, zdarzających się np. w środowisku wielodrogowym w przypadku wielu fal odbitych, z którymi mamy do czynienia np. między budynkami w mieście. Znajomość statystyki sygnału, która jest inna niż log-normalna, umożliwia także jej przeanalizowanie metodami precyzyjnymi i wyznaczenie precyzyjnego wypadkowego rozkładu prawdopodobieństwa.

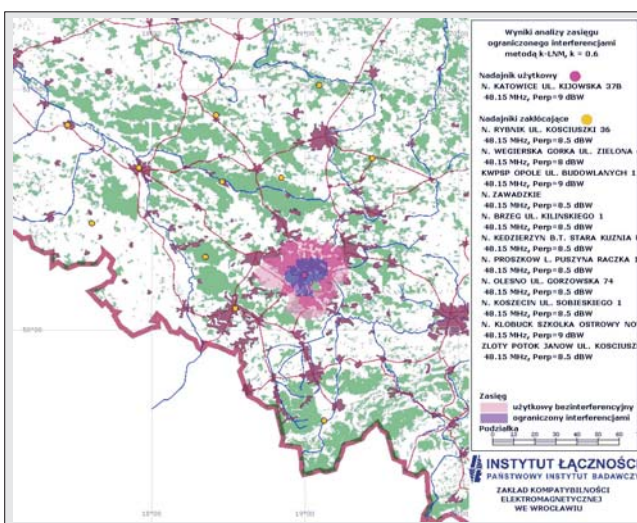
Przykłady wyników analiz

W tym rozdziale (rys. 3, 4, 5) przedstawiono wyniki kilku symulacji wykonanych za pomocą oprogramowania własnego Instytutu Łączności, umożliwiające poglądowe pokazanie wpływu sygnałów zakłócających na wypadkowe zasięgi użytkowej sieci oraz wpływu różnych metod uwzględniania zakłóceń na zasięg. Na rysunkach zaznaczono po pierwsze zasięg bezinterferencyjny (ograniczony szumami), który odpowiada rozkładowi natężenia pola minimalnego, a następnie wyznaczono – za pomocą różnych metod sumowania sygnałów zakłócających – zasięg rzeczywisty, dokładny, uwzględniający wpływ sygnałów zakłócających. W analizie wzięto pod uwagę system odznaczający się znacznym oddziaływaniem zakłóceń oraz 11 stacji zakłócających.

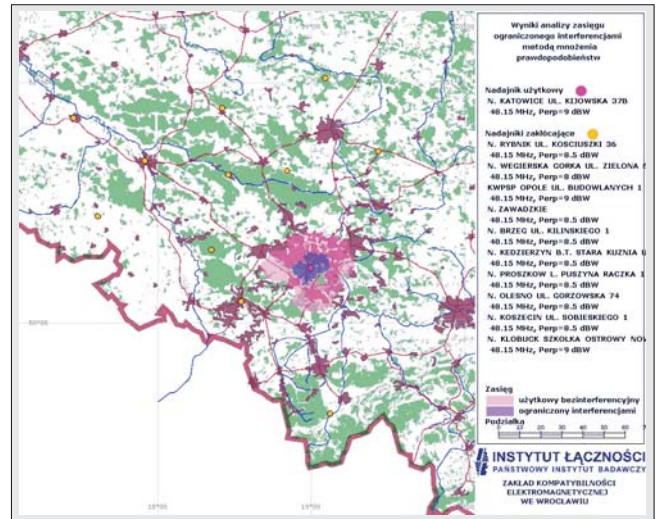
Jak widać na rysunkach, rzeczywisty zasięg stacji jest znacznie mniejszy od zasięgu bezinterferencyjnego, ograniczonego szumami, wynikającego z prostego rozkładu natężenia pola. W tym przypadku podanie jako „zasięg” rozkładu natężenia pola powoduje znaczne przeszacowanie zasięgu rzeczywistego i może wprowadzić w błąd użytkowników sieci. W analizie tej założono sygnał analogowy wąskopasmowy o odchyleniu standardowym 8,3 dB, co prowadzi do wyniku, w którym me-



■ Rys. 3. Analiza zasięgu stacji, metoda sumowania mocy PSM



■ Rys. 4. Analiza zasięgu stacji, metoda k-LNM



■ Rys. 5. Analiza zasięgu stacji, metoda mnożenia prawdopodobieństwa

tożda mnożenia prawdopodobieństw skutkuje najmniejszym zasięgiem użytkowym. Jak wcześniej podano, metoda mnożenia prawdopodobieństw jest najbardziej odpowiednią metodą analityczną do analogowych sygnałów wąskopasmowych. Wynika to z faktu, iż metody obliczeniowe nie powinny przeszacowywać zasięgu użytkowego, lepiej jest gdy zasięg pozostaje niedoszacowany w stosunku do rzeczywistości. Stąd w praktyce często wybiera się do danego systemu taką metodę, która skutkuje najmniejszym zasięgiem wypadkowym, co zapewnia bezpieczeństwo projektowania w przypadku, gdy nie jest znana najwłaściwsza dla danego systemu metoda analizy zakłóceń interferencyjnych.

* * *

W artykule przedstawiono różne metody analizy interferencji sygnałów radiowych o rozkładach log-normalnych umożliwiającą praktyczne i precyzyjne oszacowanie wypadkowego rzeczywistego zasięgu sieci radiowej. W dzisiejszych czasach, w sytuacji rosnącego wykorzystania widma radiowego w kraju i za granicą, nieuwzględnianie sygnałów innych stacji i innych służb radiowych w analizie zasięgu sieci radiowej może prowadzić do dużych błędów i dużego przeszacowania rzeczywistego zasięgu. To z kolei może powodować później problemy z właściwą pracą sieci, a nawet nagminne przypadki utraty łączności w obszarze wskazanego w projekcie bezinterferencyjnego „zasięgu”. W artykule przedstawiono metody uproszczone, stosowane od dawna w związku z istniejącym w przeszłości brakiem odpowiednich narzędzi i sprzętu komputerowego lub też w sytuacjach, gdy była konieczna np. szybka decyzja administracji na podstawie szybkich i prostych analiz. Obecnie coraz większego znaczenia nabierają dokładniejsze metody przybliżone, zapewniające uzyskanie bardzo dużej dokładności wyników, takie jak metody k-LNM, t-LNM, Schwartz-Yeh/Safak, które coraz częściej implementuje się we współczesnych systemach komputerowych analiz sieci radiowych. Metody takie, dzięki dużej dokładności i dużej szybkości obliczeń, umożliwiają bardzo dokładne wyznaczenie wypadkowego zasięgu sieci radiowej, oczywiście pod warunkiem posiadania odpowiednich baz danych o stacjach zakłócających, także innych służb radiowych, w kraju i za granicą. Będą one nabierały jeszcze większego znaczenia w sytuacji rosnącego wykorzystywania sieci jednoczęstotliwościowych SFN w technice OFDM, gdy występuje konieczność analizowania wielu sygnałów użytkowych tworzących tzw. zysk sieciowy oraz w obecności wielu sygnałów

zakłócających. Wydaje się, że obecnie zawsze powinno się wymagać od projektantów i operatorów sieci radiowych szczegółowych analiz zasięgów, uwzględniających wpływ zakłóceń interferencyjnych. Rozwiązałoby to występujący często problem przeszacowania zasięgu w analizach uwzględniających wyłącznie szumy („zasięg” jako rozkład minimalnego natężenia pola). Jedynie w bardzo specyficznych wypadkach – systemów posiadających wydzielone pasma częstotliwości o pomijalnie małym wpływie sygnałów zakłócających z kraju i z zagranicy – można będzie dopuścić uproszczenia i pozostawać na prostym poziomie analiz bezinterferencyjnych.

W niniejszym artykule nie analizowano wpływu dokładności posiadanych baz danych o stacjach i o wysokości terenu (DEM) na uzyskiwane wyniki, skupiając się na metodach analitycznych i wynikających z nich dokładności wyników. Należy jednak podkreślić, że warunkiem uzyskania dobrych jakościowo wyników analiz jest posiadanie odpowiednio dokładnych baz danych. Bez nich zwiększanie dokładności metod analitycznych nie doprowadzi do znacznej poprawy jakości projektu.

W przypadku metod precyzyjnych, wykorzystujących najczęściej analizę Monte Carlo, nie należy oczekiwać w najbliższych latach ich popularyzacji w środowisku operatorów i projektantów, ze względu na długie czasy analiz, niepraktyczne z punktu widzenia biznesowego, w sytuacji uzyskiwania zwiększenia dokładności wyników w stosunku do współczesnych metod przybliżonych (k-LNM, t-LNM, Schwartz-Yeh/Safak) jedynie o dziesiąte części decybel. Metody precyzyjne są jednak w dyspozycji Instytutu Łączności we Wrocławiu. W przypadku chęci weryfikacji innych metod czy projektów lub konieczności precyzyjnego (aczkolwiek czasochłonnego) analizowania sieci specjalnego przeznaczenia analizy takie mogą być przeprowadzane.

LITERATURA

- [1] Akta Końcowe Regionalnej Konferencji Radiodiffuzyjnej dla fal długich i średnich dla Regionu 1 i 3, Genewa 1975
- [2] Akta Końcowe Regionalnej Konferencji Planowania Radiofonii VHF, Genewa 1984
- [3] Akta Końcowe Regionalnej Konferencji Radiokomunikacyjnej planowania radiodiffuzji cyfrowej dla części regionów 1 i 3 w pasmach 174-230 MHz i 470-862 MHz (RRC-06), Genewa, 2006
- [4] Beeke K.: *Analysis of methods for the summation of Log-normal distributions*, EBU Technical Review, October 2007
- [5] EBU BPN066, *Guide on SFN Frequency Planning and Network Implementation with Regard to T-DAB and DVB-T*, July 2005
- [6] ITU-R, Raport 945-2 *Methods for the assessment of multiple interference*. Geneva 1990
- [7] ITU-R, Raport 955 (Mod F), *Annex IV Link margins and service quality objectives*. Geneva 1990
- [8] ITU-R, Zalecenie P.1546-2: *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*, Geneva, 2005
- [9] Safak A.: *Statistical Analysis of the Power Sum of Multiple Correlated log-normal Components*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 1, February 1993
- [10] Schwartz S. C., Yeh Y. S.: *On the distribution function and moments of power sums with lognormal components*. The Bell System Technical Journal, 61(7), 1982
- [11] Sobolewski J., Więcek D.: *Planowanie sieci jednoczesnościowej DVB-T*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, KKRRiT 2005
- [12] Więcek D.: *Ograniczenia planowania i projektowania rozległych sieci jednoczesnościowych SFN telewizji DVB-T* (Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, KKRRiT 2006, Poznań, 7-9 czerwca 2006), Instytut Elektroniki i Telekomunikacji PP, 2006

Artykuł recenzowany

Zbigniew M. JÓSKIEWICZ*, Tadeusz W. WIĘCKOWSKI*



Warsztaty EMC ■ ■ ■

Badania kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektronicznych w zakresie częstotliwości powyżej 1 GHz

Rozwój cywilizacyjny jest bezpośrednio związany ze stałym i szybkim rozwojem elektroniki, teleinformatyki i elektrotechniki. Człowiek otacza się licznymi urządzeniami, które wspomagają lub wyręczają go w pracy oraz towarzyszą mu w codziennym życiu. Są one również elementami złożonych systemów, istotnych dla funkcjonowania gospodarki, instytucji finansowych, obronności i zdrowia. Jak wiele jest tych urządzeń i systemów oraz jakie mają one dla nas znaczenie uświadamiamy sobie dopiero wówczas, gdy wystąpią problemy w transmisji danych między nimi, zabraknie zasilania lub ich praca zostanie zakłócona lub zostaną one uszkodzone.

Prawidłowe funkcjonowanie i rozwój gospodarki oraz zdrowie i życie ludzkie w decydującym stopniu zależą od sprawności a także niezawodności działania urządzeń oraz systemów elektrycznych i elektronicznych. Właściwe działanie tych urządzeń i systemów wymaga ich szczególnej ochrony przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych przez ograniczenie poziomu niepożądanych emisji promieniowanych przez inne urządzenia elektryczne i elektroniczne do otaczającego środowiska oraz zapewnienie ich wysokiego poziomu odporności na występujące zaburzenia elektromagnetyczne.

Wspomniany wcześniej rosnący udział elektroniki, informatyki i telekomunikacji we wszystkich dziedzinach życia powoduje wzrost w otaczającym środowisku poziomu różnorodnych zaburzeń elektromagnetycznych. Mogą one zakłócić lub zakłócać pracę innych urządzeń, a czasami nawet negatywnie wpływają na organizmy żywe. Kontrola poziomu niepożądanych emisji jest dla wielu użytkowników istotna ze

* Politechnika Wroclawska, Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki,
e-mail: zbigniew.joskiewicz@pwr.wroc.pl;
tadeusz.wieckowski@pwr.wroc.pl