

Wirtualna zajętość widma w sieciach radia kognitywnego - algorytmy oceny

Ryszard Strużak

Janusz Sobolewski

Artykuł zawiera ogólny przegląd problemów związanych z inżynierią widma w aspekcie radia kognitywnego, bez wiązania go z jakąkolwiek specyficzną technologią, zakresem częstotliwości lub zastosowaniem. Zajętość taka jest powodowana nieliniowościami w elementach toru transmisyjnego i w otoczeniu. Omawia się w nim podstawowe mechanizmy oraz dyskutuje problemy praktycznego wykorzystania tej nowej technologii. Przedstawia się dwa algorytmy, z których jeden pozwala odpowiedzieć na pytanie, czy dany kanał częstotliwości może być wykorzystany przez radio kognitywne w konkretnej sytuacji. Przytacza się wyniki badań symulacyjnych pokazujące, że wirtualna zajętość może znacznie ograniczać pulę dostępnych kanałów. Drugi algorytm pozwala oszacować prawdopodobieństwo tego rodzaju efektów nieliniowych przy koegzystencji systemów radiowych na danym obszarze geograficznym. Chociaż został on opracowany dla innego zastosowania radia (tzw. CB - citizen band) autorzy proponują, aby zaadaptować go dla potrzeb radia kognitywnego. Dotychczas, przy wyznaczaniu obszarów potencjalnego zastosowania radia kognitywnego nie brano pod uwagę wirtualnej zajętości ani nie zwracano uwagi na konieczność oddzielnego planowania częstotliwości dla kanałów nadawania i dla kanałów odbioru w radiu kognitywnym. Wspomina się związane z tematem wcześniejsze badania Instytutu Łączności i proponuje się dalsze prace.

Radio kognitywne, intermodulacja, zarządzanie widmem, inżynieria widma, wzbogacanie widma, kompatybilność elektromagnetyczna, wirtualna zajętość, kanał radiowy, prawdopodobieństwo zakłóceń, regulacje radiowe

Wprowadzenie

Radio kognitywne zostało zdefiniowane przez ekspertów Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego (ITU) w 2009 r. [1], dziewięć lat po opublikowaniu na ten temat pracy doktorskiej jego twórcy [2]. Jego definicja jest ogólna, niepowiązana z żadnym specyficznym zakresem częstotliwości, zastosowaniem, czy technologią. W takiej samej konwencji utrzymany jest także niniejszy tekst. Radio kognitywne można określić, jako samoorganizujący się system radiowy, który zbiera informację o otoczeniu, „uczy się” i wykorzystuje zebraną informację do zmiany swego działania w celu osiągnięcia zdefiniowanych wcześniej celów. Pozwala to wykorzystywać widmo radiowe w sposób dynamiczny, w odróżnieniu od tradycyjnego, statycznego jego wykorzystywania. Szersze jego zastosowanie może zmienić zasadniczo dotychczasowy sposób inżynierii widma radiowego, jego regulacji i zarządzania jego zasobami. W najbliższej przyszłości oczekuje się zastosowanie radia kognitywnego głównie w zakresach częstotliwości zajmowanych wcześniej przez telewizję analogową i zwolnionych po wprowadzeniu telewizji cyfrowej.

Technika komputerowa, telekomunikacja i inżynieria widma rozwijały się oddzielnie, posługując się różnymi pojęciami, metodami i narzędziami. Na przykład w klasycznym, ponad 1000-stronicowym, opracowaniu „Digital Communications” na omówienie zakłóceń nieliniowych, znanych w inżynierii widma, autor B. Sklar poświęca mniej niż pół strony. Podobnie A. S. Tanenbaum, w swym obszernym dziele „Computer Networks” w ogóle nie wspomina takich zakłóceń. W czasie przygotowywania tego artykułu autorzy spotkali się również z fałszywym poglądem, że zakłócenia nieliniowe nie mogą wy-

stępować w cyfrowych systemach radiowych. Niniejszy artykuł pokazuje, na przykładzie radia kognitywnego, jak te dyscypliny łączą i przenikają się wzajemnie.

Radio kognitywne może pracować na dowolnej częstotliwości, pod warunkiem przestrzegania wymagań Regulaminu Radiokomunikacyjnego. Potwierdziła to Światowa Konferencja Radiowa ITU z 2012 r. (WRC 2012). Oczekiwane korzyści, jakie ono oferuje są szeroko nagłaśniane (np. [3], [4], [5], [6], [7], [8]) i nie będą tu powtarzane. Znacznie mniej mówi się o potencjalnych problemach - nie są one jeszcze dostatecznie rozpoznane. Niektóre z tych problemów przedstawiono poniżej, ale Rekomendacja nr 76 wspomnianej Konferencji WRC 2012 zaleca dalsze badania.

Wspomniany Regulamin Radiokomunikacyjny wymaga, aby radio kognitywne pracowało zadowolająco w danym otoczeniu radiowym, bez powodowania w nim niedopuszczalnych zaburzeń. To wymaganie w istocie zawiera dwa warunki. Pierwszy z nich wynikający z warunku „zadowolająco” oznacza, że w kanale wybranym do odbioru poziom szumów i niepożądanych sygnałów z otoczenia jest odpowiedni niski w stosunku do sygnału użytecznego. Drugi warunek, dotyczący „niedopuszczalnych zaburzeń” otoczenia oznacza, że sygnał nadawany nie może powodować nadmiernych zakłóceń w działaniu innych systemów w otoczeniu.

Najczęściej bierze się pod uwagę potencjalne zakłócenia spowodowane przenikaniem pojedynczych sygnałów, co prowadzi do zajętości kanału z powodu zakłóceń wspólnie- lub sąsiednio-kanałowych. Zakłócenia tego rodzaju, znane jako zakłócenia liniowe, nie są tutaj bliżej omawiane. Autorzy skupiają się natomiast na zakłóceniach nieliniowych, które prowadzą do „wirtualnej zajętości kanału”. Określenie „wirtualnej” zostało tu przyjęte za Burke [9] dla podkreślenia szczególnej specyfiki tego rodzaju zakłóceń, która może występować w braku zakłóceń wspólnie- i sąsiednio-kanałowych. Zakłócenia wynikają tu z nieliniowego oddziaływania kilku sygnałów, o częstotliwościach nawet znacznie oddalonych od rozpatrywanego kanału-kandydata do wykorzystania. Zjawisko generowania takich szkodliwych produktów jest znane od dawna jako intermodulacja lub jej szczególny przypadek - modulacja skrośna. Charakteryzuje się ono pojawianiem się na wyjściu toru transmisyjnego nowych składowych (częstotliwości) będących kombinacją składowych zawartych w sygnale wejściowym oraz ich harmonicznych. Burke nazywa to „wirtualną zajętością” (virtual occupancy), Drozd natomiast – „wzbogacaniem widma” (spectrum enrichment) [10]. Proces wzbogacania widma jest przyczyną, a wirtualna zajętość skutkiem. Nie przenosząc żadnej użytecznej informacji, produkty nieliniowe mogą powodować niedopuszczalny wzrost poziomu zakłóceń (szumów) w określonych kanałach radiowych, co generalnie powinno być uwzględniane w procesie wyboru roboczych częstotliwości radia kognitywnego. Ma to istotne znaczenie zwłaszcza, gdy liczba dostępnych kanałów jest ograniczona, a moc sygnałów znaczna.

W wielu systemach radiowych moc promieniowanego sygnału użytecznego jest regulowana dynamicznie. Jeżeli moc sygnału zakłócającego z jakiegoś powodu wzrasta, to moc sygnału użytecznego jest automatycznie zwiększana tak, aby utrzymać jakość połączenia na wymaganym poziomie. Tak jest np. w popularnym standardzie telefonii komórkowej GSM. Jeżeli jednak moc sygnału użytecznego jest maksymalna i nie może być dalej zwiększana np. z uwagi na przepisy regulacyjne, ochronę zdrowia lub z uwagi na ograniczenia konstrukcyjne urządzenia, to jakość, zasięg użytkowy i inne wskaźniki transmisji ulegają pogorszeniu wraz ze wzrostem mocy zakłóceń (sygnałów niepożądanych) przenikających do odbiornika.

Holes w [11] twierdzi np., że taka właśnie sytuacja zaistniała w Europie po wprowadzaniu systemów telefonii komórkowej 3G w paśmie 900 MHz. W systemach 2G operatorzy mieli większą swobodę w wyborze częstotliwości roboczych i dobierali je biorąc pod uwagę eliminację zakłóceń nieliniowych na etapie planowania wykorzystania częstotliwości w sieci. W paśmie 900 MHz ta swoboda doboru częstotliwości była ograniczona z uwagi na stosunkowo małą liczbę dostępnych kanałów, co zmuszało

do kompromisów i używania także niektórych częstotliwości zagrożonych zakłóceniami nieliniowymi. W rezultacie użytkownicy mogą być w zasięgu stacji bazowej i odbierać silny sygnał użyteczny, a mimo to jakość transmisji głosowej może być niska, a transmisja danych znacznie spowolniona.

Jeżeli bilans przewidywanych szkód i korzyści z tytułu dopuszczenia w ograniczonym zakresie wirtualnej zajętości kanału jest pozytywny, np. prawdopodobieństwo zakłóceń nieliniowych jest bardzo małe, to szkodliwe produkty intermodulacji są tolerowane na etapie projektu. W krytycznych sytuacjach mogą być one eliminowane indywidualnie *ex post*, po uruchomieniu sieci. W tym celu stosuje się w krytycznych miejscach na stacjach nadawczych i/lub odbiorczych dodatkowo filtry, cyrkulatory, sprzęgacze kierunkowe itp., lub zmienia się lokalizację stacji [12], [13]. Który z możliwych wariantów wybrać, zależy od szczegółowej analizy kosztów i nakładów. Konieczna jest przy tym indywidualna ekspertyza, zwykle czasochłonna i kosztowna, bowiem spory, kto ma ponieść koszty eliminacji tego typu zakłóceń i ich skutków często kończą się dopiero po długotrwałym procesie sądowym.

W zastosowaniach krytycznych, np. transmisji radiowej w obliczu zagrożenia życia lub mienia, kiedy liczy się każda minuta, takie rozwiązanie *ex post* jest często niedopuszczalne. W takich przypadkach wirtualną zajętość pasma należy ocenić przed uruchomieniem sieci i zapobiec jej na etapie planowania. Chociaż takie podejście jest znane z radia klasycznego, większość publikacji na temat radia kognitywnego przez długi czas nie podnosiło sprawy zakłóceń intermodulacyjnych i prace poruszające ten problem są stosunkowo nieliczne (por. [9], [14]-[17]).

Plan artykułu

Artykuł podzielony jest na osiem sekcji. W następnej sekcji przedstawia się istotę wirtualnej zajętości widma i mechanizmy wzbogacania widma sygnałów. W kolejnych częściach omawiany jest proces intermodulacji w elementach urządzeń i w ich otoczeniu oraz dyskutowane są problemy kompatybilności elektromagnetycznej związane z praktycznym wykorzystaniem radia kognitywnego. Następnie przedstawione są dwa algorytmy używane w Australii i w USA. Pierwszy z nich pozwala odpowiedzieć (teoretycznie) na pytanie, czy dany kanał częstotliwości może być wykorzystany przez radio kognitywne w konkretnej sytuacji. Jego zastosowanie w badaniach symulacyjnych pokazało, że wirtualna zajętość może znacznie ograniczać pulę kanałów dostępnych dla radia kognitywnego. Drugi algorytm pozwala teoretycznie oszacować prawdopodobieństwo tego rodzaju efektów przy koegzystencji systemów radiowych na danym obszarze geograficznym. Chociaż został on opracowany dla całkiem innego zastosowania (CB radio) autorzy proponują, aby zaadaptować go dla potrzeb radia kognitywnego. Dotychczas, przy wyznaczaniu obszarów potencjalnego zastosowania radia kognitywnego (*white space spectrum*) nie brano pod uwagę wirtualnej zajętości ani nie zwracano uwagi na konieczność oddzielnego planowania częstotliwości dla kanałów nadawania i dla kanałów odbioru w radiu kognitywnym. Dalej wspomina się związane z tematem wcześniejsze badania Instytutu Łączności. W zakończeniu, proponuje się kontynuację problematyki podjętej wcześniej w Zakładzie Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności we Wrocławiu.

Uproszczona teoria

Przy rozpatrywaniu efektu wzbogacania sygnałów przedstawia się zwykle tor transmisyjny jako prawie-liniowy czwórnik bez inercji, histerezy i pamięci. Jest to upraszczające problem przybliżenie rzeczywistych urządzeń, jednak wystarczająco dokładne dla celów inżynierskich. Transmitancję takiego czwornika można w opisać szeregiem potęgowym w dziedzinie czasu t :

$$y = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (1)$$

gdzie $y = y(t)$ jest mocą sygnału na wyjściu czwórnika w chwili t , $x = x(t)$ mocą sygnału na jego wejściu, a_i są współczynnikami liczbowymi, zaś indeks $i = 0, 1, \dots, n$.

Dla idealnego systemu liniowego a_i przyjmują wartości zerowe dla wszystkich indeksów $i > 1$. Dla systemów prawie-liniowych $|a_i| \ll |a_1|$, dla wszystkich $i > 1$. Okresowy sygnał wejściowy można przedstawić w postaci szeregu Fouriera, jako sumę m składowych (tonów prostych) o amplitudach A_j , częstotliwościach $\omega_j = 2\pi f_j$ i fazach φ_j , $j = 1, 2, \dots, m$:

$$x = \sum_{j=1}^m A_j \cos(\omega_j t + \varphi_j) \quad (2)$$

Rzeczywiste sygnały mają bardziej złożoną strukturę, ale założenie okresowości sygnału znakomicie ułatwia analizę nie fałszując zbyt zasadniczego obrazu procesu. Podstawiając równanie (2) do (1) oraz podnosząc indywidualne składniki do potęgi, a następnie stosując elementarne rozwinięcia funkcji trygonometrycznych uzyskuje się sygnał wyjściowy w postaci szeregu Fouriera:

$$y = \sum_{i=0}^n a_i \left[\sum_{j=1}^m A_j \cos(\omega_j t + \varphi_j) \right]^i = \sum_{i=0}^{n^*} A_i^* \cos(\omega_i^* t + \varphi_i^*) \quad (3)$$

W idealnym systemie liniowym ($y = a_1 x$), obowiązuje zasada superpozycji i widma sygnałów na wejściu i na wyjściu zawierają tę samą liczbę składowych ($n^* = m$) o tych samych częstotliwościach ($\omega_i^* = \omega_i$) i o proporcjonalnych amplitudach ($A_i^* = a_1 A_i$). W przypadku systemu prawie-liniowego (1) amplitudy składowych na wejściu i na wyjściu są proporcjonalne tylko w przybliżeniu ($A_i^* \approx A_i$), wskutek czego widma sygnałów wejściowego (2) i wyjściowego (3) różnią się. W wyrażeniu (3) pojawiają się dodatkowo harmoniczne składowych sygnału wejściowego i inne składowe, niewystępujące w sygnale wejściowym ($n^* > m$), co tłumaczy termin „wzbogacanie widma”. Nowe składowe na wyjściu (tzw. produkty nieliniowe) mają częstotliwości równe kombinacjom częstotliwości wejściowych składowych widma ze współczynnikami całkowitymi (typu $\sum_i k_i f_i$, gdzie k_i jest liczbą całkowitą). Produkty nieparzystego rzędu (trzeciego, piątego, siódmego, dziewiątego itd.) występują na częstotliwościach bliskich częstotliwości roboczej, z których najsilniejsze są zwykle produkty 3. rzędu, chociaż Chase [18] opisuje znaczące zakłócenia powodowane przez produkty nawet 25. rzędu.

Inżynieria widma

Inżynieria widma obejmuje dobór charakterystyk nadajników i odbiorników i ich lokalizacji w warunkach ograniczeń. Dla przykładu założmy, że dany jest skończony zbiór częstotliwości (kanałów), z których należy wybrać częstotliwość roboczą F (sygnału użytecznego) w sytuacji odbiornika, w otoczeniu którego istnieją dwa niepożądane sygnały o częstotliwościach odpowiednio F_1 i F_2 .

Pierwsze przybliżenie polega na pominięciu niedoskonałości i nieliniowości w systemach i w otoczeniu, które nie odgrywają zasadniczej roli w ich działaniu. W takim idealnym świecie wszystkie sygnały są doskonale filtrowane a wszystkie urządzenia i zjawiska są liniowe. Przy takich założeniach występować mogą jedynie zakłócenia wspólnokanałowe, kiedy $F=F_1$ lub $F=F_2$. Tego rodzaju zakłócenia są zwykle najgroźniejsze także w systemach rzeczywistych. Można ich uniknąć, stawiając oczywisty warunek ograniczający, aby $F \neq F_1$ i $F \neq F_2$. W przypadku większej liczby sygnałów niepożądanych każdy z nich definiuje takie ograniczenie. Założenie idealnej filtracji sygnałów często odbiega zbytnio od rzeczywistości i realne systemy zaplanowane w sposób wykluczający zakłócenia wspólnokanałowe mogą ulegać innym zakłóceniom omówionym w dalszej części.

W drugim przybliżeniu uwzględnia się zakłócenia sąsiedniokanałowe, które powstają na skutek przenikania energii sygnałów niepożądanych z kanałów sąsiednich w wyniku niedoskonałej filtracji sygnałów. Aby je wyeliminować, nie wystarcza, że częstotliwość robocza F jest różna od częstotliwości niepożądanych sygnałów otoczenia. Musi być ona ponadto odpowiednio oddalona od tych sygnałów. Różnice $|F-F_1|$ i $|F-F_2|$ muszą być dostatecznie duże: jak duże, zależy od konkretnej sytuacji. W przypadku większej liczby niepożądanych sygnałów w środowisku, każda taka różnica generuje nowe ograniczenie.

Założenie idealnej liniowości okazuje się często zbyt dalekie od rzeczywistości i systemy zaplanowane w sposób wykluczający zakłócenia wspólnokanałowe i sąsiedniokanałowe mogą w praktyce ulegać zakłóceniom na skutek nieliniowych procesów, jak to już wspomniano wyżej. Aby ich uniknąć, w trzecim przybliżeniu, przy wyborze częstotliwości roboczej F należy unikać produktów nieliniowych wynikających z zależności (1)-(3).

Na przykład, aby wyeliminować zakłócenia intermodulacyjne trzeciego rzędu, częstotliwość sygnału użytecznego powinna spełniać dwie nierówności: $F \neq (2F_1 - F_2)$ oraz $F \neq (2F_2 - F_1)$. Przy większej liczbie sygnałów w otoczeniu, według raportu ECC [14], liczba produktów trzeciego rzędu wynosi $(k^2 - k)$, gdzie k oznacza liczbę składowych na wejściu. Dla $k = 30$ daje to 870 składowych. Do tego dochodzą jeszcze liczne składowe produktów wyższego rzędu.

Zdarza się często, że mając do dyspozycji ograniczony zbiór dostępnych częstotliwości nie można dobrać takiej częstotliwości roboczej, która spełniałaby wszystkie wymienione wyżej ograniczenia. W takich przypadkach wymagany jest kompromis albo zmiana parametrów urządzeń, które w tej analizie powyżej zostały przyjęte za stałe. Są to np. koordynacja mocy sygnału użytecznego i sygnałów niepożądanych, koordynacja charakterystyk kierunkowości i polaryzacji stacji, koordynacja cykli pracy urządzeń, czy koordynacja lokalizacji stacji. Jest to przedsięwzięcie czasochłonne i trudne, zwłaszcza przy wielkiej liczbie zmieniających się dynamicznie sygnałów otoczenia.

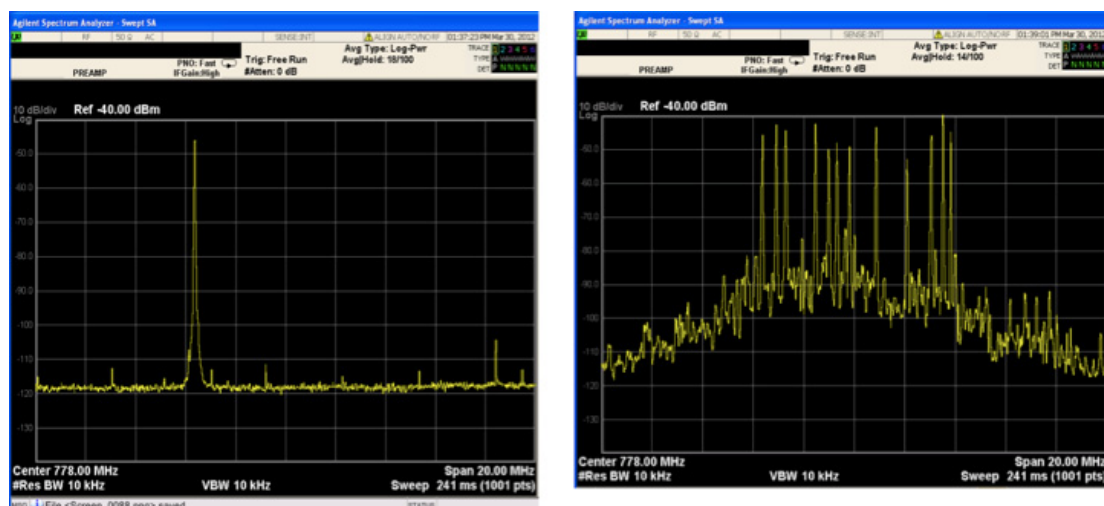
Powstawanie wirtualnej zajętości

Badania zakłóceń intermodulacyjnych rozpoczęto na długo przed powstaniem koncepcji radia kognitywnego, także w Zakładzie Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności we Wrocławiu [10], [12], [13], [19]-[21]. Podstawowe procesy fizyczne powstawania zakłóceń w radiu kognitywnym są takie same jak w radiu tradycyjnym. Wchodzi tu w rachubę interakcja sygnałów pożądanых i sygnałów niepożądanych oraz nieliniowości urządzeń i środowiska. Ta interakcja może zachodzić w wielu miejscach: w elementach nadajników, w elementach odbiorników a także w elementach otoczenia. Ich moc zależy od stopnia nieliniowości, mocy promieniowanej/odbieranej oraz od sprzężenia urządzeń.

Urządzenia radiowe są projektowane tak, aby w przewidywanych (normalnych) warunkach pracy powodowały jak najmniej zakłóceń. Zakłócenia nie mogą być jednak wyeliminowane całkowicie ze względu na praktyczne ograniczenia technologiczne i ekonomiczne. Nieliniowe procesy w urządzeniach radiowych mogą być czynnikiem decydującym o sukcesie technologii radia kognitywnego [24]-[26]. W ogólnych normach dotyczących nadajników i odbiorników radiowych istnieją stosowne wymagania [22], [23]. Mogą one wymagać modyfikacji w miarę rozwoju technologii radia kognitywnego.

Intermodulacja w elementach nadajnika

Największy wpływ na powstawanie efektów intermodulacji w nadajniku mają nieliniowości stopni końcowych i sprzężenie między antenami różnych nadajników, ponieważ sygnały mają tam największe amplitudy. Ten drugi mechanizm jest groźny w przypadku anten umieszczonych w niewielkiej odległości od siebie, np. na wspólnym maszcie. Sprzężenie anten polem elektromagnetycznym powoduje przepływ energii sygnałów do elementów nieliniowych sąsiadującego nadajnika, gdzie powstają niepożądane produkty. W literaturze amerykańskiej tego typu zakłócenia są znane jako *Transmitter Intermodulation* (TIM), natomiast w Raporcie ECC [14] nazywane są one *Reverse Intermodulation*. Do ich eliminacji wymagany jest odpowiedni dobór częstotliwości roboczych i/lub zastosowanie specjalnych urządzeń (filtrów, cyrkulatorów itd.), albo też odpowiednie oddalenie anten od siebie.



Rys. 1. Przykłady widma mikrofonów bezprzewodowych. Lewa strona: widmo odosobnionego mikrofonu. Prawa strona: widmo dwunastu mikrofonów pracujących jednocześnie obok siebie: poziom tła szumów jest większy o ok. 30 dB. (źródło: ECC Report 185 [14])

Na rysunku 1 pokazano dla przykładu zmierzone widmo częstotliwości nadajników małej mocy - bezprzewodowych mikrofonów używanych na scenie w czasie imprez kulturalnych [14]. Po lewej stronie przedstawiono widmo odosobnionego mikrofonu w formie „szpilki”, a po prawej stronie - widmo grupy dwunastu takich nadajników pracujących jednocześnie w bliskiej odległości obok siebie. Gdyby tory radiowe mikrofonów były idealnie liniowe, po prawej stronie rys. 1 byłoby widać 12 „szpilek”, a poziom tła szumów byłby taki sam jak w przypadku pojedynczego nadajnika. Nadajniki te są jednak tylko w przybliżeniu liniowe. Kiedy pracują blisko siebie, powstają produkty intermodulacji, widoczne w postaci dodatkowych mniejszych „szpilek”. Dwanaście mikrofonów bezprzewodowych pracujących jednocześnie na scenie daje 132 produkty intermodulacyjne trzeciego rzędu oraz liczne produkty wyż-

szych rzędów. Na rys. 1 żaden z nich nie jest wystarczająco silny, aby blokować sygnały pożądane (duże szpilki), ale powiększają one „szумы tła”, w pokazanym przypadku aż o około 30 dB. Taki wzrost może być niedopuszczalny i w skrajnym przypadku może uniemożliwić transmisję o wymaganej jakości.

Intermodulacja w elementach odbiornika

Na wejściu odbiornika zazwyczaj znajduje się niskoszumny wzmacniacz, a wprowadzane tam produkty intermodulacji w zasadzie nie mogą być wyeliminowane w dalszych stopniach. Usunięcie ich wymagałoby np. zastosowania specjalnych filtrów, co jest zwykle niepraktyczne. Tego typu zakłócenia są znane w literaturze jako *Receiver Intermodulation* (RIM). Problem nieliniowości jest szczególnie istotny w przypadku układów szerokopasmowych. Razavi [28] opisuje np. szerokopasmowy wzmacniacz wejściowy odbiornika na zakres od 50 MHz do 10 GHz. Przy tak szerokim paśmie nieliniowe produkty intermodulacji wyższych rzędów (aż do rzędu 200) mieszczą się w paśmie przenoszenia wzmacniacza.

Intermodulacja w elementach otoczenia

Otoczenie nadajnika, odbiornika i przestrzeń między nimi mają bezpośredni wpływ na moc sygnału użytecznego i sygnałów niepożądanych. Cytowany wcześniej Zienkiewicz w [12] przytacza przykład dwóch stykających się ze sobą prętów metalowych, które zachowują się jak anteny. W polu elektromagnetycznym indukują się w nich prądy elektryczne, a styk między nimi (zwłaszcza skorodowany) może mieć nieliniową charakterystykę oporności i generować produkty intermodulacji. Tego rodzaju zakłócenia nazywane są w literaturze amerykańskiej *Passive Intermodulation* (PIM) albo „efektem zardzewiałej śruby” (*rusty bolt*). Podobne efekty mogą występować w materiałach o nieliniowych właściwościach elektromagnetycznych. Na przykład Baran badał niedopuszczalne zakłócenia sygnału lokalnej stacji radiofonicznej w takt 100 Hz (tj. w takt drugiej harmonicznej sieci zasilania 50 Hz) [19]. Były one wywołane zmianami indukcyjności ferromagnetycznych drutów grzejnych w żelazkach do prasowania i innych urządzeniach domowego użytku. Zakłócenia te zanikają powyżej temperatury Curie.



Rys. 2. Przykład anten stacji bazowych na dachu budynku (lewa strona) oraz przykład typowego stropu zbrojonego w trakcie budowy (prawa strona). Metalowe pręty zbrojenia mogą działać jak przypadkowe anteny bierne, w których mogą się indukować prądy wielkiej częstotliwości z anten nadawczych umieszczonych bezpośrednio nad nimi. Pod wpływem korozji, ich styki mogą działać jak nieliniowe rezystancje i generować produkty intermodulacji. Takie zjawiska występować mogą na także połączeniach blach dachowych, siatek ogrodzeniowych itp. (źródło: Internet)

Ze względów praktycznych, takie nieliniowości w otoczeniu są zwykle niekontrolowane. Środowisko propagacji fal radiowych uważa się zazwyczaj za idealnie liniowe, chociaż nie zawsze i nie wszędzie jest to uzasadnione. Jeszcze w latach trzydziestych ubiegłego stulecia okryto i opisano tzw. Efekt luksemburski, występujący, kiedy w procesie propagacji bierze udział jonosfera. W innych przypadkach odgrywają rolę nieliniowości urządzeń i konstrukcji na trasie propagacji i w jej otoczeniu, jak na przykład w cytowanych wyżej żelazkach. Z uwagi na trudności modelowania, zwykle traktuje się te nieliniowości jako oddzielne anomalie, a problemy jakie stwarzają rozwiązuje się ad hoc, indywidualnie od przypadku do przypadku.

Na rys. 2 pokazano stacje bazowe umieszczone stosunkowo blisko siebie na dachu budynku, który może mieć zbrojenie w formie prętów stalowych, jak opisywał Zienkiewicz.

Holes w [29] podaje np., że skorodowane ramy okienne w pomieszczeniach stacji bazowych oraz metalowe elementy pobliskich budynków są najczęstszymi źródłami zakłóceń intermodulacyjnych. Wspomniany wcześniej Chase i in. podają przykłady zaburzeń powstających w elementach znajdujących się w otoczeniu anten na okrętach [18]. Najpoważniejsze z nich to metalowe liny, miejsca umocowania łańcuchów kotwicznych, drabiny, zawieszenia łodzi ratunkowych, zamocowania anten, wyścięgniaki i dźwigi. Na lądzie, podobne efekty powodować mogą częściowo skorodowane płyty z siatki metalowej, zbrojenia ścian i stropów, dachy pokryte blachą itp.

Izolacja

Produkty nieliniowe nie występują w przypadku trwałych dobrych połączeń elektrycznych wszystkich elementów metalowych w sąsiedztwie (wówczas wszystkie styki mają charakterystykę liniową). Alternatywę stanowi kompletne wyeliminowanie połączeń elementów przewodzących w otoczeniu (wówczas brak styków i prądu elektrycznego). W celu wyeliminowania możliwości indukowania prądów elektrycznych i generowania produktów intermodulacji w antenowych konstrukcjach wsporczych, w Oddziale Instytutu Łączności we Wrocławiu opracowano nieprzewodzące antenowe konstrukcje wsporcze [27].

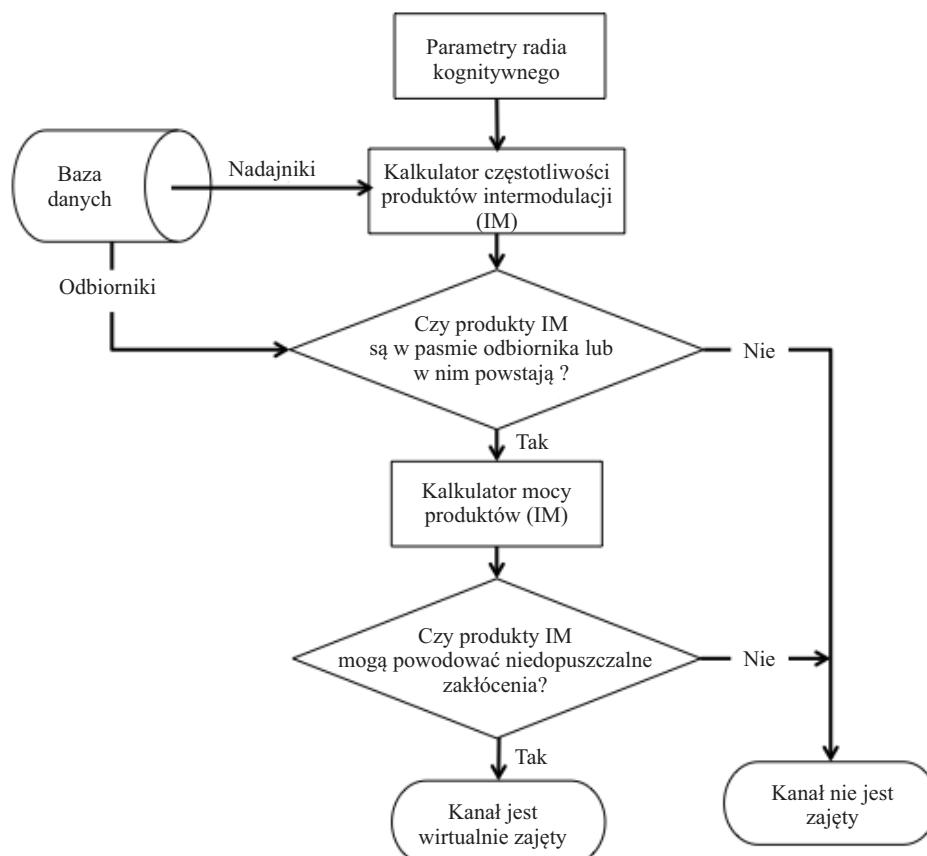
Sprzężenie

Jak wspomniano wcześniej, zakłócenia intermodulacyjne rosną w sposób złożony wraz z mocą sygnałów w elementach nieliniowych. Moce te zależą z kolei od odległości od źródeł sygnałów. Przy większych odległościach, w tzw. polu promieniowania, moc sygnału maleje z kwadratem odległości. Zasadniczy wpływ na tłumienie sygnałów mają też przeszkody na trasie propagacyjnej, odbicia i tłumienie spowodowane stanem ośrodka propagacyjnego jak stan atmosfery i jonosfery, pogoda, opady, pora roku, zależnie od częstotliwości (por. [31]). Shepard opisuje w [30] przypadek generacji produktów intermodulacji w karoserii starego samochodu, stojącego w odległości ok. 30 metrów od anten stacji bazowej wyposażonej w kilka nadajników. Zakłócenia te zanikły po oddaleniu samochodu od anten na odległość ponad 60 metrów.

Identyfikacja kanałów zajętych wirtualnie

Empiryczna identyfikacja kanałów zajętych wirtualnie przez bezpośredni pomiar produktów intermodulacji np. przy wykorzystaniu analizatora widma jest kosztowna i czasochłonna. Zależności (1)-(3) pozwalają analizować teoretycznie wirtualną zajętość kanałów szybciej i taniej. Wspomniany wyżej Burke analizował ten problem w służbie radiokomunikacji ruchomej lądowej w trzech regionach Australii [9]. Badania miały na celu określenie, jaki procent zasobów widma radiowego w zakresie czę-

stotliwości od 450-470 MHz nie może być wykorzystany z powodu produktów intermodulacji. Analiza ta była wykonana w związku z planowanym wprowadzeniem radia kognitywnego w Australii i była ograniczona do produktów trzeciego rzędu. W celu identyfikacji kanałów zajętych wirtualnie stosował on symulację komputerową i algorytm pokazany na rys. 3.



Rys. 3. Algorytm identyfikacji kanałów zajętych wirtualnie (źródło: [9])

W tym celu obliczał produkty intermodulacji dla każdego kanału wolnego od zakłóceń liniowych, przyjmując uproszczony model propagacyjny. Jeżeli działanie radia kognitywnego w tym kanale może potencjalnie generować produkt o mocy wystarczającej do zakłócenia odbioru sygnałów radia mobilnego, kanał ten był uznawany za wirtualnie zajęty. Tabela 1 przedstawia przykład wyników.

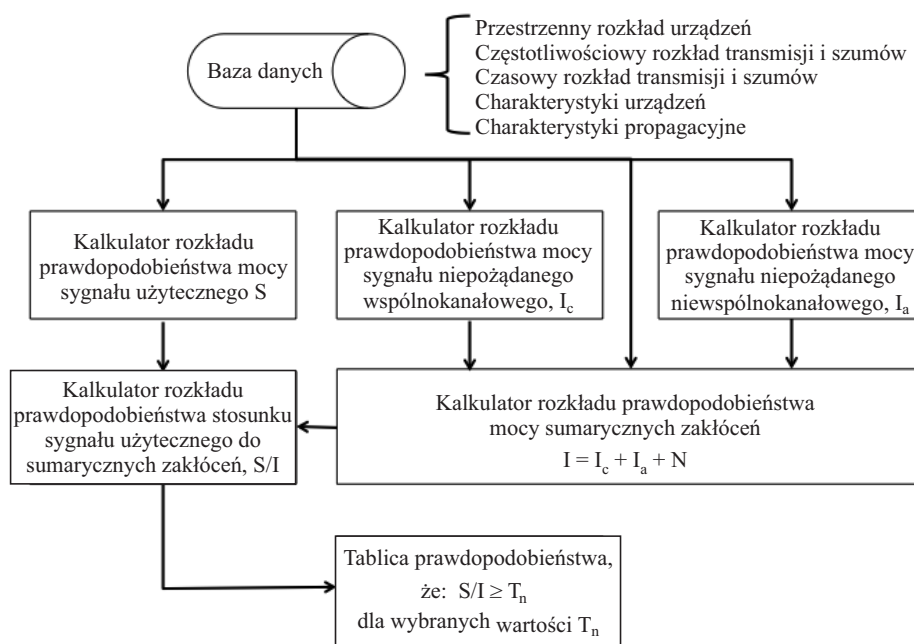
Tabela 1. Przykładowe wyniki symulacji wirtualnej zajętości kanałów [3]

Region	Liczba kanałów wolnych od zakłóceń współkanałowych	Procent kanałów wirtualnie zajętych
Canberra	1385	~13%
Sydney	914	~43%
Melbourne	1004	~85%

W efekcie stwierdzono, że w przypadku Melbourne, około 85% kanałów nie może być wykorzystane przez radio kognitywne bez zastosowania specjalnych środków eliminujących wirtualną zajętość kanałów. Zastosowanie specjalnych filtrów i izolatorów pozwala oczywiście zmniejszyć ten procent, lecz pociąga za sobą dodatkowe koszty.

Prawdopodobieństwo wirtualnej zajętości

Nie należy oczekiwać, że wszystkie systemy i urządzenia są tak projektowane, produkowane i eksploatowane, że możliwość zakłóceń intermodulacyjnych (sygnałów wirtualnych) jest całkowicie wykluczona. Można jednak wymagać, aby prawdopodobieństwo ich występowania w określonym miejscu i w określonym czasie oraz w określonym paśmie częstotliwości nie przekraczało wartości dopuszczalnej. Istotna jest więc potrzeba określenia prawdopodobieństwa wirtualnej zajętości kanałów przed zainwestowaniem w nową sieć. To prawdopodobieństwo może decydować o sukcesie lub porażce działalności biznesowej związanej z radiem kognitywnym.



Rys. 4. Algorytm obliczania prawdopodobieństwa zakłóceń intermodulacyjnych (źródło: [32])

Na rys. 4 pokazano sposób analizy przyjęty wiele lat temu w USA w ramach przygotowań do nowelizacji regulacji prawnych. Chociaż nowelizacja dotyczyła radia CB, sposób postępowania - jak się wydaje - mógłby być zaadaptowany dla potrzeb radia kognitywnego. Berry wychodził tu z danych dotyczących geograficznego rozmieszczenia urządzeń radiowych oraz rozkładu ich aktywności w dziedzinie czasu i w dziedzinie częstotliwości, wykorzystując uproszczone modele propagacyjne do obliczeń tłumienia sygnałów radiowych na każdej trasie od nadajnika do odbiornika [32]. Dalej, obliczał rozkłady prawdopodobieństwa mocy sygnału użytecznego oraz sygnałów zakłócających wspólnokanałowych i innych, w losowo wybranym radiu. Na podstawie analizy dużej liczby wyników, obliczał zależne od

czasu, częstotliwości i położenia prawdopodobieństwo jakości usług, zależne od rozkładu stosunku mocy sygnału użytecznego do łącznej mocy szumów i zakłóceń na wejściu losowo wybranego radia.

Dyskusja

Przedstawione wyżej podejście do oszacowania wirtualnej zajętości kanałów i ich prawdopodobieństwa wykorzystuje bazy danych. Opiera się ono na założeniu, że dane zawarte w bazie są wystarczająco rzetelne i aktualne, tj. reprezentują wiernie rzeczywiste otoczenie radiowe i lokalne regulacje radiowe. Jedną z technik radia kognitywnego teoretycznie eliminuje potrzebę korzystania z bazy danych. Polega ona bowiem na bezpośrednim pomiarze na bieżąco rzeczywistej zajętości widma (*spectrum sensing*). Jednak nie zawsze radio kognitywne wykorzystujące pomiar widma może obyć się bez dostępu do bazy danych. Sensory radia kognitywnego na ogół znajdują się w innym miejscu niż urządzenia radiowe otoczenia, które wymagają ochrony i sygnały w obu tych miejscach mogą się istotnie różnić. W efekcie, radio kognitywne opierające się wyłącznie na sensorach może błędnie kwalifikować kanały radiowe, jako dostępne do nadawania, podczas gdy w rzeczywistości nie mogą być one wykorzystane z powodu niedopuszczalnych zakłóceń w środowisku.

Dostęp do odpowiedniej bazy danych jest potrzebny do przechowywania danych, których pomiar jest utrudniony lub niemożliwy takich jak np. lokalne przepisy i regulacje, modele propagacyjne, wymagane współczynniki ochronne, czy dane o odbiornikach radiowych wymagających ochrony i o ich lokalizacji. Odbiorniki radiowe nie emitują sygnałów i wobec tego nie mogą być namierzone i zidentyfikowane w otoczeniu radia kognitywnego. Tymczasem proces wyboru odpowiedniego roboczego kanału radiowego z wymaga analizy potencjalnych konfliktów i holistycznej analizy kompatybilności elektromagnetycznej (koordynacji w dziedzinie częstotliwości, czasu, miejsca itd.).

Znane algorytmy i metody koordynacji częstotliwości zostały opracowane dla statycznych systemów radiowych. W samoorganizujących się systemach, do których zalicza się radio kognitywne, wymagane jest planowanie dynamiczne. Proces planowania częstotliwości roboczej musi być na bieżąco koordynowany z innymi użytkownikami w sąsiedztwie i aktualizowany za każdym razem, kiedy wystąpią zmiany w jego otoczeniu. Kiedy otoczenie elektromagnetyczne lub warunki propagacji fal radiowych zmieniają się, czynnik czasu może okazać się krytyczny.

Znane metody, np. [33], mogą okazać się zbyt wymagające pod względem czasu i zasobów obliczeniowych (pamięć, procesor) i radio kognitywne może nie zdążyć z adaptacją swych parametrów do zmieniających się warunków. Przydatne mogą okazać się tu przyspieszone metody obliczeń propagacyjnych (np. [34]) i planowania sieci radiowych (np. [35]). Proces wyboru optymalnych parametrów roboczych może być trudny nie tylko z uwagi na jego złożoność, ale także ze względu na rodzaj, liczbę i zmienność danych, które trzeba przy tym uwzględnić. Wcześniej przygotowana baza danych może ułatwić zadanie tylko wówczas, kiedy lokalne dane dotyczące urządzeń, zajętości widma i propagacji są wystarczająco kompletne, dokładne i aktualne.

Przy wyborze częstotliwości roboczej radia kognitywnego istotne są tzw. współczynniki ochronne (*protection ratio*, *interference margin*), które określają stopień ochrony sygnałów radiowych przed zakłóceniami. Stosowane powszechnie współczynniki ochronne wyznaczano dla określonych sygnałów zmodulowanych. Tymczasem produkty intermodulacji mają inną, bardziej złożoną strukturę, dla której mogą być potrzebne inne współczynniki ochronne. Podobnie, potrzebne mogą okazać się nowe kryteria zajętości kanałów (np. [36]). Dotychczas ustalano je w założeniu pojedynczych urządzeń. W przypadku wielkiej liczby urządzeń skupionych na ograniczonym obszarze wchodzi w rachubę sumaryczne zakłócenia. Zdaniem niektórych autorów (np. [37]) te właśnie zakłócenia są czyn-

nikiem krytycznym, chociaż trudnym do oceny, kiedy prosty model sumowania zakłóceń, np. zaproponowany w [38], nie znajduje zastosowania.

W wielu krajach dostęp do widma radiowego opiera się na zasadzie przetargu (kryterium bogactwa) - prawo dostępu dostaje ten, kto płaci najwięcej. A wchodzi tu w rachubę znaczne sumy. Na przykład Wikipedia podaje, że aukcja dwunastu pasm częstotliwości dla telefonii UMTS w Niemczech w roku 2000 przyniosła ponad 50 miliardów euro. W Indiach natomiast, koszt dostępu w przeliczeniu na jednego mieszkańca i na 1 MHz widma przekroczył 3,2 euro/MHz [39]. Efekt wirtualnej zajętości kanałów można by oszacować wiedząc, jaki procent wszystkich dostępnych kanałów podlega temu ograniczeniu. Według Tabeli 1, dla Australii procent ten wynosi 13-85%, w innych krajach może być podobnie.

Chociaż wspomniana wcześniej Konferencja WRC 2012 uznała, że wprowadzenie radia kognitywnego nie wymaga obecnie zmian w światowym Regulaminie Radiowym, wielu uważa, że radio kognitywne może istotnie naruszać interesy dotychczasowych użytkowników widma. Jeśli ta opinia sprawdzi się, zmiany w Regulaminie Radiowym wydają się nieuniknione. Z tego powodu potrzebne jest wcześniejsza analiza wszystkich jego skutków: technicznych (kompatybilność elektromagnetyczna), regulacji prawnych i opłacalności ekonomicznej. Wydaje się naturalne pozostawić analizę ekonomiczną indywidualnym przedsiębiorstwom zainteresowanym wykorzystaniem radia kognitywnego oraz zyskiem i ryzykiem z tym związanym. Regulacje prawne natomiast powinny zapewnić jednakowe traktowanie wszystkich użytkowników widma radiowego i bazować na obiektywnych przesłankach bez ulegania lobbingsowi. Takich obiektywnych przesłanek dostarczają rzetelne badania kompatybilności elektromagnetycznej. Takie analizy są jednak zbyt skomplikowane i zbyt kosztowne dla indywidualnych przedsiębiorstw, zwłaszcza małych i średniej wielkości, a takie właśnie są najbardziej zainteresowane innowacjami. Być może z tego właśnie powodu, w krajach najbardziej rozwiniętego kapitalizmu, jakimi są USA i Australia, opisane wyżej badania zostały wykonane przez jednostki administracji państwowej.

Perspektywy

Jak wspomniano, dla ochrony interesów wszystkich użytkowników widma, szersze wykorzystanie technologii radia kognitywnego powinno być poprzedzone rzetelną analizą skutków jej stosowania. Potrzebę takich badań formułuje szereg autorów z Unii Europejskiej, co podkreśla m.in. Zander [37]. Problematyka radia kognitywnego znalazła się w programie Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności we Wrocławiu. Badania są w toku. Ich wstępne wyniki były prezentowane na forum krajowym [41], [42] i międzynarodowym [43], a także zostały włączone do Raportu Europejskiej Komisji Łączności ECC [14] oraz do programu Międzynarodowego Centrum Fizyki Teoretycznej ICTP [40]. Zdaniem autorów problematyka bezkonfliktowego współistnienia nowych urządzeń przewidywanych do wprowadzenia na rynek z istniejącymi systemami radiowych powinna być dalej rozwijana w Zakładzie, przy udziale zainteresowanych podmiotów gospodarczych i organów administracji państwowej oraz przy współpracy międzynarodowej.

Podziękowania

Koleżdy M. Grzybkowski, A. Hildebrandt, M. Kałuski, M. Michalak, M. Pietranik, D. Więcek, J. Wroński i R. Żarko zgłosili cenne uwagi do wcześniejszej wersji tego tekstu. Autorzy serdecznie im za to dziękują.

Bibliografia

- [1] *Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)*, Report ITU-R SM.2152, ITU, 2009.

- [2] Mitola J.: *Cognitive Radio - an Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio*, Royal Institute of Technology (KTH), 2000, http://web.ict.kth.se/~jmitola/Mitola_Dissertation8_Integrated.pdf (14.11. 2013).
- [3] Akyildiz I.F., Lee W. - Y., Vuran M. C., Mohanty S.: *A survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks*, IEEE Communications Magazine, April 2008, s. 40-48.
- [4] Comaniciu C., Agrawal P.: *A Game-Theoretic Approach to Interference Management in Cognitive Radio*, *Wireless Communications - The IMA Volumes in Mathematics and its Applications*, vol. 143, Springer 2007, s. 199-219.
- [5] Moe W. Z., Pinto P. C., Sheep L. A.: *Mathematical Theory of Network interference and Its Applications*, <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008764>.
- [6] Lopez-Benitez M., Casadevall F.: *Methodologic Aspects of Spectrum Occupancy Evaluation in the Context of Cognitive Radio*, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ett.1453/full>.
- [7] Kang K-M., Park J. C., Cho S-I., Jeong B. J., Jin Y., Lim H-J., Im G-H.: *Deployment and Coverage of Cognitive Radio Networks in TV White Space*, IEEE Communications Magazine, vol. 12, 2012, s. 88-94.
- [8] ECC Report 159: *Technical and Operational Requirements for the Possible Operation of Cognitive Radio Systems in the "White Spaces" of the Frequency Band 470-790 MHz*, January 2011.
- [9] M. Burke M., Lally B. T., Kerans A. J.: *Virtual Occupancy in Cognitive Radio*, IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011, s. 328-336.
- [10] Drozd A. J.: *Evaluation of Discrete Spectrum Enrichment in Nonlinear Four-poles*, Proc. 2nd Int. Symposium on EMC, Montreux, Switzerland, 1977, s. 171-176;
- [11] Holes P.: *Locating Passive Intermodulation - PIM Faults*, <http://www.radio-electronics.com/articles/rf-topics/locating-passive-intermodulation-pim-faults-48>, 7/11/2012.
- [12] Zienkiewicz R.: *Zakłócenia intermodulacyjne w sieciach radiokomunikacji ruchomej*, Prace Instytutu Łączności, 1971, nr 1 (61), s. 3-57 oraz nr 2 (62), s. 3-44.
- [13] Pietranik M., Sęga W., Żarko R.: *Compatibility Between Mobile Services and TV Broadcasting in VHF Band. Practical experiences*, Proc. of the 15th Intern. Symp. on EMC, Wrocław, 2000, s. 695-698.
- [14] ECC Report 185: *Further Definition of Technical and Operational Requirements for the Operation of White Space Devices in The Band 470-790 MHz*, Complementary Report to ECC Report 159, January 2013.
- [15] ECC Report 186: *Technical and Operational Requirements for the Operation of White Space Devices Under Geo-Location Approach*, January 2013.
- [16] Stuber G. L., Almafouh S. M., Sale D.: *Interference Analysis of TV-Band Whitespace*, Proceeding of the IEEE, vol. 97, nr 4, April 2009, s. 741-754.
- [17] Newman T. R., DePardo D., Wyglinski A.M., Evans J. B., Rajbanshi R., Petty V.R., Datta D., Weidling F., Kolodzy P. J., Marcus M. J., Minden G. J., Roberts: *Measurements and Analysis of Secondary User Device Effects on Digital Television Receivers*, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2009, article ID 510867, DOI:10.1155/2009/510867.
- [18] Chase W. M., Rockway J. W., Salisbury G. C.: *A Method of Detecting Significant Sources of Intermodulation Interference*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-17, nr 2, May 1975, s. 47-50.

- [19] Baran J.: *Badania impedancji drutów i elementów grzejnych w zakresie w.cz.* - praca dyplomowa magisterska, Instytut Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, 1970.
- [20] Pietranik M., Żarko R.: *Ograniczenia w planowaniu sieci stacji UKF FM wynikające z intermodulacji w odbiornikach radiofonicznych*, Prace Instytutu Łączności, nr 105, Warszawa, 1995.
- [21] Hetel M., Pietranik M., Żarko R., Sęga W.: *Ocena kompatybilności systemów HD Radio i UKF FM*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Radiokomunikacja, Radiofonia, Telewizja, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2007, nr 1, s. 325-328.
- [22] *Unwanted Emissions in the Spurious Domain*, SM Series Spectrum management Recommendation ITU-R SM.329-12, Sept. 2012,
- [23] Rupp M.: *Radio Frequency (RF) Linearisation*, in T. A. Sturman (ed.): *An Evaluation of Software Defined Radio*, QuinetiQ/D&TS/COM/PUB0603670/ver.1.0, 2006.
- [24] Mahrof D. H., Klumperink E. A. M., Haartsen J. C., Nauta B.: *On the Effect of Spectral Location of Interferers on Linearity Requirements for Wideband Cognitive Radio Receivers*, IEEE, 2010, 978-1-4244-5188-3/10.
- [25] Marshall P. F.: *Cognitive Radio as a Mechanism to Manage Front-End Linearity and Dynamic Range*, IEEE Communications Magazine, March 2009, s. 81-87.
- [26] Reed J.: *Software Radio*, Prentice Hall PTR, 2002, ISBN 0-13-081158-0.
- [27] Dąbrowski H., Kania A., Klimkiewicz R.: *Antenowe konstrukcje wsporcze z tworzywa kompozytowego dla stacji bazowych w radiokomunikacji*, Raport Instytutu Łączności nr Z21/21-3-02-8/246/98.
- [28] Razavi B.: *Cognitive Radio Design Challenges and Techniques*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 45, nr 8, August 2010, s. 1542-1553.
- [29] Holes P.: *Locating Passive Intermodulation*, PIM Faults, Radio-Electronics.com, 24 April 2012, <http://www.radio-electronics.com/articles/rf-topics/locating-passive-intermodulation-pim-faults-48>, (7/11/2012).
- [30] Shepard N. H.: *A Report on Interference Caused by Intermodulation Products Generated in or Near Land Mobile Transmitters*, IRE Transactions on Vehicular Technology, 1967, vol. VT-16, nr 1, s. 16-19 (cytowane za [11]).
- [31] Staniec K., Grzybowski M., Erlebach K.: *Propagation Modelling* (Nawrocki M. J., Dohler M., Aghvami A. H.: *Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation. Theory and Practice*) John Wiley&Sons, 2006, ch. 5, s. 67-113.
- [32] Berry L. A.: *Probability of Intermodulation Interference in an Expanded CB Service*, NTIA-TM-79-15, US Department of Commerce, 1979.
- [33] Leese R., Hurley S.: *Methods and Algorithms for Radio Channel Assignment*, Oxford University Press, 2002, ISBN 0-19-850314-8.
- [34] Wroński J.: *Zastosowanie obliczeń równoległych w planowaniu naziemnych sieci radiowych* (rozprawa doktorska) Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2013, I28/P-004/2013.
- [35] Struzak R.: *Microcomputer modeling, analysis and planning in terrestrial television broadcasting*, Telecommunication Journal, vol. 59-X/1992, s. 459-492.
- [36] Struzak R.: *On Spectrum Congestion and Capacity of Radio Links*, *Annals of Operations Research*, vol. 107, 2001, s. 339-347, ISSN 0254-5330.

- [37] Zander J., Sung K. W.: *Opportunistic Secondary Spectrum Access: Opportunities and Limitations*, The Radio Science Bulletin, URSI, nr 400, March 2012, s. 28-33.
- [38] Strużak R.: *Terrestrial Electromagnetic Environment*; w: Rotkiewicz W. (ed.): *Electromagnetic Compatibility in Radio Engineering*, Elsevier – WKL, 1982, ISBN 0-444-99722-9.
- [39] Tjelta T., Strużak R.: *Spectrum Management Overview*, The Radio Science Bulletin, URSI, nr 400, March 2012, s. 25-28.
- [40] Strużak R., Więcek D.: *Regulatory Issues for TV White Spaces*, w: M. Zennaro (ed): *TV White Spaces, a Pragmatic Approach*, ICTP, ISBN: 978-9295003-50-7.
- [41] Gołębiowski B., Niewiadomski D., Sobolewski J., Więcek D.: *Możliwości wykorzystania widma radiowego w systemach radia kognitywnego*, KKRRiT 2012, Gdańsk, maj 2012.
- [42] Grzybkowski M. J.: *Perspektywy zagospodarowania widma radiowego w Polsce pod kątem implementacji radia kognitywnego*, Telekomunikacja i Techniki Informacyjne, vol. 1-2, 2012, s. 18-39.
- [43] D. Więcek D.: *Methodology of White Space estimation in TV bands based on the ITU GE06 technical conditions*, Cost IC0905 Terra 3rd Workshop, Brussels, 21.06.2011.

Ryszard Strużak



Profesor zw. dr hab. inż. Ryszard Strużak - ukończył Politechnikę Wrocławską, doktorat i habilitację uzyskał na Politechnice Warszawskiej. Inicjator, organizator i długoletni kierownik pierwszego w Polsce Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej w IŁ PIB oraz kierownik oddziału tego instytutu we Wrocławiu. Były wice przewodniczący ITU Radio Regulations Board i były Acting Assistant ITU-CCIR Director w ITU w Genewie. Były profesor Politechniki Wrocławskiej i Wyższej Szkoły Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie. Autor/ współautor licznych publikacji i patentów. Dwukrotny laureat nagród międzynarodowych, trzykrotny laureat nagród ministerialnych, sześciokrotny laureat nagród PTETiS O/Wrocław. Przewodniczył Podkomitetowi EMC KEiT PAN. Kierował pracami międzynarodowych grup studiów w ITU i URSI. Zapraszany do komitetów programowych licznych konferencji naukowych i do wykładów w różnych krajach. Współinicjator i były przewodniczący Międzynarodowego Wrocławskiego Sympozjum Kompatybilności Elektromagnetycznej. Uhonorowany Srebrnym Medalem ITU za szczególne zasługi dla rozwoju telekomunikacji na świecie. Wyróżniony międzynarodową nagrodą honorową IEEE EMCS oraz tytułami IEEE Life Fellow, Member of New York Academy of Sciences oraz Academician of International Telecommunication Academy.

e-mail: r.struzak@ieee.org

Janusz Sobolewski



Dr inż. Janusz Sobolewski - absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (1974), studia doktoranckie w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, doktor nauk technicznych (1980); pracownik naukowy Instytutu Łączności Oddziału we Wrocławiu (od 1980), kierownik Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej (od 2005). Dr Sobolewski jest autorem licznych publikacji, jednego patentu, ponadto kieruje Projektem PIAST realizowanym w ramach POIG Działanie 2.3. Jego zainteresowania naukowe: planowanie sieci naziemnej telewizji cyfrowej DVB-T, radia cyfrowego DAB+ czy radiofonii UKF FM oraz kompatybilność systemów radiowych.

e-mail: j.sobolewski@il.wroc.pl