

Bartłomiej Gołębiowski
Daniel Niewiadomski
Janusz Sobolewski
Dariusz Więcek
Instytut Łączności, ul. Swojczycka 38,
51-501 Wrocław
b.golebiowski@il.wroc.pl, d.niewiadomski@il.wroc.pl, j.sobolewski@il.wroc.pl,
d.wiecek@il.wroc.pl



Gdańsk, 14-16 maja 2012

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA WIDMA RADIOWEGO W SYSTEMACH RADIA KOGNITYWNEGO

Streszczenie: Aktualne wykorzystanie widma radiowego bazuje zasadniczo na podziałach pasm w tabelach przeznaczeń częstotliwości i długookresowych rezerwacjach dla poszczególnych użytkowników. W referacie omówiono cechy przyszłych sposobów wykorzystania pasm radiowych, które będą zapewne odbiegać od obecnych i polegać będą np. na chwilowym oportunistycznym dostępie do widma (*Opportunistic Spectrum Access*), czy tymczasowym współużytkowanym dostępie do widma przez systemy licencjonowane (*Licence Shared Access*) np. przy użyciu systemów baz geolokalizacyjnych. W referacie przedstawiono zasady i zalety takiego dostępu do widma radiowego, pokazano również wstępne wyniki analiz dostępnych białych przestrzeni widma radiowego w pasmach TV UHF w Polsce.

1. WSTĘP

Współczesna telekomunikacja coraz intensywniej wykorzystuje techniki bezprzewodowe. Liczba abonentów telefonicznych sieci komórkowych w Polsce już wielokrotnie przekroczyła liczbę abonentów stacjonarnych i nadal rośnie, a bezprzewodowy dostęp do Internetu staje się równie ważny jak dostęp stacjonarny i jest obecnie przedmiotem gwałtownego rozwoju. To wszystko sprawia, że presja na rozwój systemów bezprzewodowych jest ogromna, a prognozowane ogromne potrzeby nie mogą być zaspokojone przy pomocy aktualnie istniejących rozwiązań. Potrzebne jest opracowywanie i stosowanie nowych technik transmisyjnych, które jeszcze efektywniej wykorzystają widmo radiowe. Niezbędny jest również rozwój infrastruktury sieci stacji poprzez uzupełnienia jej zasięgów i pojemności, dodawanie lokalnych stacji bazowych w postaci piko czy femto komórek. Potrzebne są także nowe techniki dostępu do pasma radiowego, tak aby wykorzystać jak najefektywniej cenne częstotliwości radiowe.

W roku 1999 [1] po raz pierwszy przedstawiono koncepcję radia kognitywnego (*Cognitive Radio* – CR), które z zasady ma wykorzystywać elementy obserwacji otoczenia, nauki zmian i decyzji odnośnie sposobów transmisji bezprzewodowej na zasadzie inteligentnej. Choć sama koncepcja jest złożona i może dotyczyć różnych elementów (warstwy fizycznej, warstwy dostępowej czy wyższych warstw) w ostatnich latach na świecie rozwijana jest zasadniczo koncepcja kognitywnego dostępu do pasma radiowego jako tzw. dynamiczny dostęp do widma (*Dynamic Spectrum Access*) w szczególnym przypadku stanowiący oportunistyczny dostęp do widma (OSA - *Opportunistic Spectrum Access*) czy jako przyszłe współużytkowanie pasm licencjonowanych przez

różnych użytkowników (LSA - *Licensed Shared Access*) prowadząc do kolektywnego użytkowania widma przez różnych użytkowników (CUS - *Collective Use of Spectrum*) [4]. Systemy dynamicznego dostępu do widma bazują zasadniczo na obserwacji fizycznych zjawisk: za pomocą sensingu (detekcji fizycznej) widma lub wykorzystywaniu informacji wcześniej przygotowanych w inny sposób (bazy geolokalizacyjne, radiowy kanał pilota kognitywnego), które z definicji mają zawierać i dostarczać informacje na temat tego co dzieje się w widmie radiowym w poszczególnych miejscach, aby na tej podstawie podjąć decyzję o rozpoczęciu transmisji obejmującą np.: maksymalną dopuszczalną moc promieniowaną, maksymalną wysokość nadajnika czy rodzaj transmisji (np. szerokość kanału, modulacja, charakterystyka anteny). Zasadniczo obecnie koncepcja ta polega głównie na wykorzystywaniu tzw. białych przestrzeni widma radiowego (*White Space Spectrum*) określających różne parametry w przestrzeni radiowej (położenie, wysokość zawieszenia anteny, moc, częstotliwość, szerokość pasma) pozwalające na wykorzystanie danej przestrzeni przez dodatkową transmisję niezakłócającą innych (istniejących dotychczasowych) użytkowników widma radiowego. Najczęściej więc mamy tu do czynienia z oportunistycznym dostępem do widma – czyli emisją w tym samym lub zbliżonym zakresie częstotliwości, który już wykorzystują inne istniejące systemy radiowe, a który może być dodatkowo wykorzystywany w sposób oportunistyczny (wykorzystujący istniejącą sposobność) dzięki zapewnieniu wymaganej stosownej kompatybilności elektromagnetycznej (ocenianej np. jako wymagana separacja geograficzna, częstotliwościowa czy przestrzenna). Techniki kognitywnego dostępu do widma są obecnie na świecie intensywnie badane i rozwijane (np. w licznych projektach FP7) i znajdują się obecnie w fazie przedwdrożeniowej. Pierwsze komercyjne standardy powstały w 2010-2011r. a ich wdrożenie może nastąpić w najbliższych latach, trwają również prace nad kolejnymi standardami, zwłaszcza takimi, które pozwolą na zastosowanie stosunkowo niedrogich rozwiązań technicznych, gdyż pierwsze rozwiązania (wykorzystujące np. sensing widma) ze względu na ich złożoność i kosztowność mogą mieć problem z powszechną akceptacją.

2. SYSTEMY KOGNITYWNE W PAŚMIE TV

Zasadniczo systemy radia kognitywnego mogą zostać zaimplementowane w niemal każdym zakresie czę-

stotliwości, zwłaszcza w pasmach, w których mamy do czynienia ze stałymi źródłami emisji o znanych i niezmiennych parametrach (np. stacje telewizyjne i radiowe, systemy radarowe itp.). W chwili obecnej zakresem, na który zwraca się dużą uwagę na świecie w aspekcie radia kognitywnego są pasma zakresu telewizyjnego IV i V (470 – 790 MHz) wykorzystywane w przeważającej większości przez telewizję naziemną (analogową oraz cyfrową), a po wyłączeniu emisji analogowej wyłącznie przez cyfrową telewizję naziemną. W paśmie tym pracują w Europie również inne systemy bezprzewodowe. Są to np. radiomikrofony, a szerzej systemy PMSE (*Program Making and Special Events*) w różnych podzakresach zakresu 470 – 790 MHz, radioastronomia w paśmie 608 – 614 MHz [7] czy lotnicze systemy radionawigacyjne ARNS (*Aeronautical Radio Navigation Service*) [8]. Głównymi powodami, dla których pasmo TV stało się atrakcyjne dla systemów kognitywnych to m.in. fakt, że zakres ten cechuje się korzystnymi warunkami propagacyjnymi, oraz ze względu na cechy sieci rozszereżonych naziemnej telewizji cyfrowej i sposobów wykorzystywania przez nie częstotliwości tj. terytorialnie dużych obszarów wykorzystania poszczególnych kanałów telewizyjnych, wraz z dużymi obszarami separacyjnymi pomiędzy nimi i stosunkowo niskimi poziomami interferencji. Ważnym aspektem, dla którego pasmo TV jest atrakcyjne dla systemów kognitywnych jest także to, że stosunkowo prosto można stworzyć bazy geolokalizacyjne wskazujące wolne białe przestrzenie widma radiowego, na bazie których mogą pracować urządzenia WSD.

2.1. Sposoby ochrony systemów służby pierwszej ważności w pasmach TV

Ochrona systemów pracujących w paśmie TV w służbie pierwszej ważności jest jednym z głównych zadań jakie stoi przed systemami kognitywnymi. Istnieją trzy podstawowe techniki które mogą być wykorzystywane przez systemy kognitywne do ochrony systemów służb pierwszej ważności.

Sensing – detekcja widma

Sensing jest metodą lokalnej detekcji widma przez urządzenia WSD. Urządzenie WSD wykonuje analizy widma, wybierając do transmisji ten kanał, na którym nie jest prowadzona emisja TV i zachowując wymagania kompatybilności w stosunku do kanałów sąsiednich. Zasadniczym problemem w przypadku sensingu widma jest tzw. problem ukrytego węzła (*hidden node*): sytuacja taka ma miejsce kiedy urządzenie WSD znajduje się w miejscu w którym nie wykrywa sygnału TV (bo znajduje się np. za przesłoną terenową) i uznaje dany kanał TV jako wolny mimo tego, że w okolicy pracują odbiorniki TV odbierające program na tym kanale. Wybierając taki kanał do pracy urządzenie WSD powoduje powstanie niedopuszczalnych zakłóceń w odbiorze TV. Problem ten może być minimalizowany głównie poprzez wspólny sensing za pomocą wielu współpracujących ze sobą urządzeń (*Cooperative Spectrum Sensing*), gdyż wymagane marginesy ochronne dla pojedynczego sensora ze względu na problem ukrytego węzła często

prowadzą do uzyskania wymaganych poziomów sensingu znacznie poniżej poziomu szumów. Docelowo analiza widma nie będzie korzystać jedynie z pomiaru energii w określonym zakresie, ale zawierać będzie również szczegółowe badanie charakterystyk użytkownika widma takich jak czas, obszar, częstotliwość, kody (ortogonalne do kodów używanych przez pierwotnego użytkownika), rodzaj sygnału zajmującego spectrum (modulacja, nośna, pasmo, kąt padania promieniowania co pozwoli na zmniejszenie wymagań czułościowych urządzeń sensujących. Zaawansowane techniki sensingu są obecnie w fazie badawczej i prace w tym kierunku będą prowadzone przez kolejne lata.

Beacon – sygnał ostrzegawczy

Użytkownik systemu służby pierwszej ważności w tym przypadku nadaje niemodulowany sygnał ostrzegawczy (beacon), który wskazuje na zajętość kanału (kanałów) i może pozwalać na podanie także innych informacji na temat możliwości wykorzystania pasma (np. poziomy sygnałów, zależności czasowe itp.). Możliwe jest też emitowanie beacona przez inne stacje mające rozpoznać widma radiowego a nie związane z użytkownikiem pierwszej ważności (np. stacje monitoringu widma). Zasadniczym problemem tej metody jest konieczność wygospodarowania (i ochrony) pasma radiowego przeznaczonego na beacon oraz konieczność równoczesnego sensingu widma.

Bazy geolokalizacyjne

W tym przypadku urządzenie WSD wyposażone jest w odbiornik GPS, a po określeniu położenia geograficznego łączy się z bazą danych, w której zawarte są informacje o dostępności wolnych kanałów w danej lokalizacji. Bazy geolokalizacyjne muszą być odpowiednio często aktualizowane, tak aby na bieżąco uwzględniać zmiany w widmie. Problemem w przypadku odbiornika odbiornika GPS jest brak możliwości wykorzystania tej techniki w pomieszczeniach, gdzie odbiór sygnału GPS jest utrudniony lub niemożliwy oraz niedokładność oceny wysokości odbiornika nad poziomem terenu warunkująca często dostępność widma radiowego. Obecnie bazy geolokalizacyjne wydają się najprostszym i najtańszym sposobem uzyskiwania informacji o widmie radiowym i trwają prace nad wdrożeniem tego typu rozwiązań. Rozwiązanie to jest jednak efektywne głównie w przypadku pasm wykorzystywanych przez stałe emisje radiowe o znanych i niezmiennych parametrach technicznych (np. emisje telewizyjne, radiowe czy radarowe) i przy ściśle sprecyzowanych warunkach nadawania (maski widma, maksymalna wysokość anteny nadawczej, dopuszczalna szerokość pasma).

3. PRACE STANDARYZACYJNE

Obecnie trwają intensywne prace standaryzacyjne przyszłych systemów radia kognitywnego. W przypadku niektórych standardów opracowane są rozszerzenia poprzednich wersji standardu wykorzystujące dodatkowo kognitywny dostęp do pasma.

Pierwszym standardem CR jest standard IEEE 802.22, który może pracować na zasadzie systemu kognitywnego w paśmie wykorzystywanym przez służby licencjonowane (pasmo TV oraz inne pasma) na zasadzie drugiej ważności (OSA). Pozwala on na uzyskanie bardzo dużych zasięgów sieci (do 100 km) dzięki korzystnym właściwościom propagacyjnym pasm telewizyjnych, przy jednoczesnym wzroście efektywności wykorzystania widma radiowego. Warstwa MAC i PHY systemu bazuje zasadniczo na standardzie IEEE 802.16. Ze względu na złożoność i kosztowność modułów sensingu widma obliwatoryjnych w przypadku 802.22 jego popularność jest obecnie niewielka.

W ramach grupy IEEE 802.11 (WLAN) opracowane jest rozszerzenie standardu 802.11af w celu dostosowania warstwy fizycznej oraz dostępowej MAC tego systemu do wymagań stawianych wtórnym użytkownikom w paśmie telewizyjnym oraz możliwością jego udostępnienia dla nielicencjonowanych użytkowników (systemów kognitywnych). Wersja finalna 802.11af spodziewana jest w roku 2012 i ma obejmować wyłącznie wykorzystywanie baz geolokalizacji bez konieczności sensingu widma, co może spowodować znaczną popularność tego rozwiązania, zwłaszcza w obszarach, w których występuje słabo rozwinięta struktura sieci bezprzewodowych i konieczne jest szybkie uzyskiwanie dużego zasięgu dostępu bezprzewodowego.

Podstawy techniczne i definicje różnych odmian systemów CR są przedmiotem prac komitetu IEEE 1900 i jego podgrup. Aktualnie powołana została nowa podgrupa komitetu IEEE 1900.7 dotycząca opracowania standardu warstw PHY i MAC systemów CR w różnych pasmach (w szczególności TV), w pracach tych ze strony polskiej uczestniczą autorzy referatu.

W Europie równoległe prace toczą się w ramach zespołu ETSI RRS, w ramach którego opracowano już szereg standardów definicyjnych i wstępnych, trwają dyskusje nad kolejnymi standardami, zwłaszcza w odniesieniu do warstw PHY i MAC.

4. WYZNACZANIE BIAŁYCH PRZESTRZENI WIDMA W PAŚMIE TV W POLSCE - PRZYKŁAD

W roku 2006 podczas Regionalnej Konferencji ITU RRC06 został zatwierdzony Plan cyfrowy GE06 [3]. W Planie GE06 opracowano kryteria ochrony sieci DVB-T, które mogą być stosowane przy rozwoju i budowie kolejnych stacji sieci. Następnie możliwe jest wykorzystanie dostępnych zasobów częstotliwości, białych przestrzeni WS do wykorzystania w służbie drugiej ważności przez urządzenia WSD pracujące z wykorzystaniem technik radia kognitywnego.

Poniżej przedstawiono przykładową analizę w wyniku której otrzymano mapę przedstawiającą białe przestrzenie widma w paśmie TV w Polsce wyznaczone dla określonych założeń. Głównym założeniem w przedstawionym przykładzie jest ochrona rzeczywistych zasięgów stacji DVB-T. W analizie nie uwzględniano pozostałych systemów mogących pracować w paśmie TV (ARNS, PMSE, RAS).

Podstawowym założeniem metodologii wyznaczania białych przestrzeni widma zapewniającej ochronę rzeczywistych zasięgów stacji DVB-T, jest traktowanie urządzeń WSD jako dodatkowych analogicznie do uzupełniających Plan GE06 stacji TV.

Uruchamiane byłyby na następujących warunkach:

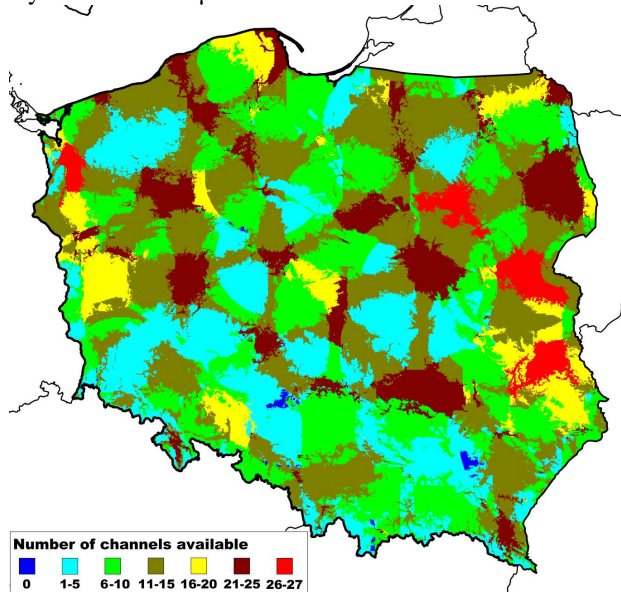
- Warunki ochrony rzeczywistych stacji DVB-T bazujące na parametrach zgodnie z GE06, dla 95% lokalizacji, anteny odbiorczej zawieszona na 10 m n.p.t z charakterystyką kierunkową (dla odbioru stacjonarnego) lub charakterystyką dookólną (dla odbioru przenośnego);
- Obliczenia zakłóceń metodą ITU-R P.1546-2 dla 1% czasu i 50% lokalizacji;
- Agregacja zakłóceń od większej ilości urządzeń WSD nie przekraczająca istniejących poziomów zakłóceń od stacji DVB-T;
- Sąsiednie kanały (n+1, n-1) chronione są na całym obszarze.

W tabeli 1 przedstawiono parametry techniczne dla których wykonano analizy przedstawione w dalszej części.

Tab. 1. Wartości parametrów wykorzystane do analizy

Maksymalny dopuszczalny poziom zakłóceń dla obszaru zasięgu DVB-T	~54-56 dB μ V/m
Współczynnik ochronny	21 dB
Korekta prawdopodobieństwa lokalizacji	13 dB
Agregacja zakłóceń	10 dB
Dyskryminacja anteny odbiorczej TV	16 dB

Dopuszczalny poziom zakłóceń w tych warunkach wyniósł 26-28 dB μ V/m.



Rys. 1. Wyniki analiz dostępności białych przestrzeni widma, BS, wys. zawieszenia anteny 30 m n.p.t., ERP 36 dBm

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki analizy dostępności białych przestrzeni widma kanałów telewizyjnych z pasma 470 – 790 MHz, na obszarze całego kraju w siatce

ok. 600 tyś. punktów, rozmieszczonych w siatce 1 km x 1 km, w postaci mapy z oznaczonymi kolorami, dla których dostępna jest określona liczba kanałów telewizyjnych.

Powyższa analiza przedstawia wyniki dla scenariusza kiedy dostęp kognitywny realizuje stacja bazowa BS, z anteną zawieszoną na wysokości 30 m n.p.t., oraz mocą promieniowaną 36 dBm, zgodnie z jedną z typologii urządzeń kognitywnych przedstawioną w [2]. Ilość dostępnych kanałów waha się od 0 do 27. Na przeważającym obszarze kraju dostępnych jest od kilku do kilkunastu kanałów telewizyjnych. Po uwzględnieniu zasobów przeznaczonych na inne systemy wykorzystujące pasmo TV, ilość dostępnych kanałów nieco się zmniejszy.

Pozostałe typy emisji urządzeń WSD to urządzenia konsumenckie CPE (*Consumer Premise Equipments*) w odbiorze stacjonarnym, z anteną zawieszoną na wysokości 10 m n.p.t. i mocą ERP 30 dBm, oraz urządzenia konsumenckie CPE w odbiorze przenośnym: wysokość zawieszenia anteny 1,5 m n.p.t., emisja z mocą ERP 20 dBm. Wyniki takich analiz przedstawiono na forum CEPT i COST [5, 6].

5. PODSUMOWANIE

Aktualne sposoby zarządzania widmem radiowym: bazujące na tabelach przeznaczeń częstotliwości, rezerwacjach poszczególnych zakresów dla użytkowników i przeznaczeniach częstotliwości oznaczające np. niedopuszczanie innych użytkowników widma do możliwości wykorzystania aktualnie fizycznie wolnych zasobów przestrzeni radiowej ze względu na ich administracyjne przydzielenie innym użytkownikom, w przyszłości będą ewoluować w stronę dostępu kognitywnego do pasm radiowych, w którym dopuszczać się będzie wykorzystywanie wolnych zasobów na zasadzie oportunistycznej (OSA) czy na zasadzie współdzielenia pasma przez różnych użytkowników (LSA) prowadząc w efekcie do wspólnego kolektywnego wykorzystywania widma radiowego (CUS). W początkowym okresie oczekiwać należy coraz powszechniejszego stosowania baz geolokalizacyjnych wskazujących wolne przestrzenie widma radiowego, które na bieżąco, w czasie rzeczywistym, będą udostępniać zasoby widma dzieląc je między poszczególnych użytkowników na podstawie zgłaszających zapytań on-line do bazy. System taki może obejmować zarówno bezpłatny dostęp do pasma (tak jak np. w pasmach ISM, warunkowany np. max. czasem połączenia) jak i licencjonowany dostęp płatny pozwalający na chwilowy zakup określonej przestrzeni widma radiowego (np. w sposób aukcyjny), która jest udostępniana w czasie rzeczywistym np. na określony przedział czasu a następnie zwalniana. Tego typu „chwilowe” wykorzystywanie zasobów radiowych powinno znaleźć odzwierciedlenie w opracowanych procedurach administracyjnych i regulacjach na szczeblu krajowym i międzynarodowym. Pierwsze systemy baz geolokalizacyjnych są obecnie testowane w USA, planowane jest testowanie podobnych rozwiązań w UK i w innych krajach europejskich. Wstępne analizy

dostępności białych przestrzeni widma radiowego w Polsce wykonane w IE wskazują, że istniejące wolne zasoby np. w paśmie UHF są atrakcyjne i pozwalają na znaczne zwiększenie efektywności wykorzystywania tego pasma. Konieczne jest przy tym uzgadnianie z krajami sąsiednimi warunków wykorzystania pasm w sposób kognitywny w obszarach przygranicznych – może to być robione przy wykorzystaniu aktualnie obowiązujących regulacji (RR ITU) oraz wspólnych porozumień bilateralnych. W takich przypadkach warto posiadać wcześniej zweryfikowane i ustalone kryteria kompatybilności elektromagnetycznej. Rozwiązania stosujące kognitywny dostęp do widma będą się rozwijać w związku z bardzo dużym rozwojem systemów bezprzewodowych i koniecznością wykorzystywania coraz większych zasobów widma radiowego w celu zaspokojenia rosnących wymagań użytkowników. Ze względu na swą złożoność i konieczność wcześniejszego rozwiązania wielu zagadnień kompatybilności oraz ustalania zasad regulacyjnych, biznesowych i technicznych związanych np. z wykorzystywaniem baz geolokalizacyjnych można oczekiwać, że praktyczne wdrożenie systemów kognitywnego dostępu do widma na zasadzie kolektywnej (CUS) w sposób oportunistyczny (OSA) czy licencjonowanego współdzielenia (LSA) będzie następować ewolucyjnie w sposób sukcesywny w poszczególnych pasmach radiowych jeszcze przez wiele kolejnych lat. Niewątpliwie spowoduje ono dużo efektywniejsze wykorzystanie pasm radiowych i pozwoli na pozyskanie sporych zasobów widma np. w sposób tymczasowy – w sytuacji powstania dużych wymagań oczekiwanej pojemności czy zasięgu transmisji radiowej.

SPIS LITERATURY

- [1] Mitola III, J., Maguire, G.Q., *Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal*, IEEE Personal Communications, Vol 6, No 4, August 1999;
- [2] ECC Report 159, *Technical and Operational Requirements for the Possible Operational of Cognitive Radio Systems in the “White Spaces” of the Frequency Band 470 – 790 MHz*, Cardiff, January 2011;
- [3] *Final Acts of the RRC-06*, Genewa June, 2006;
- [4] Radio Spectrum Policy Group 2011, *Report on CUS and other spectrum sharing approaches*, “Collective Use of Spectrum”, October 2011, Draft;
- [5] CEPT SE43(11)67, *Proposal of methodology for application to establish geo-location database*, Lizbona, 2011.
- [6] Więcek D., Methodology of White Space estimation in TV bands based on the ITU GE06 technical conditions, COST IC0905 TERRA 3rd Workshop, Brussels, 21st June 2011;
- [7] Więcek D.: Analysis of Compatibility Between Digital Television DVB-T and Radio Astronomy Sharing the Same Frequency Band: 608-614 MHz (IEEE EMC Symposium IEEE, 1999, Seattle
- [8] Kałuski M., Macher M., Więcek D.: *Kompatybilność między systemami nawigacyjnymi RSBN/PRMG i systemami naziemnej telewizji cyfrowej KKRR`2000*, Poznań