

Ewa ŁUKASIK

Institut Informatyki
Politechnika Poznańska

RADIO KOGNITYWNE: ELASTYCZNE ZARZĄDZANIE EKOSYSTEMEM BEZPRZEWODOWYM

COGNITIVE RADIO: FLEXIBLE MANAGEMENT OF THE WIRELESS ECOSYSTEM

The rapid development of wireless transmission systems and the present policy of permanent allocation of the bands caused shortages in the most commonly used frequency bands. With the widespread use of wireless sensor networks (WSN - Wireless Sensor Networks) used for the cooperative monitoring physical or environmental conditions, made this situation even worse. On the other hand the use of the allocated bandwidth varies geographically and over time. Cognitive Radio (CR) is a new paradigm leading to intelligent communication in Next Generation Networks (NGN) and in their evolutionary successor - Future Internet (FI). To ensure the effective transmission network or wireless node flexibly changes sending and/or receiving parameters in order to avoid inter-channel interference with licensed or unlicensed users. Adaptation of parameters proceeds in a dynamic manner. It is based on the results of monitoring and forecasting internal and external elements of the radio environment, such as frequency spectrum, user behavior or network status. This paper presents the principles of cognitive spectrum management, reviews proposed technologies, describes the architecture of cognitive radio systems and recalls the standardization activities in the domain of cognitive radio.

1. Wprowadzenie

Współczesne społeczeństwa stały się zależne od widma radiowego. Gwałtowny rozwój systemów transmisji bezprzewodowej i dotychczasowa polityka przydziału stałych pasm dla różnego typu transmisji spowodowały niedobór w najczęściej wykorzystywanych zakresach częstotliwości. Upowszechnienie się bezprzewodowych sieci sensorów (WSN – Wireless Sensor Networks) służących do kooperacyjnego monitorowania warunków fizycznych bądź środowiskowych sytuację tę jeszcze pogorszy. Pasma radiowe stało się niezwykle cennym zasobem, którego ekonomiczne wykorzystanie stanowi coraz silniejszą potrzebę. Na określenie zakresu fal radiowych przyjęto nawet termin *ekosystem bezprzewodowy* [1].

Nie wystarczy już skrupulatna reglamentacja kanałów radiowych, tym bardziej, że systematycznie wykonywane pomiary wykazały, że wykorzystanie przydzielonych pasm jest zróżnicowane geograficznie i odbywa się z dużą zmiennością w czasie. Dlatego potrzebne są systemy elastyczne, które pozwoliłyby na wykorzystanie przez użytkowników wtórnych zakresów częstotliwości niezajętych w danym okresie czasu przez użytkowników pierwotnych, dla których dany zakres był oryginalnie przeznaczony.

Radio kognitywne (CR – ang. *Cognitive Radio*) stanowi nowy paradygmat prowadzący do inteligentnej komunikacji w sieciach nowej generacji¹ NGN (ang. *Next Generation Network*) i ich ewolucyjnego następcy – Internetu Przyszłości² FI (ang. *Future Internet*). Dla zapewnienia efektywnej transmisji sieć lub węzeł bezprzewodowy elastycznie zmienia parametry nadawania i/lub odbioru w celu uniknięcia interferencji międzykanałowej z licencjonowanymi lub nielicencjonowanymi użytkownikami. Adaptacja parametrów odbywa się w sposób dynamiczny na podstawie wyników monitorowania i prognozowania elementów wewnętrznego i zewnętrznego środowiska radiowego, np. widma częstotliwości, zachowania użytkowników, czy stanu sieci. W artykule przedstawiono ogólną ideę radia kognitywnego, zasady kognitywnego zarządzania widmem, dokonano przeglądu proponowanych technologii z uwypukleniem aspektów informatycznych oraz przedstawiono działalność standaryzacyjną w tym zakresie.

W podrozdziale drugim przedstawiono zasadniczy podział widma elektromagnetycznego na pasma. W podrozdziale trzecim opisano ideę radia kognitywnego zaprezentowaną przez J. Mitolę III – ojca radia kognitywnego - na końcu lat 90-tych ubiegłego stulecia oraz proces ewolucji pojęć od radia sterowanego programowo do radia kognitywnego. Podrozdział czwarty poświęcony jest rozważaniom na temat języka dla systemów radia kognitywnego oraz ontologiom tych systemów. W podrozdziale piątym dokonano przeglądu prac standaryzacyjnych w dziedzinie radia kognitywnego. Podrozdział szósty konkluduje pracę.

2. Widmo radiowe

Widmo radiowe odnosi się do tej części widma elektromagnetycznego, która odpowiada częstotliwościom wykorzystywanym przez różne systemy i urządzenia radiowe (beprzewodowe), czyli niższe niż około 300 GHz (lub, równoważnie, fale dłuższe niż około 1 mm).

¹ Sieci Nowej Generacji (NGN) – według definicji ITU-T [19] jest to sieć pakietowa realizująca usługi telekomunikacyjne i wykorzystująca wiele szerokopasmowych technik transportowych z gwarancją jakości usług (QoS), w której funkcje usługowe są niezależne od wykorzystywanych technik transportowych. Oferuje nieograniczony dostęp użytkowników do poszczególnych usługodawców. Obsługuje ogólnie pojętą mobilność, która pozwoli na spójne i powszechne świadczenie usług dla użytkowników.

² Internet Przyszłości (FI) - ogólne określenie dla działalności badawczej dotyczącej nowych architektur dla Internetu, zarówno aspektów technicznych, jak i nietechnicznych: socjotechnicznych, ekonomicznych i środowiskowych [20]

Tab. 1. Podział elektromagnetycznego widma radiowego według ITU [17]

Tab. 1. Subdivision of electromagnetic radio spectrum into bands by ITU [17]

| Częstotliwość i długość fali w powietrzu | Skrót | Nazwa angielska/polska | Przykładowi użytkownicy |
|--|-------------|--|---|
| < 3 Hz > 100,000 km | TLF | <i>Tremendously low frequency</i> | Naturalny i wytworzony przez człowieka szum elektromagnetyczny |
| 3–30 Hz 100,000 – 10,000 km | ELF | <i>Extremely low frequency</i> | Komunikacja łodzi podwodnych |
| 30–300 Hz 10,000 – 1000 km | SLF | <i>Super low frequency</i> | Komunikacja łodzi podwodnych |
| 300–3000 Hz 1000 – 100 km | ULF | <i>Ultra low frequency</i> | Komunikacja łodzi podwodnych, Komunikacja w kopalniach |
| 3–30 kHz 100 – 10 km | VLF | <i>Very low frequency</i> Fale myriametrowe (bardzo długie) | Nawigacja, sygnały czasu, komunikacja łodzi podwodnych, bezprzewodowe monitory akcji serca, geofizyka |
| 30–300 kHz 10 km – 1 km | LF | <i>Low frequency</i> Fale kilometrowe, długie | Nawigacja, sygnały czasu, fale długie radiodyfuzyjne AM (Europa, częściowo Azja), RFID (LowFID), radio amatorskie |
| 300–3000 kHz 1 km – 100 m | MF | <i>Medium frequency</i> Fale hektometrowe, średnie | Fale średnie radiodyfuzyjne AM, radio amatorskie, nadajniki lawinowe, NFC, RFID (13.56MHz, 2MHz) |
| 3–30 MHz 100 m – 10 m | HF | <i>High frequency</i> Fale dekametrowe, krótkie | Radiodyfuzyjne fale krótkie, CB radio, radio amatorskie, poza horyzontalną łączność lotnicza, poza horyzontalny radar, ALE, NVIS, radiokomunikacja, telefonia mobilna |
| 30–300 MHz 10 m – 1 m | VHF | <i>Very high frequency</i> Fale metrowe, ultrakrótkie | Radiodyfuzja FM, DAB, komunikacja ziemia-samolot, samlot-samolot w polu widzenia, lądowa i morska telefonia mobilna, radio amatorskie i meteorol. |
| 300–3000 MHz 1 m – 100 mm | UHF | <i>Ultra high frequency</i> Fale decymetrowe | Nadajniki telewizyjne, kuchenki i inne urządzenia mikrofalowe, radioastronomia, telefonia mobilna GSM, 2G, 3G, bezprzewodowy LAN, ZigBee, GPS, FRS, GMRS, RFID, DECT, radio amatorskie, |
| 3–30 GHz 100 mm – 10 mm | SHF | <i>Super high frequency</i> fale centymetrowe | Radioastronomia, urządzenia mikrofalowe, WLAN, W-CDMA, WiFi, WiMAX, Bluetooth, ZigBee, RFID, radar, łączność i telewizja satelitarna, DBS, radio amatorskie |
| 30–300 GHz 10 mm – 1 mm | EHF | <i>Extremely high frequency</i> fale milimetrowe | Mikrofalowe szybkie przekaźniki radiowe, czujniki mikrofalowe, |
| 300–3,000 GHz 1 mm – 100 μm | THz/ THF | Fale terahertzowe, submilimetrowe | Obliczenia terahertzowe, spektroskopia terahertzowa |

Różne zakresy widma radiowego są używane do różnych technologii transmisji i podlegają regulacji przez odpowiednie urzędy na szczeblu narodowym i międzynarodowym. Pasma radiowe może być przedmiotem sprzedaży lub może być licencjonowane operatorom prywatnych systemów transmisji radiowej (np. operatorzy telefonii komórkowej czy stacji telewizyjnych). Zakresy częstotliwości są często określane przez ich zakładany użytek (np. widmo komórkowe lub telewizja).

Aby zapobiec zakłóceniom i umożliwić efektywne wykorzystanie widma radiowego, podobne usługi są lokowane w tych samych zakresach częstotliwości według określonego planu, tak, by zmniejszyć prawdopodobieństwo interferencji. Podział na pasma jest uregulowany przez ITU [17] i dotyczy długości fal elektromagnetycznych 10^n lub odpowiednio częstotliwości 3×10^n , co pokazano w Tabeli 1.

Zakresy widma od LHF do THF ITU-T dodatkowo oznaczyło numerami od 4 do 12. Oczywiście każde ze zgrubnie wyznaczonych pasm jest wykorzystywane przez różne systemy w ściśle określonych podpasmach, przy czym najintensywniej wykorzystywane są pasma VHF-SHF.

3. Od radia sterowanego programowo do radia kognitywnego

Widmo elektromagnetycznych sygnałów radiowych jest zasobem naturalnym, którego użycie przez nadajniki i odbiorniki jest licencjonowane przez rządy państw. [3]. Jest to zasób ograniczony - tzw. „przydział częstotliwości” odbywa się w stałych zakresach pasm, co powoduje niedobór w najczęściej wykorzystywanych zakresach częstotliwości. Jednakże w niektórych lokalizacjach geograficznych i w niektórych okresach czasu pasma nie są w pełni wykorzystane, lub nie są wykorzystane wcale. Ukuto pojęcie *dziur spektralnych*, czyli takich pasm częstotliwości przypisanych pierwotnemu użytkownikowi, które w danej lokalizacji geograficznej oraz w danym czasie pasma tego nie wykorzystuje [3]. Istnieją również zakresy częstotliwości, które wcale nie są wykorzystywane, tzw. *białe pasma*, które znacznie wzbogaciłyby możliwości systemów bezprzewodowych.

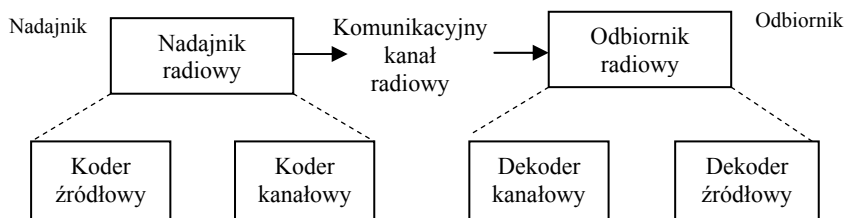
Radio kognitywne stanowi nowe podejście do poprawy wykorzystania widma elektromagnetycznych sygnałów radiowych. Obejmuje zakres metod umożliwiających dostęp do dziur spektralnych przez innych użytkowników w czasie, kiedy pierwotny użytkownik ich nie wykorzystuje. Pojęcie *radio kognitywne* wprowadził Joseph Mitola III w swojej pracy doktorskiej [10], a wcześniej w artykule opublikowanym w 1999 roku w IEEE Personal Communications [9] w oparciu o opracowane przez siebie metody radia sterowanego programowo (ang. *Software Radio*, *Software Defined Radio*, *SDR*).

3.1. Radio sterowane programowo

Radio sterowane programowo jest wielopasmowym systemem radiowym zdolnym obsługiwać wiele interfejsów radiowych¹ (ang. *Air interface*), czyli połączeń radiowych między stacją mobilną a stacją bazową oraz wiele protokołów z wykorzystaniem szerokopasmowych anten, konwersji częstotliwości radiowych, przetworników analogowo –

¹ W języku angielskim używa się terminu *air interface*, co oznacza *interfejs powietrzny*.

cyfrowych i cyfrowo- analogowych, które w przypadku idealnego radia sterowanego programowo są zdefiniowane za pomocą odpowiedniego oprogramowania



Rys. 1. Tradycyjny model systemu komunikacji radiowej [11]

Fig. 1. Traditional Model of a Radiocommunication System [11]

w komputerach ogólnego przeznaczenia. Mitola w [11] podał matematyczne podstawy architektury radia sterowanego programowo.

Tradycyjny system transmisji z wykorzystaniem kanału radiowego w uproszczeniu przedstawiono na rysunku 1. Nadajnik danych cyfrowych jest wyposażony w koder źródłowy i nadmiarowy korekcyjny koder kanałowy oraz modulatory (nie wyróżnione na rysunku), które pozwalają na transmisję danych w określonym paśmie. Odbiornik radiowy wyposażony jest w odpowiedni demodulator oraz dekodery źródłowy i kanałowy.

System radia sterowanego programowo jest znacznie bardziej rozbudowany niż tradycyjny system komunikacyjny:

1. jest - wielopasmowy - pojedynczy kanał z rys. 1 zamienia się na zbiór kanałów;
2. kanał radiowy zostaje rozbudowany i wyposażony w konwertery pasma i zespół odpowiednich anten umożliwiający dostęp do pasma/kanału,
3. wprowadzony musi zostać blok inteligentnego przetwarzania częstotliwości, który jest odpowiedzialny za filtrację sygnału, dalszą translację częstotliwości, oraz parametrów przestrzenno-czasowych
4. modem jest odpowiedzialny za modulację i demodulację; w nadajniku konwertuje kształt reprezentujących dane sygnałów pasma podstawowego na wiele różnych przebiegów odpowiednich dla docelowego kanału transmisyjnego; mogą one znajdować się w pojedynczym paśmie, lub mogą obejmować kilka pasm,
5. kodery źródłowe i kanałowe zostają rozbudowane do różnych, typów (ang. *multiple personalities*); typ obejmuje pasmo radiowe, zbiór kanałów (kanały kontrolne i kanały ruchu), przebiegi (fale) interfejsów radiowych i inne funkcje) zabezpieczenia informacji (autentykacja, szyfrowanie, widmo rozproszone
6. niektóre źródła będą zdalne, stąd dla nich implementuje się wsparcie usługowe i sieciowe za pomocą oprogramowania dla wielowątkowych procesorów kontrolowanych przez układ sterowania.

Dynamiczna selekcja pasm, trybów, a także ich różnorodność, zawsze gwarantująca wymaganą jakość usług QoS wprowadza wielką różnorodność potencjalnie powodującą konflikt dotyczący przetwarzania zasobów [11].

3.2. Problemy badawcze radia kognitywnego

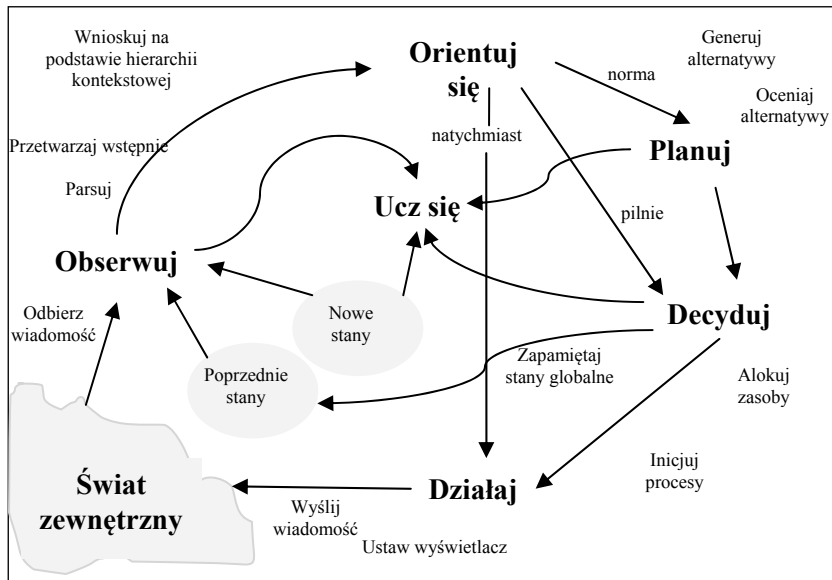
Synonimem radia kognitywnego stało się nazwisko Joseph Mitola III. Nazwa *radio kognitywne* znacznie wyprzedziła wszelkie pomysły dotyczące rozwoju radia sterowanego programowo, ale wytyczyła kierunki jego rozwoju w oparciu o dynamicznie rozwijające się teorie w dziedzinie informatyki dotyczące uczenia maszynowego, systemów opartych na wiedzy, języków formalnych i naturalnych oraz wielu innych problemów interdyscyplinarnych [13].

Mitola opisał je w swojej pracy doktorskiej obronionej w KTH w Sztokholmie, oraz w kilku artykułach, z których najpopularniejszym, cytowanym kilka tysięcy razy jest *Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal*, który ukazał się w [9]. Mitola zauważył, że systemom komunikacyjnym potrzebna jest zawartość elementów sztucznej inteligencji, jednak zaadaptował pojęcie *kognitywny*, które później na różne sposoby było uzasadniane w literaturze [3]. Początkowo chodziło o to, aby odbiornik jak najlepiej zaadaptował się do warunków panujących w sieci bezprzewodowej, teraz nacisk kładzie się na efektywne wykorzystanie widma z wykorzystaniem technologii dynamicznego dostępu do widma (ang. *Dynamic Spectrum Access*, DSA).

3.2.1. Cykl kognitywny

Mitola opisuje cykl kognitywny, przedstawiony na Rysunku 2. następująco [8]:

Początkiem procesu są bodźce świata zewnętrznego. Radio kognitywne analizuje te bodźce, aby wyodrębnić zawarte w nim kontekstowe podpowiedzi niezbędne do wykonania przypisanych mu zadań. Może to być analiza współrzędnych GPS, analiza światła i temperatury w celu ustalenia, czy impuls pochodzi z wnętrza, czy był wygenerowany na zewnątrz budynku, co zawiera się w fazie obserwacji cyklu poznania (*Obserwuj*). Przychodzące i wychodzące wiadomości są analizowane pod względem treści, także treści dostarczonej przez użytkownika. Pozwala to na określenie stopnia ważności tego wywołania w kontekście konieczności nawiązania komunikacji i wykonania niezbędnych zadań.



Rys. 3. Cykl kognitywny według Mitoli III [8]

Fig. 3. Cognition cycle according to Mitola III [8]

Problem ten jest pokrewny określaniu tematu w przetwarzaniu języka naturalnego. Nawet wiele błędów na poziomie rozpoznawania słów może prowadzić do wysokiego prawdopodobieństwa detekcji zwykłych zdarzeń. Na przykład radio może z pewnym prawdopodobieństwem wywnioskować, że zgłoszenie dotyczy kursu taksówki, jeśli użytkownik zamówił taksówkę głosowo i znajduje się w obcym kraju. Etap *Orientuj się* decyduje, jak pilne jest nawiązanie komunikacji. Etap *Planuj* generuje, rozwija i oszacowuje alternatywne działania. Etap decyzji alokuje zasoby obliczeniowe i radiowe (widmowe) podporządkowanemu oprogramowaniu (konwencjonalnemu radiu). Etap *Działaj* inicjuje zadania z wykorzystaniem przydzielonych zasobów przez określony okres czasu. Jeśli np. system zostanie pozbawiony zasilania (bateria wyjęta), etap *Orientuj się* natychmiast wywoła stan *Działaj* w celu zapisania/zapamiętania wszystkich niezbędnych informacji dla umożliwienia ponownego startu. Nagła i niespodziewana utrata sygnału nośnego w bezprzewodowej sieci LAN (np. po wyjściu użytkownika z nie-inteligentnego budynku) spowoduje pilne zadziałanie stanu *Decyduj*, który wznowi przepływ ruchu np. przez droższą sieć 3G. Wiele innych normalnych działań być może nie będzie potrzebowało odpowiedzi tak bardzo czułych na czas, dzięki czemu może zostać zastosowany cykl *Planuj-Decyduj-Działaj*. Zakłada się, że radio kognitywne będzie wykorzystywało pewne formy nadzorowanego i nienadzorowanego uczenia maszynowego.

Radio kognitywne jest ukierunkowanym na cel systemem, w którym radio niezależnie obserwuje środowisko radiowe, wnioskuje kontekst, określa alternatywy, generuje plan, nadzoruje usługi i uczy się na błędach. Nowością jest tutaj cykl *obserwacja-myślenie-działanie* (ang. *observe-think-act*) w porównaniu z istniejącymi rozwiązaniami, gdzie urządzenia mobilne albo opiera się na wyborze częstotliwości przez użytkownika, albo ślepo przyjmuje instrukcje z sieci. Radio kognitywne jest więc o wiele bardziej elastyczne.

3.2.2. Cechy radia kognitywnego

Haykin sprawdził zasadność użycia nazwy kognitywny w stosunku do kognitywnego radia [3] najpierw posługując się definicją z Encyklopedii nauk komputerowych [14], a potem biorąc pod uwagę [12]

Radio kognitywne jest inteligentnym bezprzewodowym systemem komunikacji, który jest świadomy swojego otoczenia (świata zewnętrznego) i używa metodyki rozumienia przez budowanie w celu uczenia się ze środowiska i adaptowania swoich stanów wewnętrznych do statystycznych zmian przychodzących sygnałów radiowych przez wprowadzanie w czasie rzeczywistym odpowiednich zmian niektórych parametrów systemu (np. energii transmisyjnej, częstotliwości sygnału nośnego, strategii modulacji) mając na względzie dwa zasadnicze cele:

- *zapewnienie niezawodnej komunikacji gdziekolwiek i kiedykolwiek jest to potrzebne,*
- *efektywne wykorzystanie widma radiowego.¹*

Kluczowe elementy tej definicji to: świadomość, inteligencja, uczenie, adaptacja, niezawodność i efektywność. Połączenie tych cech jest możliwe dzięki rozwojowi metod cyfrowego przetwarzania sygnałów, sieci, uczenia maszynowego, inżynierii oprogramowania i coraz bardziej zaawansowanego technicznie sprzętu komputerowego. Zaskakująco brzmiące w tym kontekście pojęcie *świadomości* dotyczy transmitowanego kształtu sygnału, widma radiowego, sieci telekomunikacyjnej, geografii, dostępnych lokalnie usług, potrzeb użytkowników, języka, sytuacji i polityki bezpieczeństwa. Jednakże określenie to na trwałe wpisało się w obowiązującą definicję radia kognitywnego, która współcześnie, według [18] brzmi następująco:

Radio kognitywne jest radem, w którym systemy komunikacyjne są świadome swoich stanów wewnętrznych oraz otaczającego je środowiska, jakimi są lokalizacja i wykorzystanie widma radiowego w tej lokalizacji. Systemy te mogą podejmować decyzje dotyczące swojego działania przez odwzorowanie tych informacji z predefiniowanymi zasadami.

Warto dodać, że dziś radio kognitywne odróżnia się od radia inteligentnego, w którym w dużym stopniu wykorzystuje się uczenie maszynowe, a tym samym system lepiej dostosowuje się do potrzeb użytkowników.

3.2.3. Zadania kognitywne systemu radiowego

Haykin [3] wyróżnia następujące zadania radia kognitywnego, które muszą być wykonane *on-line*:

1. Analiza sceny radiowej (środowiska radiowego w zasięgu odbiornika), która obejmuje:
 - a. estymację temperatury interferencji środowiska radiowego,
 - b. detekcję dziur spektralnych;
2. Identyfikacja kanału, na którą składa się:
 - a. estymacja informacji dotyczącej stanu kanału,
 - b. predykcja pojemności kanału, którą może wykorzystać nadajnik;
3. Kontrola mocy nadajnika i dynamiczne zarządzanie widmem.

Elementy powyższych zadań zostaną omówione w dalszej części niniejszego podrozdziału. Wszystkie rozważania są oparte na fundamentalnej pracy Haykina [3]

¹ Tłumaczenie autorki

Temperatura interferencji

W tradycyjnych systemach transmisyjnych moc sygnału projektowana była w kontekście warunków transmisyjnych i granicznego poziomu szumu. W radiu kognitywnym może nastąpić nagle zmiana warunków transmisji poprzez pojawienie się nowego sygnału.

Wprowadzono więc mechanizm adaptacyjnej interakcji w czasie rzeczywistym pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem oparty na temperaturze interferencji, która ma służyć jako podstawa zarządzania źródłami interferencji środowisku interferencyjnym. Instytucje regulacyjne ustalać będą limity temperatury dla zapewnienia odpowiednich warunków transmisji.

W określonym paśmie częstotliwości, w którym temperatura interferencji nie została przekroczona, będzie możliwa obsługa dodatkowych użytkowników, przy czym limit wprowadzonej do kanału energii będzie określony dopuszczalną temperaturą interferencji.

Temperaturę interferencji określa się w zależności od energii skali Kelvina.

Analiza warunków przestrzenno-czasowych transmisji

Sygnały emitowane przez nadajniki radiowe mają charakter niestacjonarny zarówno w czasie, jak i w przestrzeni, stąd pasywne zadanie analizy sceny radiowej polega na przetwarzaniu przestrzenno-czasowym.

Macierz sensorów (ang. *sensor array*) to grupa czujników rozmieszczonych według określonego wzoru. Zaletą korzystania z macierzy sensorów zamiast pojedynczego sensora jest to, że macierz może zwiększyć wzmocnienie sygnału z anteny w kierunku sygnału jednocześnie zmniejszając wzmocnienie w kierunku hałasu i zakłóceń. Innymi słowy, macierz sensorów może zwiększyć stosunek sygnału do szumu (SNR): wzmocnić sygnał i stłumić hałas. Poza tym macierz sensorów pozwala wykryć kierunek i odległość kolidującego źródła sygnału.

Kształtowanie wiązki (ang. *beamforming*) jest techniką przetwarzania sygnału wykorzystywaną w macierzach sensorowych (np. szykach antenowych) do kierunkowej transmisji oraz odbioru sygnału. Efekt jest uzyskiwany poprzez ułożenie elementów promieniujących w pewien sztyk w taki sposób, że sygnały pod pewnymi kątami wzmacniają się a pod innymi wytłumiają. Kształtowanie wiązki może być wykorzystywane zarówno po stronie nadawczej jak i odbiorczej w celu osiągnięcia selektywności przestrzennej.

Adaptacyjne kształtowanie wiązki jest wykorzystywane w kognitywnym radiu do kontroli interferencji, która odbywa się zarówno nadajniku, jak i w odbiorniku, jednak w różny sposób. Nadajnik wykorzystuje rozpoznanie geograficzne, by skoncentrować swój wzorzec nadawczy w kierunku odbiornika. W odbiorniku wykorzystywane jest kształtowanie wiązki w celu adaptacyjnego usuwania resztkowej interferencji ze znanego nadajnika lub interferencji pochodzącej od innych nieznanych nadajników.

Detekcja dziur spektralnych

Przy tak skomplikowanym systemie, jakim jest radio kognitywne zakłada się niestacjonarność transmitowanych sygnałów. Aby to załagodzić, przychodzący sygnał radiowy dzieli się na ciągłą sekwencję na tyle krótkich impulsów, że można je potraktować jako pseudostacjonarne i na tyle długich, by można było uzyskać estymatę spektralną. Zwiłokrotnione okna ortonormalne (ang. *multi taps*) zastosowane do analizy sygnału radiowego w połączeniu z rozkładem SVD pozwalają oszacować widmo mocy dolnego poziomu szumu środowiska radiowego. Jest to procedura złożona obliczeniowo. Dla każdej potencjalnej częstotliwości oblicza się wartości własne, po czym następuje dekompozycja SVD (MTM-SVD, ang. *multitaper spectral estimation combined with singular value decomposition*). Metoda ta pozwala wykrywać dziury spektralne.

Estymacja stanu kanału transmisyjnego

W tradycyjnych systemach transmisji znajomość informacji o stanie kanału (CSI, ang. *channel-state information*) uzyskuje się dzięki zastosowaniu detekcji różnicowej lub transmisji sygnału pilotowego, co jest rozwiązaniem kosztownym. W systemach radia kognitywnego odbiornik jest uczony. Uczenie nadzorowane polega na trenowaniu odbiornika krótką serią treningową, przesyłaną przed właściwą transmisją. Na tej podstawie szacuje się stan kanału, a odbiornik przełączany jest w stan śledzenia. Do przeprowadzenia efektywnej transmisji potrzebna jest również znajomość pojemności kanału, wyznaczającej maksymalną przepływność bitową, którą wyznacza się ze wzoru Shannona. Oblicza ją odbiornik i przesyła do nadajnika jako sprzężenie zwrotne (ang. *rate feedback*).

Kooperacja i rywalizacja w środowisku radia kognitywnego

Radio kognitywne pracuje w sposób zdecentralizowany. Odpowiednią organizację dostępu do kanału zapewniają *mechanizmy kooperacyjne*, których elementami są dobrze opracowana *etykieta transmisyjna* i *protokoły* a także *kooperacyjne sieci ad hoc*, w których komunikacja odbywa się bez stałej infrastruktury. Jednak w środowisku radia kognitywnego oprócz elementów kooperacyjnych można wyróżnić z gruntu odmienny proces, proces *rywalizacji*, co jest związane z ograniczonymi zasobami w sieci, stąd włączenie do dziedziny radia kognitywnego *stochastycznej teorii gier*.

W przypadku braku rywalizacji problem jest uproszczony i sprowadza się do teoretycznego problemu optymalnego sterowania: określa się pojedynczą funkcję kosztu, która jest optymalizowana dla wszystkich graczy. W niekooperacyjnej grze każdy z graczy podejmuje decyzję niezależnie. Do ich rozwiązania stosuje się procesy Markowa (pojedynczy gracz i wiele stanów) i gry macierzowe (wielu graczy i pojedynczy stan) oraz gry stochastyczne (wielu graczy i wiele stanów), gdzie dąży się do tzw. równowagi Nasha, czyli profilu działania (wektora akcji graczy), w której każde działanie gracza jest najlepszą odpowiedzią na działania wszystkich innych graczy. Teoria równowagi Nasha nie sprawdza się w każdej sytuacji, uzupełnia się ją więc modelami uczącymi.

Dlatego i w tym zakresie stosuje się *metody uczenia maszynowego*, a także rozpatruje się systemy radia kognitywnego w kontekście samoorganizujących się systemów oraz gier ewolucyjnych.

Dynamiczne zarządzanie widmem

Zarządzania widmem ma za zadanie rozwinąć adaptacyjną strategię efektywnego i wydajnego wykorzystania widma częstotliwości radiowej, a w szczególności wykorzystania dziur widmowych wykrytych przez analizatory sceny radiowej i kontrolery mocy nadawczej, wybranie strategii modulacji, która adaptuje się do zmieniających się warunków środowiska radiowego, przez cały czas zapewniając niezawodną komunikację w kanale transmisyjnym.

Opracowanie odpowiedniego języka programowania

Zarządzanie tak skomplikowanym systemem, jakim jest radio kognitywne wymaga specjalnie dostosowanego do tego celu języka, który odgrywa kluczową rolę w organizacji cyklu kognitywnego.

4. Język programowania i ontologie dla radia kognitywnego

Radio kognitywne, będące złożonym systemem komputerowym wymaga odpowiedniego języka programowania, który wspomagałby oparte na zarządzaniu wiedzą działanie systemu. Potrzebę taką dostrzegł w swoich pionierskich pracach Mitola, prace nad językiem prowadzili inni badacze, a zasady, którymi należy kierować się przy budowie takiego języka są przedmiotem prac standaryzacyjnych.

4.1. RKRL – język reprezentujący wiedzę radiową

Z rozważań Mitoli nad radiem sterowanym programowo [9] wywodzi się koncepcja specyficznego dla niego języka reprezentującego wiedzę - *Radio Knowledge Representation Language*, RKRL, wykorzystującego zasady etykiety radiowej.

Etykieta radiowa (ang. *Radio etiquette*) jest zbiorem pasm częstotliwości radiowych, interfejsów radiowych, protokołów, wzorców przestrzennych i czasowych, które modyfikują użycie widma radiowego. Radio kognitywne rozszerza radio sterowane programowo o oparte na modelu radiowym rozumowanie dotyczące takich etykiet. Radio kognitywne wzmacnia elastyczność spersonalizowanych usług poprzez język RKRL i umożliwia automatyczne odkrywanie potrzeb użytkownika. Pozwala na prowadzenie negocjacji pomiędzy stacjami odbiorczymi na temat użycia widma w kontekście płynnego użycia przestrzeni, czasu oraz kontekstu użytkownika. Wtedy węzły są traktowane jako świadomi inteligentni agenci poszukujący sposobów na dostarczenie usług użytkownikowi poza jego świadomością potrzeb.

4.2. Radio kognitywne i języki deklaratywne

Te pierwsze wizjonerskie spostrzeżenia Mitoli dotyczące RKRL rozwinęli w swoich pracach m.in. Kokar i Lechowicz [5,6]. Ich definicja radia kognitywnego z perspektywy językowej opiera się na funkcji agenta, czyli systemu, który może:

- rozumować używając znacznej części odpowiednio zdefiniowanej wiedzy,
- uczyć się na podstawie doświadczenia, tak, że jego działanie polepsza się,
- wyjaśniać swoje działanie i wykonywać polecenia,
- znać swoje możliwości i zastanawiać się nad swoim działaniem,
- reagować pewnie w niespodziewanych sytuacjach.

Ponieważ wszystkie definicje podkreślają, że radio kognitywne musi umieć wyrażać wiedzę na temat własnego stanu i na temat środowiska, potrzebny jest język, który te koncepcje będzie mógł reprezentować.

Pierwsze podejście obu autorów zaprezentowane w [6] opierało się na języku OWL (*Web Ontology Language*), choć istnieją obszary, których nie można za pomocą tego języka opisać. Język radia kognitywnego musi mieć możliwość wprowadzania nowych funkcji oraz musi być zdolnym specyfikować dynamikę zachowania elementów radia. Elastyczność funkcjonalności radia kognitywnego wymaga mocy wnioskowania formalnych języków deklaratywnych oraz formalnej semantyki, możliwej do przetwarzania przez komputer.

Paradygmat deklaratywny zakłada, że wszelka wiedza zawarta w bazie danych może być wykorzystana dla znalezienia odpowiedzi na nieznanne zapytania [18]. Program w języku deklaratywnym może znaleźć odpowiedź bez jawnie wyrażonej wiedzy, co czyni ten paradygmat bardziej dostosowanym do osiągnięcia celu reakcji na niespodziankę. Dodanie nowej wiedzy do bazy pociąga za sobą to, że program będzie musiał poprawnie zidentyfikować tę dodaną wiedzę. To z kolei sprawia, że język deklaratywny, w którym wiedza jest wyrażona, musi posiadać semantykę możliwą do przetwarzania przez komputer – musi istnieć logika powiązana z tym językiem, czyli pojawia się potrzeba wprowadzenia języków formalnych z formalną syntaktyką powiązanych z formalną semantyką. Formalna syntaktyka oznacza istnienie reguł decydujących, czy dany łańcuch znaków należy do języka, czy nie. Formalna semantyka odnosi się do interpretacji, czyli odwzorowań terminów językowych na wyrażenia matematyczne.

W artykule [6] dyskutowane są formalne języki z formalną semantyką w kontekście formalnego systemu.

Elastyczność języków deklaratywnych ma swoją cenę - cenę wysokich wymogów czasowych i pamięciowych, co stanowi duży problem dla działających w trybie czasu rzeczywistego systemów radia kognitywnego.

4.3. MLM – Modeling Language for Mobility

Konieczność zastosowania języków deklaratywnych do sterowania radiem kognitywnym zaowocowało intensyfikacją prac w celu opracowania ontologii radia kognitywnego, na bazie której podjęto prace nad opartym na tej ontologii języku modelowania dla systemów mobilnych MLM (ang. *Modelling Language for Mobility*) w ramach Wireless Innovation Forum [18], gdzie powstała grupa robocza MLM. Projekt dotyczący języka MLM obejmuje Description of the Cognitive Radio Ontology. Document WINNF-10-S-0007, [16], w którym znajdują się następujące elementy opisujące ontologię przygotowaną w języku OWL:

- (1) opracowanie przypadków użycia dla komunikacji bezprzewodowej, w których język MLM może ułatwić elastyczną komunikację,
- (2) opracowanie ontologii radia kognitywnego CRO (ang. *Cognitive Radio Ontology*), która wyraża aspekty strukturalne, funkcjonalne i behawioralne modeli komunikacji bezprzewodowej,
- (3) opracowanie planu sygnalizacji, wymagań oraz przeprowadzenie analizy technicznej wymiany informacji, które umożliwią wprowadzenie cech nowej generacji do systemów radiowych,
- (4) opracowanie zasad i procedur (polityki) opartych na regułach sterowania radiowego,
- (5) rozszerzenie ontologii potrzebne do wspierania sterowania i kontroli opartych na strategii.

Ontologia radia kognitywnego została ukończona we wrześniu 2010 roku i jest dostępna w języku OWL [16].

Prace nad językiem dla radia kognitywnego wpisują się w prace grupy roboczej opracowującej standard IEEE P 1900. W styczniu 2012 roku został zatwierdzony standard IEEE P 1900.5 [15], który definiuje język i wymagania dotyczące architektury systemów służących interoperacyjnemu, niezależnemu od sprzedawcy sterowaniu funkcjonalnością i zachowaniem systemów radiowych i sieci bezprzewodowych. Standard definiuje zależność języka polityki i architektury od potrzeb regulatora, operatora, użytkownika, i wytwórcy sprzętu.

Następny etap prac prowadzony w ramach IEEE P 1900.5.1 ma za zadanie opracowanie w oparciu o wytyczne P 1900.5 języka służącego do zarządzania funkcjonalnością i zachowaniem sieci z dynamicznym dostępem do widma. Do tego standardu będą włączone również wyniki prac Grupy MLM-WG (Modeling Language for Mobility Work Group), której działanie zostało omówione w podrozdziale 4.3

5. Standardy i ich wdrożenia

Idea radia kognitywnego rozwija się już od około piętnastu lat, prace badawcze koncentrują się na wielu aspektach tego skomplikowanego zagadnienia. Niewątpliwym sukcesem było opracowanie standardu IEEE 802.22, który pozwalał na nielicencjonowaną eksploatację niewykorzystanych zasobów pasma telewizyjnego. Dalsze prace standaryzacyjne IEEE odbywały się w ramach standardu P 1900, który jest przygotowywany wspólnie z IEEE Communications Society and the IEEE Electromagnetic Compatibility Society. Komitet standaryzacyjny, który przygotowywał te dokumenty w 2010 roku zmienił swoją nazwę na IEEE DySPAN-SC (ang. *Dynamic Spectrum Access Networks* – Sieci z Dynamicznym Dostępem do Widma) i został całkowicie podporządkowany Komitetowi Standaryzacyjnemu IEEE Communication Society.

5.1. Standard IEEE 802.22

W listopadzie 2004 powstała Grupa Robocza IEEE 802.22, której celem było ustalenie interfejsu dla transmisji bezprzewodowej opartego na paradygmacie radia kognitywnego. Interfejs radiowy (ang. *air interface*) obejmował warstwę fizyczną i warstwę danych modelu OSI, zwłaszcza tworzącą ją podwarstwę MAC (ang. *Media Access Control Layer*) i podwarstwę LLC (ang. *Logical Link Control*). Celem było wykorzystanie pasma telewizyjnego przez nielicencyjne urządzenia bezprzewodowe [1]. Standard reguluje działanie sieci WRAN (ang. *Wireless Regional Area Network*) – bezprzewodowej sieci regionalnej wykorzystującej niezagospodarowane zasoby pasma telewizyjnego (ang. *TV white spaces*).

Celem było wyposażenie w szerokopasmowy dostęp regiony o małym zaludnieniu, szczególnie na obszarach wiejskich. Była to pierwsza próba zdefiniowania interfejsu opartego na technikach radia kognitywnego z *oportunistycznym*¹ bezinterferencyjnym użyciem pasma TV, które jest nielicencjonowane.

5.2. Standardy IEEE DySPAN

We wstępie do podrozdziału 5 wyjaśniono pochodzenie Komitetu Standaryzacyjnego IEEE o skrótowej nazwie DySPAN-SC (*Dynamic Spectrum Access Networks*), który przejął zarządzanie standardami P 1900 [15].

¹ ang. *opportunistic* pochodzi od słowa *opportune*, co oznacza m.in. dogodny, w tym wypadku także dostępny.

Siedem grup roboczych pracuje niezależnie nad następującymi problemami:

- P 1900.1 – definicje i koncepcje dynamicznego dostępu do widma (ang. *Standard Definitions and Concepts for Dynamic Spectrum Access: Technology Relating to Emerging Wireless Networks, System Functionality, and Spectrum Management*)
 - P 1900.2 – rekomendowane praktyki analizy interferencji w paśmie własnym i pasmach sąsiednich (ang. *Recommended Practice for the Analysis of In-Band and Adjacent Band Interference and Coexistence Between Radio Systems*),
 - P 1900.3 – rekomendowane praktyki oceny zgodności modułów programowych w systemach radia sterowanego programowo (ang. *Recommended Practice for Conformance Evaluation of Software Defined Radio (SDR) Software Modules*)
 - P 1900.4 – bloki architektury umożliwiające elementom sieci rozproszone podejmowanie decyzji dotyczących zoptymalizowanego użycia zasobów radiowych w heterogenicznych sieciach z dostępem bezprzewodowym (ang. *Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks*)
 - P 1900.5 – omówiony w podrozdziale 4.3 - język i architektura polityki zarządzania radiem kognitywnym w aplikacjach z dynamicznym dostępem do widma (ang. *Policy Language and Policy Architectures for Managing Cognitive Radio for Dynamic Spectrum Access Applications*)
 - P 1900.6 – interfejsy wykrywające widmo i struktury danych dla systemów z dynamicznym dostępem do widma i innych zaawansowanych systemów komunikacyjnych (ang. *Spectrum Sensing Interfaces and Data Structures for Dynamic Spectrum Access and other Advanced Radio Communication Systems*)
 - P 1900.7 – biała przestrzeń radiowa (ang. *White Space Radio*)
- Działa również otwarta grupa DySPAN ad hoc, która powstała niedawno i zajmuje się dynamicznym dostępem do widma w środowisku pojazdów (ang. *Dynamic Spectrum Access in Vehicular Environments*).

Ten krótki przegląd prac standaryzacyjnych pokazuje stan rozwoju koncepcji, która pojawiła się piętnaście lat temu. Wiele pomysłów i problemów postawionych przez Mitolę, a przeanalizowanych przez Haykina zostało rozwiązanych, jednak opracowanie w pełni kognitywnego radia pozostaje kwestią przyszłości.

6. Zakończenie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono ideę radia kognitywnego, która pojawiła się na końcu lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia i stała się siłą napędową rozwoju współczesnych systemów komunikacyjnych opartych na transmisji bezprzewodowej. Przywołano pionierskie prace Josepha Mitoli III, który przedstawił wizję radia kognitywnego oraz prace Simona Haykina, który osadził koncepcję na gruncie systemów komunikacyjnych i dostarczył niezwykle cennego komentarza. W pracach tych znalazło się uzasadnienie stosowności nazwy *radio kognitywne* oraz identyfikacja podstawowych problemy do rozwiązania w warstwie fizycznej, sygnałowej, jak również w warstwie informatycznej. Obaj autorzy podkreślali, że zasadniczą cechą systemów radia kognitywnego jest *świadomość* warunków otaczającego środowiska widmowego, jak również *świadomość* własnego stanu, co pozwala na podjęcie właściwej decyzji w kwestii wyboru sposobu działania i wykorzystania wolnych zasobów widmowych. Nie sposób analizować dzisiejsze rozwiązania dotyczące radia kognitywnego bez znajomości tych prac.

Prace Kokara dotyczące języka systemów radia kognitywnego dały początek badaniom mającym na celu opracowanie ontologii radia kognitywnego i wprowadzenia systemów opartych na wiedzy, co nie tylko upraszcza, ale wręcz umożliwia działanie tych systemów według wypracowanych założeń. Warto dodać, że autor ten bierze aktywny udział w pracach nad językiem MLM i ontologią systemu radia kognitywnego.

Literatura dotycząca radia kognitywnego jest niezmiernie obszerna, ponieważ paradygmat tego radia jest na tyle wieloaspektowy, że stanowi nową filozofię transmisji bezprzewodowej, więc większość problemów rozwiązywanych w dziedzinie telekomunikacji zawsze w pewien sposób łączy się z zagadnieniami radia kognitywnego. Zamiast więc przytaczać partykularne rozwiązania cząstkowe, autorka zdecydowała się na przedstawienie prac standaryzacyjnych w zakresie radia kognitywnego, które z jednej strony pokazują aktualny stan rozwoju tych systemów, jak i prognozują przyszłe działania w zakresie zarządzania ekosystemem bezprzewodowym..

Bibliografia

- [1] Cordeiro C., Challapali K., Birru D., Shankar S., IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard based on Cognitive Radios, *Proc. IEEE Int. Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks*, 2005, 328-335.
- [2] Description of the Cognitive Radio Ontology. Document WINNF-10-S-0007, <http://groups.winnforum.org/d/do/3370>.
- [3] Haykin S., Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23 (2), 201-220.
- [4] IEEE P 1900, <http://grouper.ieee.org/groups/dyspan>.
- [5] Kokar M.M., Brady D., Baclawski K., Roles of ontologies in cognitive radios, [in: Fette B., Ed., *Cognitive Radio Technology*,] Oxford, U.K.: Newnes, 2006, 401-433.
- [6] Kokar M.M., Lechowicz L., Language Issues for. Cognitive Radio, *Proc. IEEE*, 2009, 97 (4), April 689-707.
- [7] Mitola III, J., Software radio architecture: a mathematical perspective, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(4), 514-538.
- [8] Mitola III, J., Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications, 6th International Workshop on Mobile Multimedia Communications, Nov 1999.
- [9] Mitola III, J., Maguire, G.Q., Jr., Cognitive radio: making software radios more personal, *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4), 13-18.
- [10] Mitola III, J., Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio, PhD Thesis, KTH, Stockholm, 2000.
- [11] Mitola III, J., Software Radio Architecture Evolution: Foundations, Technology Tradeoffs, and Architecture Implications, *EICE Trans. on Communications*, Vol.E83-B (6), 1165-1173.

- [12] Pfeifer R., Scheier C., *Understanding Intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press, 1999, 5–6.
- [13] Poole J., *Future of Cognitive Radio - an interview with Dr Joseph Mitola*, <http://www.radio-electronics.com/analysis/receivers/2010-03/joe-joseph-mitola-cognitive-radio-future.php>.
- [14] Ralston A. Reilly E. D., *Encyclopedia of Computer Science*. New York: Van Nostrand, 1993, 186–186.
- [15] <http://grouper.ieee.org/groups/dyspan/>
- [16] <http://groups.winnforum.org/p/cm/ld/fid=85>
- [17] <http://life.itu.int/radioclub/rr/art02.htm>
- [18] <http://www.wirelessinnovation.org>
- [19] http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com13/ngn2004/working_definition.html
- [20] <http://www.future-internet.eu/>