



Kooperacyjny monitoring widma bazujący na fuzji danych z wielu sensorów

MACIEJ MAZURO

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, maciej.mazuro@wat.edu.pl

Streszczenie. Technologia rozwija się coraz szybciej w każdym obszarze naszego życia. Wszyscy mamy urządzenia elektroniczne, które emitują energię elektromagnetyczną. Promieniowanie sygnałów radiowych jest podstawowym elementem komunikacji bezprzewodowej, nawigacji satelitarnej bądź monitoringu w czasie rzeczywistym. Nowoczesne armie posiadają rozwiązania technologiczne oparte na technologiach bezprzewodowych, które poprawiają skuteczność działania, zwiększają świadomość sytuacyjną oraz pozwalają na szybsze podejmowanie decyzji, ale równocześnie w spektrum elektromagnetycznym wyposażenie korzystające z energii elektromagnetycznej można porównać do latarki — przeciwnik może zaobserwować „świecące” punkty na spektrogramach oraz zobrazowaniach w dziedzinie częstotliwości. Pozwala to na łatwe wykrycie oraz lokalizację celu, a następnie jego eliminację. Jest to domena, w której świetnie sprawdzają się techniki rozpoznania radioelektronicznego — rodzaj rozpoznania wojskowego, w którym spektrum elektromagnetyczne wykorzystywane jest do zdobywania informacji na temat przeciwnika. Jedną z metod to monitoring widma oparty na analizie odbieranych sygnałów radiowych. Obecnie coraz częściej twierdzi się, że informacja z jednego sensora to zbyt mało. Konieczne jest zbieranie produktów rozpoznawczych z wielu urządzeń, a następnie skuteczna fuzja danych. Algorytmy DF (ang. *Data Fusion*) pozwalają na kooperacyjny sensing widma elektromagnetycznego, co przekłada się na większe prawdopodobieństwo detekcji sygnału. Warto rozważyć wprowadzanie rozwiązań radia definiowanego programowo i bezzałogowych statków powietrznych, co pozwala na miniaturyzację systemów rozpoznawczych i zwiększenie zasięgu przez wykorzystanie platform latających. Implementacja systemów bezzałogowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji, zdolnej do podejmowania szybkich i trafnych decyzji, pozwoli na uniknięcie strat ludzkich.

Słowa kluczowe: rozpoznanie radioelektroniczne, bezzałogowe statki powietrzne, radio definiowane programowo, fuzja danych, sztuczna inteligencja

DOI: 10.5604/01.3001.0054.2898

1. Wprowadzenie

Rozpoznanie radioelektroniczne i walka radioelektroniczna znajdują coraz większe uznanie w oczach dowódców wysokiego szczebla i decydentów. Jest to spowodowane nasyceniem pola walki urządzeniami elektronicznymi, które promieniują energię elektromagnetyczną. Dobrze zamaskowany żołnierz będący w ukryciu pozostaje niewidoczny dla satelity rozpoznania obrazowego wyposażonego w kamery największej rozdzielczości, ale jeśli jego podręczna radiostacja nada choćby krótki komunikat, zostanie to zarejestrowane i pozwoli na lokalizację. WRE (walka radioelektroniczna) to obszar ściśle powiązany z działalnością wywiadowczą, więc w mediach społecznościowych i portalach informacyjnych nie pojawiają się głośne wzmianki o nowoczesnym sprzęcie lub skutecznej operacji, ale każda armia prowadzi swoje działania wywiadowcze non stop w spektrum, które pozostaje niewidoczne dla ludzkiego oka. Nowoczesne systemy wykorzystują sygnały radiowe o różnych częstotliwościach do transmisji informacji zarówno w postaci tekstowej, audio, jak i wideo. Głównym zadaniem pododdziałów WRE jest przechwycenie relacji, zdekodowanie i odczytanie treści komunikatu oraz wyciągnięcie wartościowych wniosków. Odbywa się to przez implementację wybranego algorytmu monitoringu widma w odbiorniku radiowym. W zależności od specyfikacji technicznych możliwa jest analiza określonego pasma częstotliwości z zadaną dokładnością. Pozwoli to być krok przed przeciwnikiem, który nie będzie świadomy, że jego plany zostały ujawnione.

Podstawowym zadaniem jest opracowanie skutecznego narzędzia sensingu, które poradzi sobie z wyzwaniami z obszaru SIGINT (ang. *Signal Intelligence*). Wiele dróg propagacji fal radiowych, zanikanie (ang. *shadowing*) oraz problemy ukrytego węzła (ang. *hidden node problem*) to wyzwanie dla inżynierów pracujących dla pododdziałów rozpoznania radioelektronicznego. W literaturze opisano wiele rozwiązań, które mają wady i zalety. W zależności od zadania należy przygotować się na kompromisy w wyborze implementowanej technologii. Metody fuzji danych oraz algorytmy sztucznej inteligencji stanowią relatywnie nowe wsparcie w zakresie detekcji sygnałów. Podejmowanie decyzji na podstawie danych z wielu sensorów oraz analizowanie dużych wolumenów informacji (ang. *Big Data*) przez sztuczną inteligencję znacząco zwiększa skuteczność procesu detekcji.

2. Techniki detekcji sygnałów radiowych

Odbiór sygnałów radiowych polega na próbkowaniu rzeczywistego sygnału składającego się ze składowej synfazowej, określającej wartość amplitudy sygnału, oraz składowej kwadraturowej, opisującej przesunięcia fazowe sygnału. Zadana częstotliwość próbkowania pozwala z dużą dokładnością odwzorować sygnały

analogowe w postaci cyfrowych wartości. Dzięki wykorzystaniu transformaty Fouriera możliwe jest przedstawienie analizowanych danych w dziedzinie częstotliwości, która uwidacznia poszczególne składowe sygnału. Następnie w zależności od wybranego detektora analizowane są właściwości próbek.

2.1. Detektor energii

Najprostszym rozwiązaniem monitoringu widma jest detektor energii. Analizuje on moc odbieranego sygnału i stosunek mocy sygnału użytecznego do mocy zakłóceń — SNR (ang. *Signal to Noise Ratio*). Jeżeli energia odbieranego sygnału przekroczy zadaną wartość progową (ang. *threshold*), można stwierdzić występowanie sygnału na zadanej częstotliwości. Występuje wiele odmian metody opartej na energii, ale najlepsze rezultaty oferuje detektor energii z estymacją poziomu szumu — ED-ENP (ang. *Energy Detector with Estimated Noise Power*) [1]. W proponowanym rozwiązaniu moc szumu jest nieznaną i konieczne jest jej oszacowanie przez obliczenie wariancji odbieranego sygnału lub wybór próbek składających się wyłącznie z zakłóceń.

Podstawowym założeniem jest postać odbieranego sygnału [2]:

$$y(n) = s(n) + w(n), \quad (1)$$

gdzie $s(n)$ to próbki sygnału, $w(n)$ to addytywny biały szum gaussowski, a n określa numer indeksu próbki. Statystyka testowa dla najprostszego detektora energii może być zapisana jako:

$$M = \sum_{n=0}^N |y(n)|^2, \quad (2)$$

gdzie N to liczba próbek. Decyzja o zajętość kanału jest podejmowana przez porównanie statystyki testowej M z ustaloną wartością progową λ . Jest to równoznaczne z wyborem pomiędzy dwiema hipotezami:

$$H_0 : y(n) = w(n), \quad (3)$$

$$H_1 : y(n) = s(n) + w(n). \quad (4)$$

Hipoteza H_0 zakłada brak sygnału użytecznego w odbieranych próbkach, a według hipotezy H_1 sygnał składa się z próbek sygnału i szumu. Parametrami określającymi skuteczność algorytmu są dwie wartości — prawdopodobieństwo detekcji P_d oraz prawdopodobieństwo fałszywego alarmu P_{fa} :

$$P_d = Pr(M > \lambda) | H_1, \quad (5)$$

$$P_{fa} = Pr(M > \lambda) | H_0. \quad (6)$$

Prawdopodobieństwo detekcji zakłada przyjęcie jako prawdziwej hipotezy H_1 , gdy jest ona prawdziwa, a prawdopodobieństwo fałszywego alarmu to sytuacja, w której za prawdziwą uznaje się hipotezę H_0 , gdy w rzeczywistości jest ona fałszywa.

Proponowane rozwiązanie ma kilka istotnych zalet: nie jest wymagana znajomość *a priori* odbieranego sygnału, jego struktury i cech charakterystycznych, technika jest prosta w implementacji oraz nie potrzeba dużych mocy obliczeniowych do wykonania niezbędnych obliczeń. Wadą jest jednak niska skuteczność w przypadku występowania dużych zakłóceń oraz konieczność założenia, że odbierany szum jest addytywnym białym szumem gaussowskim.

2.2. Detektor wartości własnych

Inne rozwiązanie zakłada korzystanie z macierzy kowariancji odbieranego sygnału oraz wyliczenie wartości własnych (ang. *eigenvalues*) [3]. Wektor próbek odbieranego sygnału opisany równaniem (1) może być przedstawiony w formie macierzy:

$$y(n) = [y_1(n) \dots y_N(n)]^T, \quad (7)$$

$$s(n) = [s_1(n) \dots s_N(n)]^T, \quad (8)$$

$$w(n) = [w_1(n) \dots w_N(n)]^T, \quad (9)$$

a poszczególne próbki jako:

$$y_i(n) = y((nN + i - 1)T_s), \quad (10)$$

$$w_i(n) = w((nN + i - 1)T_s), \quad (11)$$

$$s_i(n) = s((nN + i - 1)T_s), \quad (12)$$

gdzie T_s określa okres próbkowania, a i jest numerem próbki.

Pozwala to określić macierz kowariancji odbieranego sygnału jako:

$$R_y(n) = E[y(n)y(n)^H] = \begin{cases} \sigma_c^2 I_N, & H_0 \\ R_s(n) + \sigma_c^2 I_N, & H_1 \end{cases}, \quad (13)$$

gdzie $R_s(n)$ określa macierz kowariancji próbek szumowych, I_N to macierz jednostkowa o rozmiarze N , a σ_c^2 wskazuje moc zakłóceń. Jeśli pomiędzy próbkami sygnału występuje korelacja, to $R_s(n)$ będzie różne od jedności.

W tej sytuacji możliwe jest obliczenie maksymalnej i minimalnej wartości własnej macierzy kowariancji jako:

$$(\lambda_{\max}, \lambda_{\min}) = \begin{cases} (\sigma_n^2 \sigma_n^2), & H_0 \\ (\rho_{\max}(n) + \sigma_n^2), (\rho_{\min}(n) + \sigma_n^2) & H_1 \end{cases}, \quad (14)$$

Jeśli sygnał użyteczny nie występuje, stosunek maksymalnej i minimalnej wartości własnej powinien wynosić 1. W przypadku pojawienia się próbek sygnału wartość statystyki testowej będzie większa od 1.

W praktyce konieczna jest estymacja wartości macierzy kowariancji według:

$$R_y(n) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s-1} y(n-i)y(n-i)^H. \quad (15)$$

2.3. Detektor właściwości cyklostacjonarnych

Detektory sygnałów radiowych mogą opierać się również na wykrywaniu charakterystycznych cech odbieranych próbek [2]. Jednym z takich rozwiązań jest detektor cyklostacjonarny, wykorzystywany ze względu na okresowy charakter sygnałów lub ich właściwości — wartości średniej oraz autokorelacji. Rozwiązanie to nie korzysta z wykresów gęstości mocy, ale opiera się na cyklicznej funkcji korelacji. Główna zaleta proponowanego rozwiązania to możliwość odróżnienia pośród szumu transmisji sygnałów użytkownika pierwotnego ze względu na charakter zakłóceń — są one w szerokim sensie stacjonarne, w przeciwieństwie do zmodulowanych sygnałów, które są cyklostacjonarne.

Funkcja cyklicznej gęstości spektralnej może być określona jako:

$$S(f, \alpha) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_y^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f\tau}, \quad (16)$$

gdzie R_y^α to cykliczna funkcja autokorelacji, a α to częstotliwość powtarzania. Równanie (16) uzyskuje największe wartości, gdy częstotliwość powtarzania jest równa podstawowym składowym odbieranego sygnału.

2.4. Detektor wzorców sygnałowych

Innym popularnym rozwiązaniem, które znalazło duże uznanie w świecie sensingu widma, jest identyfikacja sygnałów na podstawie znanych wzorców sygnałowych. Jest wykorzystywana w identyfikowaniu transmisji użytkowników pierwotnych w technologiach transmisyjnych. Wymagana jest jednak znajomość wielu cech charakterystycznych oraz implementacja algorytmów klasyfikacji. Podstawowe parametry brane pod uwagę to energia sygnału, rozproszenie w paśmie,

szerokość pasma, częstotliwość sygnału, czas jego trwania. Po zebraniu powyższych danych możliwa jest implementacja sieci neuronowej przeznaczonej do klasyfikacji wzorców radiowych.

3. Modele fuzji danych z wielu sensorów rozpoznawczych

Wzrost liczby urządzeń wykorzystujących fale elektromagnetyczne, a także implementacje nowych technologii powodują, że nawet najlepszy detektor bazujący na danych z pojedynczego sensora może być niewystarczający. Konieczne staje się zbieranie danych z wielu źródeł i prowadzenie kooperacyjnego sensingu widma [4]. Pozwala to na akwizycję próbek sygnałów z odbiorników radiowych rozmieszczonych w przestrzeni. Wyróżnia się dwie podstawowe strategie kooperacyjnego sensingu widma:

- strategia twardej decyzji (ang. *hard decision*),
- strategia miękkiej decyzji (ang. *soft decision*).

W przypadku twardych decyzji system zbiera ze wszystkich węzłów informację binarną: '0' oznacza brak sygnału, a '1' sygnalizuje występowanie użytkownika pierwotnego. Decyzja podejmowana w centrum fuzji danych może opierać się na kilku regułach, wybieranych w zależności od oczekiwanych rezultatów. W rozwiązaniach bazujących na miękkich decyzjach każdy sensor przesyła do centrum informację na temat analizowanego pasma częstotliwości w postaci próbek odebranego sygnału, które są analizowane w węzle głównym i porównywane ze stałą wartością $P_{d_{sys}}$. Jeżeli otrzymana wartość przekracza wartość progową, stwierdza się detekcję sygnału. Rozwiązaniem zyskującym popularność jest podejmowanie decyzji na podstawie teorii Dempstera–Shafera, która odchodzi od klasycznych założeń teorii bayesowskiej.

3.1. Metody twardych decyzji

Najpopularniejsze reguły stosowane w rozwiązaniach *hard decision* to metoda *OR*, metoda *AND* oraz metoda *K z N*. Są to systemy, które z poszczególnych sensorów otrzymują binarne dane na temat zajętości badanego zakresu częstotliwości, a następnie podejmują finalną decyzję. Metoda *OR* określa kanał jako zajęty, jeżeli z minimum jednego węzła zostanie dostarczona informacja o występowaniu sygnału. Metoda *AND* wymaga, aby we wszystkich sensorach stwierdzono występowanie relacji radiowych, by móc podjąć ostateczną decyzję o zajętości kanału. Metoda *K z N* definiuje liczbę kanałów, które muszą być zajęte — K spośród całkowitej liczby kanałów — N . Metoda *AND* minimalizuje prawdopodobieństwo fałszywego alarmu kosztem prawdopodobieństwa detekcji, metoda *OR* maksymalizuje prawdopodobieństwo detekcji kosztem prawdopodobieństwa fałszywego alarmu, a metoda większościowa stanowi kompromis pomiędzy pozostałymi rozwiązaniami.

3.2. Metoda miękkiej decyzji

Strategia kooperacyjnego monitoringu widma bazująca na miękkich decyzjach wymaga zdecydowanie większych mocy obliczeniowych ze względu na bardziej złożone algorytmy użyte do oceny zajętości kanału radiowego. Dodatkowo znacznie bardziej obciążają one kanały komunikacyjne pomiędzy poszczególnymi węzłami, a także centrum fuzji danych ze względu na większą ilość przesyłanych danych w porównaniu do binarnych informacji w rozwiązaniu miękko decyzyjnym [5]. Węzeł główny implementuje również algorytm integracji uzyskanych wyników w celu otrzymania kooperacyjnego prawdopodobieństwa detekcji. Jest ono zestawiane zadaną wartością systemową $P_{d,sys}$, na bazie której podejmowana jest ostateczna decyzja. W literaturze opisano wiele rodzajów technik miękkich decyzji: prawo wyboru kwadratów, zestawienie maksymalnych wartości lub zestawienie wybiórcze.

3.3. Teoria Dempstera–Shafera

Reguła Dempstera–Shafera, inaczej określana jako matematyczna teoria ewidencji, została opracowana przez dwóch matematyków w latach 1968-1976. Konieczność stworzenia nowego rozwiązania wynikała z braku wiedzy i możliwości opisu pewnych stanów rzeczy. Prawdopodobieństwo trafienia reszki i orła podczas rzutu monetą jest łatwe do policzenia, ponieważ znamy wszystkie stany, w jakich moneta może się znaleźć. W przypadku bardziej złożonych zjawisk często mamy do czynienia z sytuacją, w której nie jesteśmy w stanie zdefiniować wszystkich możliwych stanów bądź nie wiemy, jakie są szanse na ich wystąpienie. Naprzeciw wychodzi teoria DST (ang. *Dempster–Shafer Theory*), która rozszerza zakres opisu zdarzeń (hipotez) w rozważanej przestrzeni. Zamiast przypisywać do każdego wydarzenia jedną wartość prawdopodobieństwa, teoria ta przyporządkowuje każdemu elementowi dwie wartości: $Bel(A)$ oraz $Pl(A)$ — odpowiednio wartość funkcji przekonania (ang. *belief function*) i wartość funkcji wiarygodności (ang. *plausibility function*), które określają dolną i górną granicę przekonania w prawdziwość wystąpienia zjawiska A . W uproszczeniu $Bel(A)$ definiuje wiarę w prawdziwość zjawiska A , a $Pl(A)$ określa, jak silne są dowody przemawiające na niekorzyść wystąpienia zjawiska A .

W kontekście sensingu widma w literaturze [2] przedstawione są dowody na wielokrotnie większą skuteczność metody DST w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami opartymi na technice twardej decyzji.

4. Podsumowanie

Wzrost nasycenia pola walki nowoczesnymi środkami elektronicznymi skutkuje koniecznością implementacji i rozwoju metod wykrywania i lokalizacji emiterów energii elektromagnetycznej. Najlepszym sposobem na uzyskanie rzetelnych wyników jest implementacja algorytmów detekcji sygnałów radiowych w przeznaczonych do tego odbiornikach radiowych. Rozwiązania radia kognitywnego oraz radia definiowanego programowo SDR (ang. *Software Defined Radio*) pozwalają na opracowanie skutecznych sensorów relatywnie niskim kosztem [6]. Oprogramowania typu *OpenSource* umożliwiają dowolną modyfikację kodów źródłowych i przejście w pełni kontroli nad działaniem odbiornika. Środowisko programistyczne *GNU Radio Companion* oferuje wiele możliwości z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz analizy spektralnej. Oznacza to znaczące ułatwienie pracy inżynierów oraz skrócenie czasu dystrybucji finalnej wersji oprogramowania przeznaczonego do monitoringu widma elektromagnetycznego.

Mnogość środków wykorzystujących energię elektromagnetyczną zmusza do użycia większej liczby sensorów, aby w pełni zrozumieć środowisko elektromagnetyczne i czerpać korzyści z uzyskanej przewagi nad przeciwnikiem. Niezbędne stają się techniki fuzji danych, które pozwalają na agregację informacji z wielu sensorów rozmieszczonych w czasie i przestrzeni. Liczne dostępne rozwiązania z zakresu *Data Fusion* umożliwiają dostosowanie wybranej metody do własnych możliwości sprzętowych i zamiaru operacyjnego.

Obecnie widoczny jest wzrost zainteresowania systemami bezzałogowymi, za czym przemawia chęć minimalizacji strat ludzkich, zwiększenie zasięgu działania technologii oraz wykorzystanie przewagi, jaką daje monitoring z poziomu przestrzeni powietrznej [7]. Trwająca inwazja Federacji Rosyjskiej na Ukrainę pokazuje, jak skuteczne mogą być bezzałogowe statki powietrzne oraz jak zabójczą broń mogą stanowić. Umieszczenie sensora rozpoznania radioelektronicznego na BSP (bezzałogowy statek powietrzny) pozwoli na uzyskanie szerszego obrazu spektrum elektromagnetycznego. Integracja poszczególnych węzłów ze statkami powietrznymi oraz konfiguracja pracy w systemie grupy bądź roju dronów może doprowadzić do zapanowania nad przeciwnikiem.

Artykuł opracowany na podstawie materiałów przygotowanych w ramach przedmiotu analiza obszaru badawczego, realizowanego w I semestrze Szkoły Doktorskiej Wojskowej Akademii Technicznej w okresie 1.10.2022 – 12.02.2023 r.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.05.2023. Zatwierdzono do publikacji 30.06.2023.

Maciej Mazuro <https://orcid.org/0000-0002-3247-4206>

LITERATURA

- [1] SKOKOWSKI P., *Budowanie świadomości sytuacji elektromagnetycznej w sieciach doraźnych z węzłami kognitywnymi*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2021.
- [2] YUCEK T., ARSLAN H., *A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11, 1, 2009, 116-130.
- [3] ALVAREZ P., PRATAS N., RODRIGUES A., RASHMI PRASAD N., PRASAD R., *Energy Detection and Eigenvalue Based Detection: An Experimental Study Using GNU Radio*, The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2011, 1-5.
- [4] SKOKOWSKI P., MALON K., ŁOPATKA J., *Building the Electromagnetic Situation Awareness in MANET Cognitive Radio Networks for Urban Areas*, Sensors, 22, 3, 2022, 716, <https://doi.org/10.3390/s22030716>.
- [5] NALLAGONDA S., KUMAR RAKESH Y., SHILPA P., *Analysis of Hard-decision and Soft-data Fusion Schemes for Cooperative Spectrum Sensing in Rayleigh Fading Channel*, IEEE 7th International Advance Computing Conference, 2017.
- [6] MAZURO M., SKOKOWSKI P., *Sensor monitoringu widma z wykorzystaniem radia programowalnego*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, vol. 95, nr 4, 2022.
- [7] MAZURO M., *Ocena efektywności wykrywania emisji radiowych z wykorzystaniem UAV*, praca dyplomowa, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2022.

MAZURO M.

Cooperative spectrum sensing based on data fusion from multiple sensors

Abstract. The development of technology is progressing in every area of our lives. Each of us has an electronic device that emits electromagnetic energy. Radiation of radio signals is an essential element of wireless communication, satellite navigation or real-time monitoring. Modern armies have technological solutions based on wireless technologies that improve operational efficiency, increase situational awareness and allow us for faster decision making, but at the same time, in the electromagnetic spectrum, equipment using electromagnetic energy can be compared to a flashlight — the enemy can observe “glowing” points on the spectrograms and frequency domain images. This enables us to easily detect and localise the target and then to eliminate it. This is a domain where radio-electronic reconnaissance techniques work well — a type of military reconnaissance that uses the electromagnetic spectrum to gather information about the enemy. One of the methods is spectrum sensing, based on the analysis of received radio signals. Currently, there is a tendency in which information from one sensor is not enough. It is necessary to collect reconnaissance products from many devices, and then to make effective data fusion. DF (Data Fusion) algorithms allow us for cooperative sensing of the electromagnetic spectrum, which translates into a higher probability of signal detection. It is worth considering the introduction of software-defined radio and unmanned aerial vehicle solutions in order to miniaturise reconnaissance systems and to increase a range through the use of flying platforms. Implementations of unmanned systems and artificial intelligence algorithms, capable of making quick and accurate decisions will help to avoid human losses.

Keywords: signal intelligence, unmanned aerial vehicle, software defined radio, data fusion, artificial intelligence

DOI: 10.5604/01.3001.0054.2898

