

Ruchoma stacja namierzenia

Techniki radionamierzenia w ruchu

Wejście polski do Unii Europejskiej stawia nowe wyzwania instytucji odpowiedzialnej za krajową gospodarkę częstotliwościową oraz kontrolę i regulację widma częstotliwości, jaką jest Urząd Komunikacji Elektronicznej (UKE). Niniejszy artykuł opisuje, opracowaną przez firmę KenBIT, technikę lokalizowania źródeł sygnałów radiowych na jego potrzeby, przy wykorzystaniu pojedynczej Ruchomej Stacji Pomiarowej (RSP) pracującej w ruchu.

Jej zadaniem jest przemieszczenie się w kierunku namierzanego celu, którego lokalizacja obliczana jest „na bieżąco”. Obliczenia realizowane są z wykorzystaniem modelu matematycznego zapewniającego w pełni zautomatyzowany przebieg lokalizacji sygnałów. Możliwe jest również wykorzystanie tej techniki w systemach rozpoznania i radionamierzenia klasy SIGINT w Siłach Zbrojnych RP.

Do wykonywania zadań w zakresie kontroli i regulacji widma częstotliwości, wykorzystywane są RSP, które od niedawna są eksploatowane w UKE. Stacje te pełnią funkcję mobilnego laboratorium pomiarowego realizującego monitorowanie widma elektromagnetycznego, namierzenie stacji radiowej i określanie jej lokalizacji jak również wykonywanie specjalistycznych pomiarów emisji radiowych.

Do zadań RSP należy:

- kontrola parametrów emisji radiowych;
- monitorowanie i kontrola zajętości widma;
- namierzenie i lokalizacja źródeł emisji;
- rejestracja zdemodulowanych sygnałów;
- raportowanie wyników.

Jedną z podstawowych funkcji RSP jest namierzenie i lokalizacja niepożądanych źródeł emisji radiowych (pracujących bez pozwolenia na świadczenie tego typu usług). Umożliwia to specjalistyczne, autorskie oprogramowanie RSP firmy KenBIT.

Lokalizacja źródeł sygnałów na podstawie bardzo dużej liczby namiarów jest procesem trudnym i pracochłonnym ze względu na konieczność ręcznej eliminacji namiarów. Często, w wyniku rejestracji namiarów na sygnały odbite, operator musi podejmować samodzielną decyzję, które z nich są „właściwe”, nie posiadając jasnego kryterium oceny. Szczególnie trudnym zagadnieniem jest lokalizacja źródeł sygnałów umiejscowionych w terenie zurbanizowanym. Wówczas bowiem bardzo duży odsetek wykonanych namiarów pochodzi od sygnałów odbitych, a na dodatek niezmiernie trudny jest właściwy wybór punktu pomiarowego. W celu pełnej automatyzacji procesu lokalizacji źródeł, RSP wyposażono w oprogramowanie specjalistyczne (opracowane przez KenBIT), które oprócz systemu pomiarowego wykorzystuje aplikacje GIS z kompletem map cyfrowych Polski. Aplikacja, na podstawie danych z odbiornika GPS, zobrazowuje aktualne położenie stacji na tle mapy oraz na podstawie



Widok Ruchomej Stacji Pomiarowej.

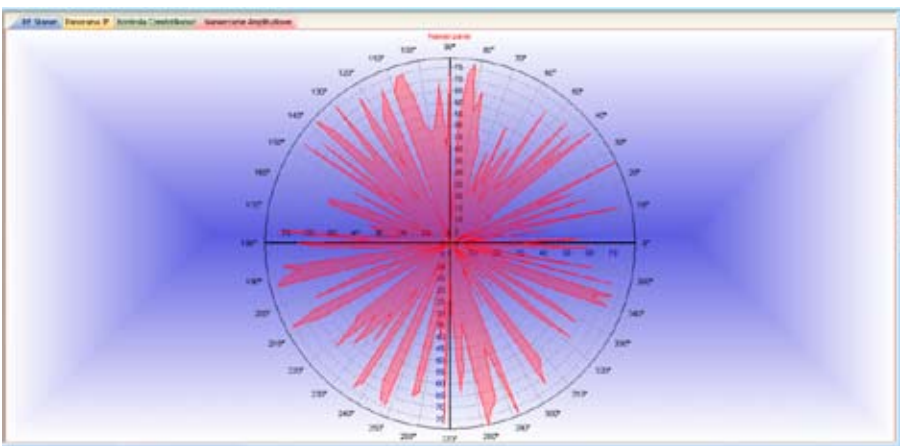
danych z busoli elektronicznej zapewnia orientację położenia samochodu.

Ruchoma Stacja Pomiarowa nie tylko umożliwia nieskomplikowane namierzenie sygnałów permanentnych, ale także namierzenie sygnałów pojawiających się okresowo, sygnałów zmieniających częstotliwość, czy wreszcie sygnałów jednego systemu (np. monitoringowego) pojawiających się na tej samej częstotliwości, ale z różnych lokalizacji.

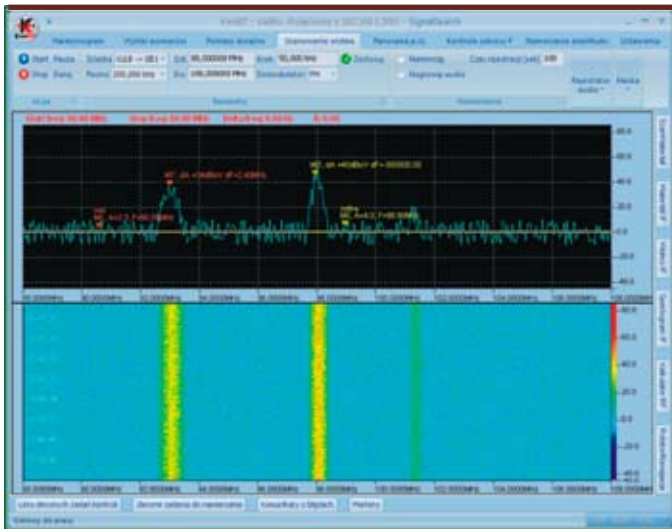
Do tego celu służą takie narzędzia jak: deklarowany czas integracji namierzenia, deklarowany czas całkowity namierzenia, poziom zaliczenia, jakość namiaru czy bardzo przydatna tzw. maska adaptacyjna, tworzona z obwiedni obserwowanego rzeczywistego fragmentu widma częstotliwości. Jej użycie powoduje, że każdy prążek, który przekroczy wykres maski, jest automatycznie namierzany, a jego namiar zapisywany do bazy danych. Tak zrealizowany proces namierzenia zapewnia pełną automatyzację, aczkolwiek należy zaznaczyć, że efektywność i skuteczność namierzenia przy użyciu jednej stacji w głównej mierze opiera się na doświadczeniu operatora.

Istnieje również możliwość namierzenia synchronicznego przez dwie lub trzy stacje, co zapewnia pełny proces automatyzacji lokalizacji źródła emisji radiowej. Oprócz możliwości namierzenia źródeł emisji radiowych, aplikacja pomiarowa pozwala na wyliczenie potencjalnej lokalizacji z wybranych do tego celu, zapisanych wcześniej namiarów.

W trakcie eksploatacji nadzorowanej RSP opracowanych dla potrzeb UKE okazało się, że metoda



Okno zobrazowania trybu namierzenia z wykorzystaniem obracanej anteny mikrofalowej.



Widok okna widma częstotliwości.

kolejnych namiarów sygnału z kilku wybranych punktów pomiarowych jest zawodna, zwłaszcza wówczas, gdy sygnał namierzany jest słaby. Najazd na sygnał przypominał kluczenie, które trwało stosunkowo długo, a fakt zastosowania namierników na RSP nie czynił procesu lokalizowania źródeł sygnałów efektywniejszym. W wyniku doświadczeń w zakresie eksploatacji stacji, KenBIT zaproponował dwa rozwiązania problemów związanych z lokalizacją sygnałów w terenie zurbanizowanym. Pierwsze z nich dotyczy wprowadzenia półautomatycznej eliminacji namiarów w miejsce eliminacji ręcznej. Drugie natomiast stanowi kompleksowe rozwiązanie algorytmu lokalizacji źródeł sygnałów za pomocą jednej RSP w ruchu. Oba rozwiązania zostały zaimplementowane w oprogramowaniu stacji. Poprawność ich funkcjonowania została sprawdzona eksperymentalnie oraz potwierdzona w rzeczywistych zadaniach lokalizowania źródeł sygnałów

niepożądanych, niezależnie w trzech delegaturach UKE (Warszawa, Wrocław, Poznań).

Eliminacja namiarów wykonanych z jednej lokalizacji RSP

W wyniku wykonania wielokrotnego namiaru na sygnał radiowy z tej samej lokalizacji RSP w gęsto zabudowanym terenie uzyskuje się zazwyczaj obraz niejednoznaczny, z którego wzrokowej oceny przeważnie trudno jest ocenić przybliżony azymut na sygnał użyteczny.

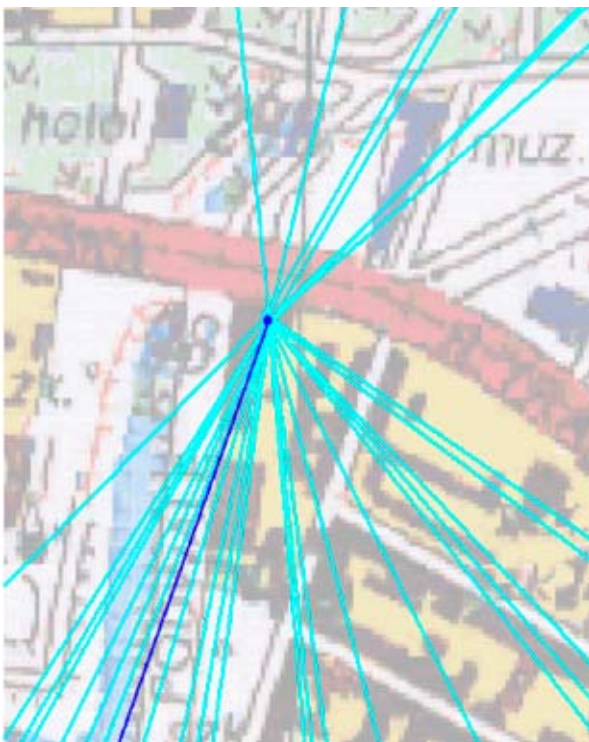
Uzyskane wyniki charakteryzują się widocznym rozrzutem i brakiem jednoznacznego azymutu skupienia większości wyników. Dla żadnego azymutu nie można jednoznacznie stwierdzić, że przeważa liczba namiarów lub ich średnia jakość. Niemniej jednak, w wyniku analiz tej i podobnych sytuacji zauważono, że przy odpowiednio licznej próbie

wyniki namiarów wykonanych z jednej lokalizacji można matematycznie przetworzyć w taki sposób, aby uzyskać średni azymut trafienia na źródło sygnału.

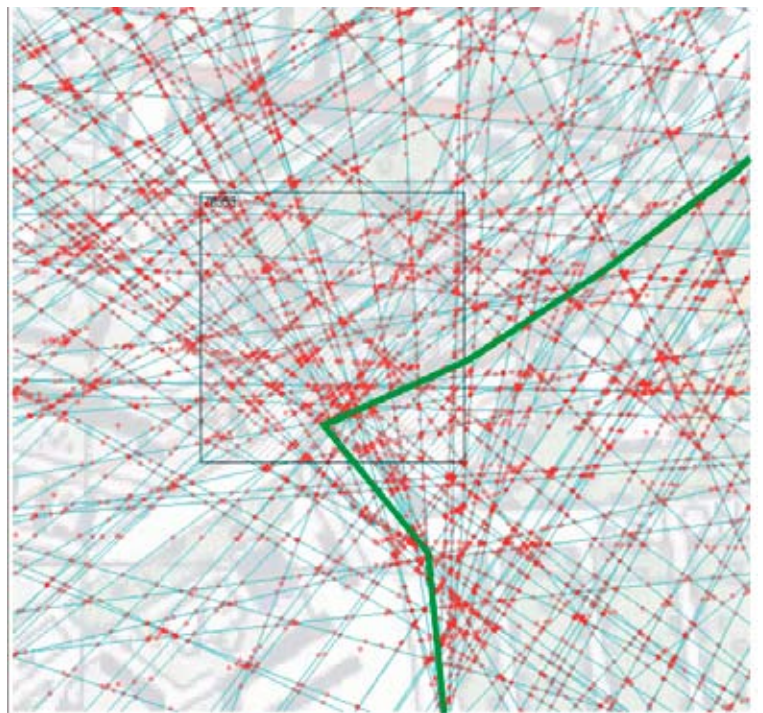
Proces namierzania sygnałów wsparty tą metodą stał się przede wszystkim mniej wrażliwy na warunki środowiskowe prowadzenia namierzania. Głównym przeznaczeniem RSP jest bowiem realizacja funkcji rozpoznania radioelektronicznego w aglomeracjach miejskich, gdzie z przyczyn obiektywnych namierzanie sygnałów jest problematyczne z powodu odbić od elementów infrastruktury miejskiej. Nowa metoda umożliwia szerokie wykorzystanie namierzania w warunkach miejskich, niemniej jednak nadal proces lokalizacji źródeł sygnałów wymagał wyboru kilku dobrze eksponowanych punktów pomiarowych, w takim rozstawieniu względem źródła, aby uzyskać dobrą bazę namierzania i – przede wszystkim – widoczność sygnału namierzanego. W przeważającej liczbie przypadków jest to czasochłonne i niewygodne. Dlatego też dokonano próby adaptacji metod statystycznych do wnioskowania o lokalizacji źródła sygnału na bazie wszystkich dostępnych namiarów, wykonanych w trakcie przemieszczania się RSP na źródło sygnału, mając przy tym świadomość występowania licznych i zmiennych (w związku z przemieszczaniem się RSP) odbić sygnałów namierzanych, rejestrowanych jako namiary na źródła pozorne.

Lokalizacja źródła sygnału podczas przemieszczania się RSP „na sygnał”

Poszukiwanie metody poprawnego określenia lokalizacji źródła sygnału namierzanego z wielu punktów pomiarowych, a więc w czasie płynnego



Przykład namiarów na źródło sygnału z jednej lokalizacji RSP w terenie zabudowanym.



Fragment mapy z ilustracją wyników namierzania w ruchu; widoczne są punkty lokalizacji elementarnych, linie namiarów, linia trasy RSP oraz kwadrat wyznaczający potencjalną lokalizację źródła sygnału.

przemieszczania się RSP (bez konieczności zatrzymywania się na czas namiaru) zakłada, że każdy namiar, zarówno na sygnał bezpośredni jak i odbity jest powiązany ze wzajemną lokalizacją źródła tego sygnału i chwilowego położenia RSP.

Przy odpowiednio dużej liczbie namiarów powinno więc być możliwe skonstruowanie takiej zmiennej losowej, której badanie pozwoli odkryć tę zależność i wyznaczyć rzeczywiste położenie źródła sygnału namierzanego. Oczywiście jest też to, że w ten sposób skutecznie da się namierzać jedynie źródła nieprzemieszczające się.

W ostatecznej wersji algorytmu okazało się, że eliminacja lokalizacji powiązanych ze źródłami przemieszczającymi się jest analogiczna z eliminacją lokalizacji powiązanych z sygnałami odbitymi. W rozpracowaniu tego algorytmu jeszcze więcej wysiłku włożono w upraszczanie kroków obliczeniowych, gdyż konieczne obliczenia rekurencyjne są wielokrotnie bardziej rozbudowane, niż miało to miejsce w przypadku eliminacji namiarów. Parametryczna zmienna losowa konstruowana jest, bowiem jako zmienna losowa dwuwymiarowa w przestrzeni, a próbami dla niej są lokalizacje cząstkowe, a więc – w uproszczeniu – punkty przecięć wszystkich namiarów. W przypadku ogólnym nie można przy tym określać *a priori*, które przecięcia są poprawnym wynikiem elementarnym dla określenia lokalizacji rzeczywistej, a które są przypadkowe. Analizie należy więc poddać wszystkie możliwe do wyznaczenia w całej głębokości rozpoznania punkty przecięć. Uzyskanie zależności matematycznych o akceptowalnym stopniu złożoności obliczeniowej oraz zadowalającej dokładności uzyskiwanych wyników pozwala na skonstruowanie zmiennej losowej z próby będącej zbiorem lokalizacji cząstkowych.

Na tak skonstruowanej zmiennej losowej dokonuje się podobnej operacji, jak w przypadku eliminacji namiarów, z tą tylko różnicą, że w miejsce okna azymutalnego o określonej rozciągłości stosowane jest dwuwymiarowe okno przestrzenne o rozciągłości będącej parametrem definiowanym przez operatora. Rozciągłość tego okna można zdefiniować jako miarę boku kwadratu będącą dopuszczalną przez operatora tolerancją dokładności określenia lokalizacji źródła.

Wskazanie stref najbardziej prawdopodobnych dla lokalizacji źródła sygnału jest zależne od drugiego, określanego przez operatora, parametru, który najbardziej właściwie można określić jako procentowy stosunek udziału w ogólnym czasie nadawania źródła o najkrótszym czasie nadawania do źródła o najdłuższym czasie nadawania. Stwierdzono bowiem, że opracowany algorytm ma zdolność jednoczesnego lokalizowania wielu źródeł sygnałów radiowych, co pozwala na lokalizację korespondentów sieci radiowych. W przypadku poszukiwania jednego źródła sygnału wartość tego współczynnika ustala się na „0”.

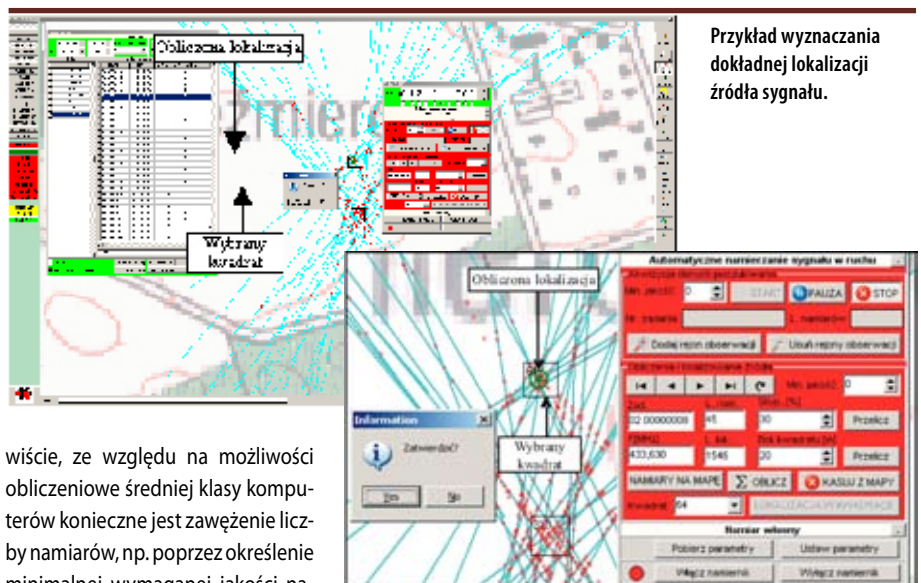
W przeważającej liczbie sytuacji obszar poszukiwania jest określony wstępnie. W przypadku

pragmatyki zastosowań RSP przeważnie jest to obszar osiedla lub dzielnicy, z których zgłaszane są zakłócenia odbioru sygnałów radiodifuzyjnych. Dlatego też metoda lokalizacji pozwala na wstępne określenie jednego i więcej obszarów zainteresowania, w których realizowane jest poszukiwanie lokalizacji źródła sygnału zakłócającego. Efektem finalnym zastosowania metody lokalizacji źródła sygnału jest wskazanie prostokątnych obszarów, które określają potencjalną lokalizację namierzanego nadajnika. W dalszej kolejności, stosując typową procedurę obliczania lokalizacji źródła operator ma możliwość wskazania wybranego obszaru do określenia dokładnej pozycji nadajnika.

Opisywana metoda lokalizacji ma charakter masowy, czyli efekty jej działania są tym bardziej precyzyjne, im większa jest liczba namiarów. Oczy-

wiście zamiarów w sąsiedztwie stacjonarnego źródła sygnału. Ze względu na tę właściwość algorytm dobrze radzi sobie z „omijaniem” przypadkowych przecięć linii namiarów w bezpośrednim sąsiedztwie toru ruchu RSP bez konieczności stosowania dodatkowych zabiegów, co potencjalnie mogło stanowić dodatkowe źródło fałszowania wyników lokalizacji.

Fakt rejestracji namiarów na sygnały odbite od elementów infrastruktury jest natomiast – paradoksalnie – pomocny w lokalizowaniu źródła sygnału, gdyż ma pozytywny wpływ na równomierność rozkładu punktów przecięć namiarów niewskazujących bezpośrednio źródła sygnału. Stwierdzono to również eksperymentalnie poprzez zawężanie liczby namiarów ustalając coraz wyższe wartości wymaganej jakości minimalnej namiarów. Okazało się,



Przykład wyznaczenia dokładnej lokalizacji źródła sygnału.

wiście, ze względu na możliwości obliczeniowe średniej klasy komputerów konieczne jest zawężenie liczby namiarów, np. poprzez określenie minimalnej wymaganej jakości namiaru, progowego poziomu sygnału odbieranego lub zawężanie obszaru poszukiwania. Stwierdzono eksperymentalnie, że dysponując liczbą ok. 50 namiarów na sygnał, wykonanych z odległości 3km i mniejszej, możliwe jest precyzyjne wjechanie stacją w punkt lokalizacji źródła sygnału.

Analiza szczegółowa wyników lokalizacji źródeł sygnałów metodą najazdu na źródło wykazała kilka wartych uwagi cech charakterystycznych tej metody. W pełni ujawniły się one w wyniku prób polegających na lokalizowaniu znanych (w sensie lokalizacji w terenie) nadajników systemów radiokomunikacyjnych przedsiębiorstw taksówkowych, ze względu na szczególne warunki realizacji tych zadań rozpoznania. Zakładano bowiem, że fakt istnienia wielu ruchomych korespondentów, od których sygnały były w trakcie eksperymentów widzialne i dobrze rozpoznawalne dla RSP, zakłóci wynik lokalizacji stacji bazowej i konieczne będzie wypracowanie rozwiązania tego problemu. Tymczasem eksperymenty wykazały, że istnienie wielu korespondentów ruchomych nie ma wpływu na wynik lokalizacji. Z analizy *a posteriori* wynika, że opracowana metoda reaguje na zaburzenia w równomierności rozkładu lokalizacji cząstkowych. Zaburzeniem takim jest skupianie się punktów prze-

że zbyt drastyczne ograniczenie liczby namiarów ma negatywny wpływ na dokładność lokalizacji.

Reasumując, dla zapewnienia odpowiedniej wydajności obliczeniowej lepiej jest określać rejon zainteresowania, ograniczając tym samym liczbę namiarów pobieranych do obliczeń, ale uwzględniając jednocześnie w tych obliczeniach namiary z całego zakresu miar jakości. Jest to kolejna nieoczekiwana cecha opracowanej metody, gdyż intuicyjnie można stwierdzić, że wyreparowanie namiarów o najlepszej jakości powinno dać lepszy wynik.

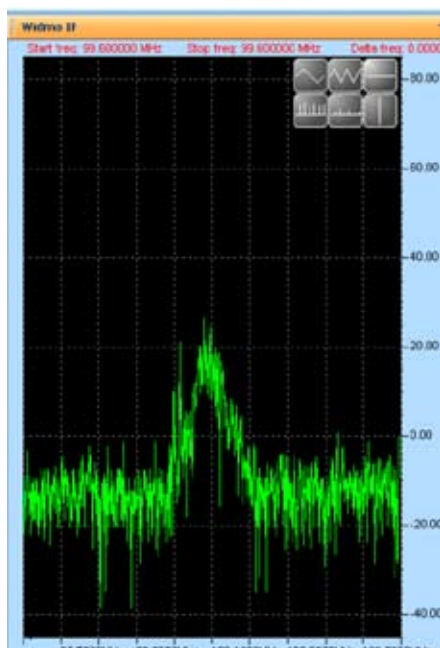
Błędy pomiarowe i ich wpływ na lokalizację źródła sygnału

Proces lokalizacji źródeł sygnałów za pomocą RSP pracującej w ruchu polega na wykorzystaniu kilku przyrządów pomiarowych. Dokładności ich wskazań mają bezpośredni wpływ na cząstkowe składowe w postaci namiarów będących danymi wejściowymi do obliczeń. Do przyrządów tych zalicza się przede wszystkim namiar, odbiornik GPS oraz busola elektroniczna. Mają one swoje skończone dokładności pomiaru, a ponadto należy brać pod uwagę wpływ czynników pośrednich. Zalicza się do nich niestabilność wskazań busoli elektro-

nicznej wynikającą z ruchu RSP, dyskretny charakter pobierania danych lokalizacyjnych z odbiornika GPS, co w korelacji z prędkością ruchu pojazdu ma wpływ na dokładność określenia lokalizacji w momencie namiaru, a także bryła pojazdu RSP, która w funkcji azymutu namiaru wnosi odchyłki będące błędem systematycznym.

W celu jak najlepszego odczucia opisywanej metody lokalizacji wymienione czynniki opracowano programowy moduł geolokacyjny, którego podstawowym zadaniem jest zapewnienie dodatkowego źródła danych o azymucie ruchu pojazdu z odbiornika GPS i skorelowanie wyników jego działania ze wskazaniami busoli. Algorytm ten działa na zasadzie wyznaczania krótkoterminowej średniej wartości azymutu i porównywaniu wskazań z GPS i busoli oraz dodatkowym porównywaniu wartości chwilowych wskazań tych przyrządów z uśrednionymi. Wyniki obliczeń przekazywane są do modułu decyzyjnego wskazującego, który z przyrządów aktualnie daje poprawną wartość azymutu, a w przypadku zaistnienia zbyt dużych odchyłek parametrów blokuje akwizycję namiarów. Krótkoterminowo uśredniane są również wskazania lokalizacji RSP

Ponadto zastosowany został algorytm filtracji kalmanowskiej przebiegu położenia RSP w czasie oraz dodatkowo – predykcja położenia na podstawie poprzednich wartości. Algorytm geolokacyjny, ze względu na swój charakter, działa z pewnym minimalnym błędem, jednak okazuje się on nieistotny. Poprzez wprowadzanie w eksperymentalnych wersjach oprogramowania pewnych dodatkowych losowych wartości błędów do wskazań przyrządów, w tym także namiarnika, stwierdzono, że błędy te w finalnych obliczeniach się niwelują. Wynika to z metody lokalizacji – jej główną cechą decydującą o niewrażliwości na tego rodzaju błędy pomiarów jest przede wszystkim fakt, że w trakcie ruchu azymut osi pojazdu względem rzeczywistej lokalizacji źródła sygnału podlega przypadkowym zmianom, wynikającym z drogi przemieszczania się. Eliminuje to wpływ bryły pojazdu na namiary, czyli potencjalne błędy systematyczne. Sam fakt uśredniającego



Okno zobrazowania pomiaru.

charakteru obliczeń lokalizacji natomiast powoduje kompensację błędów przypadkowych.

Reasumując, potencjalnie lepsze wyniki namierzania uzyskuje się w trakcie przemieszczania się po drogach osiedlowych lub w architekturze staromiejskiej, niż w czasie przemieszczania się po głównych arteriach komunikacyjnych, gdyż zachodzi wówczas lepsza kompensacja błędów pomiarów.

Podsumowanie

Ruchoma stacja pomiarowa i jej metody lokalizacji źródeł sygnałów, będące tematem niniejszego artykułu, wprowadzają nową jakość w dziedzinie kontroli widma częstotliwości. Jest to tym istotniejsze, że Polska, będąc w strukturach Unii Europejskiej, powinna wykazać się skutecznością, efektywnością i profesjonalizmem w kontroli tego widma.

Stacje te dzięki integracji sprzętowej i programowej zapewniają zwiększenie szybkości i efektywności wykonywanych pomiarów sygnałów radiowych, jak również umożliwiają lokalizację stacji

radiowych działających nielegalnie, zapewniając przy tym nową jakość w działalności statutowej Urzędu Komunikacji Elektronicznej.

Opisywane metody lokalizacji źródeł sygnałów w czasie ruchu stacji pomiarowej stosunkowo niedawno wyszły z fazy eksperymentalnej. Niemniej jednak w trakcie prac weryfikujących poprawność zastosowanych rozwiązań dostrzeżono inne możliwości zastosowań, zwłaszcza w odniesieniu do opracowanej metody lokalizacji źródeł sygnałów. Kontynuowane są obecnie prace rozszerzające zastosowanie tej metody do współpracy z namiernikami szerokopasmowymi w kontekście zapewnienia możliwości jednoczesnej lokalizacji wielu źródeł sygnałów należących nie tylko do jednej, ale w ogólnym przypadku – do wielu różnych sieci radiowych. Na podstawie licznych wyników z przeprowadzonych eksperymentów z lokalizacją rzeczywistych źródeł sygnałów wypracowano również metodę całkowitej automatyzacji procesu lokalizacji, eliminującą wpływ operatora na wymienione wcześniej parametry wejściowe systemu.

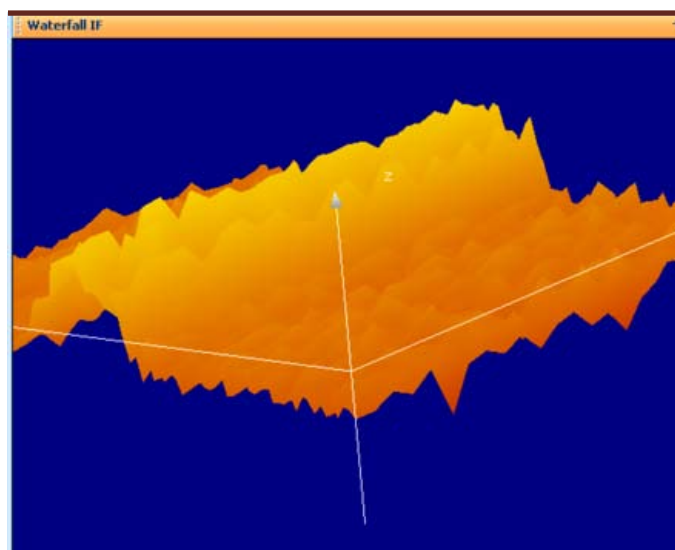
W efekcie dokonanych analiz i rozwoju metody oczywistym miejscem jej zastosowania wydają się statki powietrzne rozpoznania radioelektronicznego, w tym przede wszystkim bezpilotowe środki rozpoznania. Dodatkową zaletą zastosowania tej metody lokalizacji na statkach powietrznych jest to, że nie wymaga ona żadnego specjalnego planowania tras przelotu, natomiast można zaprogramować *a priori* rejony zainteresowania, w obrębie których rozpoznanie ma być prowadzone, przy czym stacje naziemne otrzymują dane o efekcie finalnym w postaci lokalizacji źródeł i ich parametrów technicznych, z automatyczną klasyfikacją do sieci radiowych i zasadniczo nie istnieje potrzeba jakiegokolwiek dodatkowego przetwarzania i wcześniejszej transmisji wyników cząstkowych. Autonomiczny i mało wymagający charakter metody powoduje ponadto, że może być ona realizowana „w tle” przy okazji realizacji całkowicie odrębnych zadań i misji. W dodatku, o ile nie zachodzi konieczność namierzania synchronicznego źródła znajdujących się w ruchu, wystarczające do osiągnięcia pełnego efektu rozpoznawczego jest zastosowanie jednego statku powietrznego. Sam charakter metody natomiast sprawia, że statek taki może lecieć dowolnie nisko, co nie wpływa na jakość wyników lokalizacji, a ułatwia maskowanie działań.

Możliwe jest również wykorzystanie tej techniki w mobilnych systemach rozpoznania radioelektronicznego SZ RP klasy SIGINT oraz do innych zastosowań specjalnych.

Aktualnie firma KenBIT opracowuje oprogramowanie dla stacjonarnego Krajowego Systemu Automatycznego Monitoringu Widma Radiowego, obejmującego zakresem działania obszar całej Polski, gdzie RSP będą jednym z elementów mobilnych wykorzystywanych do zadań pomiarowych. ■

Artykuł przygotowany przez KenBIT s.j.

Ilustracje w artykule: KenBIT s.j.



Okno zobrazowania pomiaru (3D).