



RF Sensory N6841A w systemie lokalizacji aktywnych źródeł emisji radiowych

JACEK FORNALIK, GRZEGORZ CZOPIK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2
jacek.fornalik@wat.edu.pl, grzegorz.czopik@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono skrócony opis techniczny urządzenia N6841A (RF Sensor) dostępnego w komercyjnej ofercie firmy Agilent Technologies. Przytoczono opis parametryczny urządzenia, wybrano warianty jego wykorzystania przy pracy w trybie autonomicznym i sieciowym. Ponadto opisano sposób realizacji i przytoczono wyniki testów przeprowadzonych na RF Sensorach, których celem była weryfikacja katalogowych danych technicznych urządzenia. Zaprezentowane wyniki badań RF Sensorów zostały wykonane na terenie Wojskowej Akademii Technicznej.

Słowa kluczowe: systemy radioelektroniczne, lokalizacja, TDoA

1. Wstęp

Wykorzystanie systemów namiarowych w procesie lokalizacji emiterów ma miejsce zarówno w odniesieniu do zastosowań cywilnych jak i wojskowych. Osiągane przez te systemy dokładności w wielu przypadkach są wystarczające. W większości znanych rozwiązań wykorzystuje się stosunkowo skomplikowane i drogie systemy antenowe. Charakterystyki kierunkowe anten pozwalają na dokładniejsze określanie radionamiaru, ale powodują zmniejszenie prawdopodobieństwa wykrycia w przypadku konieczności poszukiwania źródeł krótkotrwałych emisji. Szczególną sytuacją pomiarową dla systemów namierzania i lokalizacji jest środowisko zurbanizowane, z uwagi na powszechnie występujący w rzeczywistych sytuacjach operacyjnych efekt wielodrogowości.

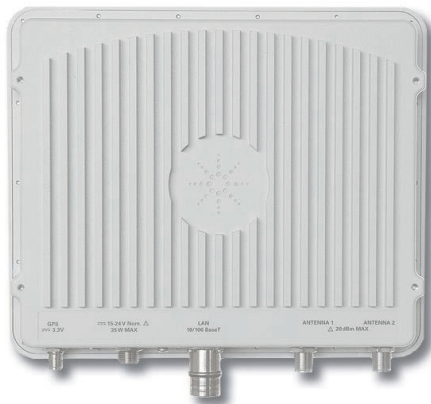
2. RF Sensor N6841A — charakterystyka urządzenia

Podstawowym elementem proponowanego systemu jest odbiornik RF Sensor N6841A. W rozdziale zostanie przedstawiona charakterystyka podstawowych właściwości urządzenia.

2.1. Podstawowe funkcjonalności

RF Sensor N6841A to urządzenie specjalizowane do monitorowania widma elektromagnetycznego w zakresie częstotliwości od 20 MHz do 6GHz. Nie ma elementów sterowania mechanicznego. Pracuje wyłącznie pod kontrolą specjalizowanych aplikacji programowych definiowanych przez użytkownika.

Zestaw wbudowanych w urządzenie elementarnych funkcji sterujących nakierowany jest na monitorowanie widma i detekcję sygnałów obecnych w kontrolowanej przez moduły N6841A przestrzeni. Potencjalny zakres zastosowań urządzenia to monitorowanie emisji radiokomunikacyjnych wewnątrz budynków, w terenie zurbanizowanym oraz otwartym. Jako medium komunikacyjne urządzenia N6841A wykorzystują standardową sieć komunikacyjną z zastosowaniem protokołu TCP/IP.



Rys. 1. RF Sensor N6841A

2.2. Podstawowe cechy RF Sensorów N6841A

Poniżej przedstawione zostaną podstawowe cechy RF Sensorów N6841A. Przytoczono cechy, które pozwolą nakreślić potencjalne zakresy i sposoby ich wykorzystania:

- szerokopasmowy odbiornik (do 6 GHz) z 20 MHz pasmem natychmiastowym,

- zmienne pasmo kanału pośredniej częstotliwości (do 20 MHz),
- dwa kluczowane wejścia sygnałowe RF (możliwość wykorzystania dwóch anten),
- wbudowany bufor pamięci do przechowywania przechwyconych danych,
- duża precyzja synchronizacji pomiarów oraz oznaczanie danych pomiarowych sygnaturami czasu o dużej dokładności,
- możliwość integrowania z urządzeniem GPS z aktywną anteną — synchronizacja czasu i pozycji,
- demodulacja AM/FM wraz z transmisją sygnału audio,
- możliwość ciągłej transmisji strumienia danych I/Q sygnału częstotliwości pośredniej,
- możliwość ciągłej transmisji strumienia danych FFT sygnału wejściowego,
- sterowanie z wykorzystaniem uniwersalnej magistrali sieciowej z użyciem protokołu TCP/IP,
- programowa konfigurowalność (zdalnie) z możliwością uruchamiania sterujących aplikacji użytkownika,
- dostępność programowego interfejsu API do zdalnego sterowania urządzeniem,
- szczelna obudowa o współczynniku ochrony IP67 (odporny na kurz oraz wodę),
- małe gabaryty urządzenia, łatwość instalacji mechanicznej.

2.3. Zastosowania

Podstawowe możliwe zastosowania RF Sensorów N6841A obejmują:

- ciągle (24/7) monitorowanie widma pod zdalną kontrolą komputera/kontrolera,
- poszukiwanie i detekcję sygnałów o zadanych parametrach technicznych,
- przechwyt i obserwację wybranych sygnałów wraz z ich demodulacją,
- wykorzystanie w aplikacjach klasy SIGINT i COMINT,
- analizę sygnałów analogowych i cyfrowych,
- przesyłanie strumienia danych do zdalnego kontrolera za pośrednictwem sieci komputerowej,
- procedury lokalizacji źródeł emisji,
- detekcję interferencji sygnałów,
- monitorowanie zajętości/użytkowania kanałów łączności,
- monitorowanie radiowe wybranych obszarów/stref zainteresowania,
- aplikacje monitorowania zagrożeń.

2.4. Monitorowanie emisji od źródeł o niskiej mocy

Technika komunikacji bezprzewodowej ulega ciągłemu, dynamicznemu rozwojowi. Nowe technologie pozwalają na zmniejszenie poziomu emitowanej energii przy zastosowaniu mechanizmów rozpraszania widma oraz na wykorzystywanie coraz wyższych częstotliwości pracy urządzeń komunikacyjnych.

Krok za zmianami w technikach transmisji podążają zmiany w technikach monitorowania źródeł emisji. Model monitoringu bazujący na RF Sensorach N6841A jest rozwiązaniem wychodzącym naprzeciw nowym trendom w technikach transmisji. W tej koncepcji odbiornik urządzenia monitorującego powinien być w mniejszej odległości od źródła. Mniejszy dystans między źródłem emisji a odbiornikiem urządzenia monitorującego to korzystniejszy stosunek mocy sygnału do mocy szumów oraz uniknięcie odbioru emisji z kilku źródeł pracujących na tych samych kanałach jednocześnie.

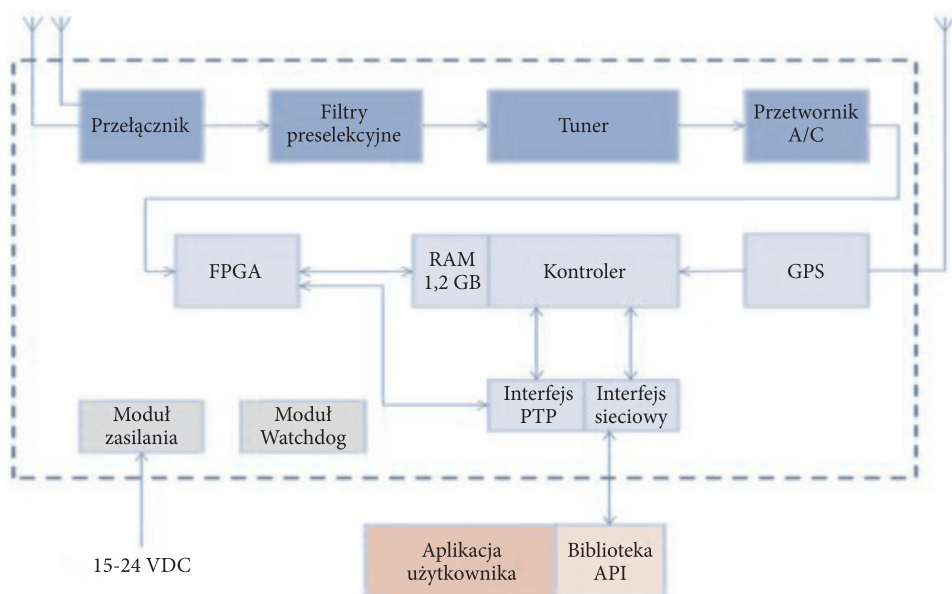
Przy emiterach o niskim poziomie mocy wyjściowej — nawet w małej odległości od źródła — gęstość mocy staje się stosunkowo mała. W takiej sytuacji strefa, w której poziom sygnału jest dostatecznie wysoki do odbioru i detekcji w urządzeniu monitorującym, zmniejsza się gwałtownie. W związku z tym konieczne staje się zagęszczenie czujników urządzeń odbiorczych na terenie zainteresowania. Istotnym warunkiem w realizacji tego wymagania jest zasadnicze obniżenie kosztów pojedynczego urządzenia monitorującego oraz kosztów jego obsługi przy zachowaniu niezbędnego poziomu technicznego.

RF Sensor N6841A zostały tak zaprojektowane, aby ich bezpośredni koszt był niewysoki. Dzięki możliwości zabudowy na zewnątrz budynków oraz zdalnemu sterowaniu za pośrednictwem ogólnodostępnej sieci Internet, nie ma potrzeby korzystania ze specjalnych pomieszczeń do ich instalacji. Ponadto zakłada się korzystanie z anten o niewygórowanych parametrach technicznych.

2.5. Schemat blokowy, konfigurowalność

RF Sensor N6841A składa się z analogowej sekcji odbiorczej oraz sekcji cyfrowego przetwarzania danych.

RF Sensor może być programowany zdalnie poprzez sieć komputerową. Przesyłane do RF Sensora aplikacje organizują pracę urządzenia w taki sposób, aby urządzenie realizowało odpowiednie algorytmy przeszukiwania przestrzeni elektromagnetycznej. RF Sensor N6841A posiada bufor pamięci o wielkości 1,2 GB. Jest ona wykorzystywana do bezstratnego przechwyty strumienia danych źródłowych na częstotliwości pośredniej ze zmienną szerokością pasma akwizycji — nawet do 20 MHz. Poprzez stosowanie filtrów decymacyjnych osiąga się dodatkowo wydłużenie zapamiętanego segmentu danych źródłowych.



Rys. 2. Schemat blokowy RF Sensora N6841A

RF Sensor N6841A wykorzystuje w swoich algorytmach zegar taktujący synchronizowany źródłem czasu o dużej precyzji. Jako źródło sygnału synchronizującego wykorzystuje się alternatywnie sygnał GPS lub interfejs sieciowy bazujący na protokole PTP (PTP — ang. *Precision Time Protocol*). W RF Sensorach zaimplementowano protokół PTP IEEE 1588.

3. System wielosensorowy

Aplikacje bazujące na RF Sensorach N6841A wykorzystywane do pomiaru parametrów energetycznych emisji dają najlepsze wyniki, gdy skonfigurowane są do pracy w sieci. Wykorzystuje się wtedy kilka urządzeń spiętych za pośrednictwem sieci komputerowej w jeden system informatyczny. RF Sensory rozmieszcza się w terenie w taki sposób, aby zapewnić pełne pokrycie obszaru kontroli czy obserwacji.

RF Sensory N6841A zorganizowane w sieci mogą wykonywać różne zadania i algorytmy pomiarowe, przy czym każdy z nich może realizować inny scenariusz z wykorzystaniem odmiennych algorytmów przetwarzania. Scenariusze i zadania pomiarowe mogą być przerywane i modyfikowane stosownie do zmieniających się potrzeb i oczekiwań systemu nadrzędnego.

System składający się z wielu sensorów rozmieszczonych przestrzennie do monitorowania określonego obszaru można skonfigurować w taki sposób, aby monitorowanie/skanowanie przestrzeni elektromagnetycznej realizowane było synchronicznie przez wszystkie sensory. Funkcjonalność ta odgrywa szczególnie dużą rolę w środowisku o dużej gęstości emisji i zakłóceń elektromagnetycznych. Synchroniczne skanowanie w znacznym stopniu podnosi prawdopodobieństwo jednoczesnego odbioru tej samej emisji przez kilka sensorów, nawet przy słabym poziomie sygnału i silnym tle sygnałowym.

Synchronizacja RF Sensorów z dużą dokładnością daje podstawę do realizacji detekcji sygnałów obserwowanych przez różne sensory (w tym sygnałów o bardzo małym poziomie mocy) metodą korelacji wzajemnej sygnałów. Odbiór synchroniczny, następnie detekcja z wykorzystaniem korelacji wzajemnej wprowadzają znaczną redukcję szumów stanowiących tło odebranych sygnałów. Ponadto detekcja korelacyjna sygnałów stanowi bazę do prowadzenia lokalizacji emiterów metodą TDoA (TDoA — ang. *Time Difference of Arrival*).

4. Przetwarzanie sygnałów, dostęp do danych

Sensory N6841A są wyposażone przez producenta w biblioteki interfejsów programowania aplikacji API (API — ang. *Application Programming Interface*). Interfejs udostępnia funkcjonalności związane z pełną kontrolą odbiornika oraz z akwizycją danych pomiarowych.

Konstrukcja sprzętowa i programowa RF Sensorów zapewnia przesyłanie w sieci komputerowej strumienia źródłowych danych pomiarowych I/Q na częstotliwości pośredniej oraz dane spektrum widma z zakresu obserwacji RF Sensora. Przy dostatecznie wydajnym medium komunikacyjnym oraz stosownym ograniczeniu obserwowanego i analizowanego pasma częstotliwości można zapewnić bezstratną (bez przerw czasowych) akwizycję sygnałów i transmisję danych pomiarowych I/Q oraz widma z RF Sensora do jego kontrolera. Dane I/Q oraz dane widma generowane są w RF Sensorze jednocześnie. Tak więc detekcja emisji może być dokonywana na drodze analizy widma częstotliwości przy jednoczesnej rejestracji strumienia danych w dziedzinie czasu.

RF Sensory N6841A posiadają pojemny bufor pamięci. Pamięć ta wykorzystywana jest do przechowywania strumienia danych pomiarowych. Przechowywane w buforze dane wykorzystane są w algorytmach przetwarzania albo jako reprezentacje sygnałów podlegające rejestracji na nośnikach zewnętrznych. Ponadto bufor pamięci może być wykorzystany jako linia opóźniająca w niektórych algorytmach analizy danych — zwłaszcza gdy system ma do czynienia z krótkotrwałymi emisjami lub też z emisjami „skaczącymi” w trakcie pracy w pewnym zakresie częstotliwości.

5. Wyniki wybranych badań podstawowych parametrów technicznych RF sensorów

W ramach realizacji projektu O R00 0161 12 przeprowadzono serię pomiarów parametrów technicznych urządzeń RF Sensorów N6841A. Pomiary miały na celu praktyczną weryfikację danych technicznych przedstawianych przez producenta aparatury. Program testów został tak określony, aby umożliwić praktyczne poznanie możliwości i ograniczeń urządzeń w kontekście ich wykorzystania w aplikacjach użytkowych.

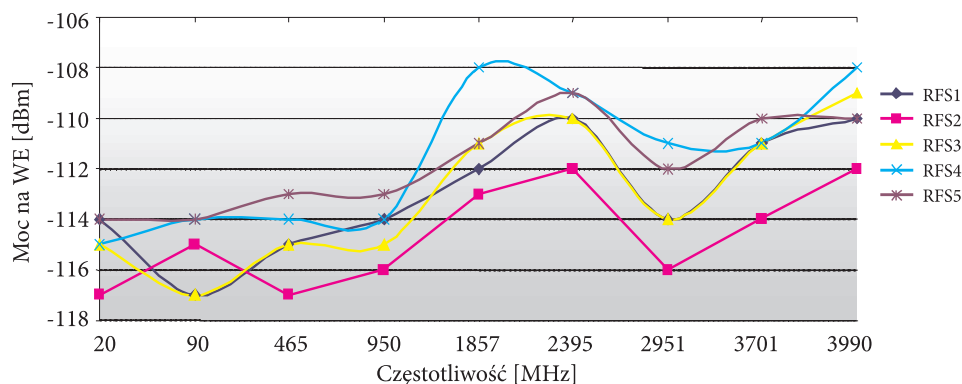
W artykule przytoczono wyniki wybranych badań dotyczących podstawowych parametrów technicznych RF Sensorów. Wykonano je z wykorzystaniem certyfikowanej aparatury pomiarowej w warunkach laboratoryjnych.

5.1. Pomiary czułości stycznej CW

Jako czułość styczną przyjęto taki poziom sygnału na wejściu antenowym RF Sensora, przy którym amplituda tego sygnału przewyższa poziom szumów urządzenia o zadany poziom 6 dB.



Rys. 3. Schemat pomiarowy — pomiar czułości stycznej CW



Rys. 4. Wyniki — pomiar czułości stycznej CW

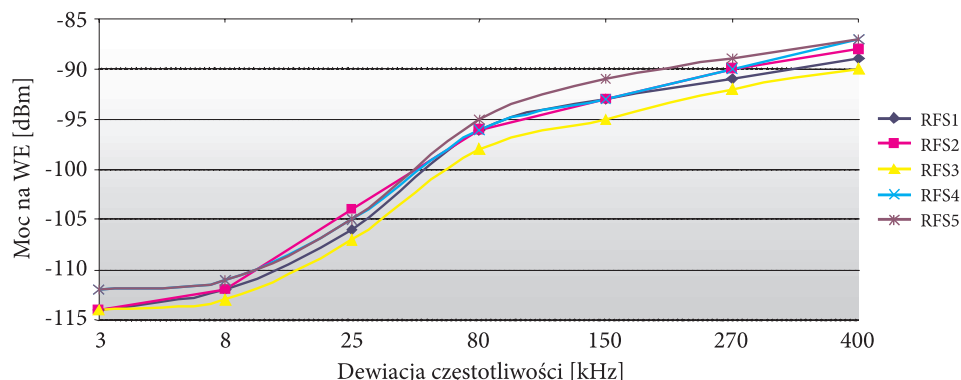
Do pomiaru czułości stycznej wykorzystano generator E4433B firmy Agilent. Sygnał z wyjścia generatora podawano bezpośrednio na wejścia wszystkich badanych sensorów. Sygnałem testowym była fala ciągła (CW). W aplikacji sterującej dokonano następujących nastaw RF Sensorów: RBW 1,29 kHz, Span 1 MHz, liczba uśrednianych skanów w RF Sensorze — 256, typ uśredniania skanów RMS.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono niezależność czułości stycznej odbiorników (dla każdego RF Sensora) od wybranego wejścia antenowego. Mierzony parametr oscylował w przedziale -117 dB do -108 dB w całym zakresie częstotliwości pomiarów.

5.2. Pomiary czułości stycznej FM

Wykorzystywany schemat pomiarowy pozostał identyczny jak w przypadku pomiaru czułości stycznej CW. Sygnałem testowym była emisja z szumową modulacją FM. Zmianie ulegała wartość dewiacji częstotliwości (DF). Badaniom poddane zostały wszystkie dostępne sensory. W aplikacji sterującej dokonano następujących nastaw RF Sensorów: RBW 1,29 kHz, Span 1 MHz, liczba uśrednianych skanów w RF Sensorze — 256, typ uśredniania skanów RMS.

Na wykresie (rys. 5) przedstawiono wyniki dla wybranej jednej wartości częstotliwości nośnej 2951 MHz. Dla pozostałych badanych wartości częstotliwości nośnych mierzone wartości miały podobny charakter.

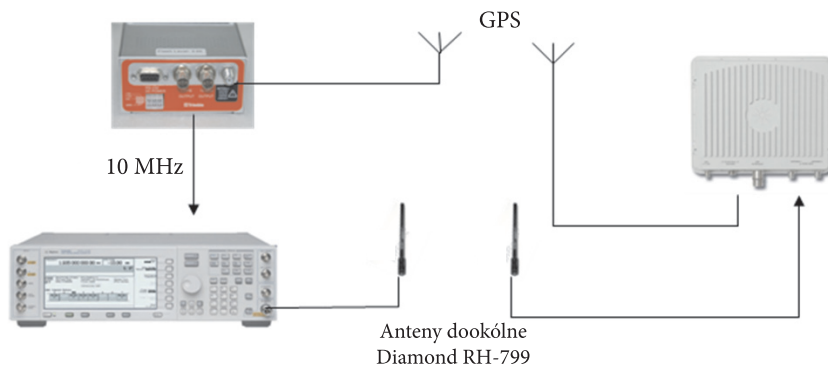


Rys. 5. Wyniki — pomiar czułości stycznej CW — sygnał z modulacją FM

5.3. Dokładność pomiaru częstotliwości

Pomiar miał na celu sprawdzenie dokładności pomiaru częstotliwości przez RF Sensory. Odbiorniki miały zapewnioną synchronizację czasu z wbudowanym urządzeniem GPS. W pomiarze nie brano pod uwagę parametrów amplitudowych.

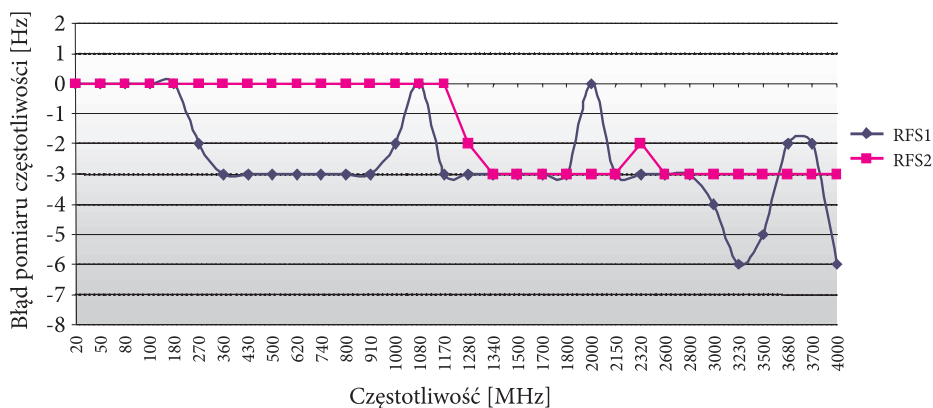
Jako wzorcowe źródło sygnału użyto generatora E4433B wykorzystującego sygnał synchronizujący 10 MHz z zewnętrznego odbiornika GPS Trimble Thunderbolt.



Rys. 6. Schemat pomiarowy — dokładność pomiaru częstotliwości

Sygnał testowy stanowiła fala ciągła bez modulacji. Promieniowany był on przez antenę nadawczą oraz odbierany przez antenę odbiorczą dołączoną do RF Sensora.

Pomiary przeprowadzono dla wszystkich RF Sensorów. Uzyskane wyniki miały podobny charakter jak przedstawione na wykresie dla wybranych dwóch RF Sensorów.



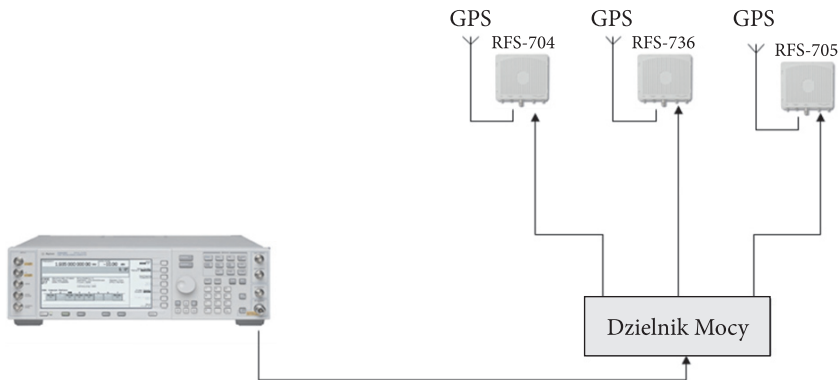
Rys. 7. Wyniki — dokładność pomiaru częstotliwości

5.4. Pomiary czułości stycznej korelacyjnej

Jak wcześniej wspomniano, RF Sensory N6841A mogą być skonfigurowane do pracy synchronicznej. Praca synchroniczna może odbywać się zarówno przy

skanowaniu przestrzeni elektromagnetycznej jak i przy rejestracji sygnałów na wybranych częstotliwościach.

W omawianym pomiarze zastosowano synchroniczną rejestrację próbek IQ sygnałów. Każdy z pracujących RF Sensorów otrzymywał identyczny zestaw parametrów do rejestracji sygnałów. Następnie zarejestrowane sygnały (próbki IQ) przekazywano do zewnętrznego kontrolera, gdzie poddawane były przetworzeniu. Analizowano przebieg funkcji korelacji wzajemnej zarejestrowanych w różnych RF Sensorach sygnałów.



Rys. 8. Schemat pomiarowy — dokładność pomiaru częstotliwości

Pomiar polegał na znalezieniu takiej minimalnej mocy na wejściach RF Sensorów, przy której funkcja korelacji wzajemnej uzyskiwała maksimum na poziomie przekraczającym co najmniej o 6 dB poziom odniesienia tejże funkcji. Nie mierzono miejsca położenia maksimum funkcji korelacji, jedynie jej amplitudę względną. Układ pomiarowy został tak skonstruowany, aby każdy z RF sensorów odbierał sygnał na takim samym poziomie jak pozostałe. Sygnał z generatora podawany był na wejścia trzech RF Sensorów poprzez dzielnik mocy o znanej charakterystyce tłumienia. Sygnałem testowym był sygnał sinusoidalny z szumową modulacją FM o dewiacji 500 kHz na częstotliwości nośnej 2395 MHz.

Dla porównania w tabeli 1 przytoczone zostały wyniki pomiarów opisanych we wcześniejszych paragrafach. Wybrano takie pomiary, które pozwalają porównać czułości urządzenia z czułością związaną z detekcją korelacyjną.

Wykonane pomiary dla wielu wartości częstotliwości nośnych przy sygnale testowym o szerokim paśmie potwierdziły przedstawioną w tabeli prawidłowość. Porównując wartość czułości stycznej dla sygnału z modulacją FM o dużej wartości dewiacji (400 kHz) i czułością korelacyjną dla tego samego sygnału testującego, uzyskuje się znacząco lepsze wyniki dla pomiarów przy detekcji korelacyjnej. Różnica dochodzi do 16 dB. Uzyskane wyniki pozwalają przewidywać znacząco lepszą skuteczność przy poszukiwaniu i lokalizacji źródeł emisji o niskim poziomie energii

z wykorzystaniem metody korelacyjnej. Jeśli założyć dostępność nawet małego sygnału dla co najmniej trzech RF Sensorów, to detekcja synchroniczna staje się jednoznaczna z lokalizacją źródła emisji.

TABELA 1

Pomiar czułości korelacyjnej

Mierzony parametr	Wartość [dBm]	Numer RF Sensora	Uwagi
Czułość styczna CW	-110	RFS 1	Sygnał testowy — CW bez modulacji
	-112	RFS 2	
	-110	RFS 3	
Czułość styczna BW	-89	RFS 1	Sygnał testowy CW z modulacją szumową FM — dziewięć 400 KHz
	-88	RFS 2	
	-90	RFS 3	
Czułość korelacyjna	-104	RFS 1 @ RFS 2	Sygnał testowy CW z modulacją szumową FM — dziewięć 400 KHz
	-106	RFS 1 @ RFS 3	
	-103	RFS 2 @ RFS 3	

6. Podsumowanie

Przeprowadzone i opisane w artykule badania dotyczyły podstawowych parametrów technicznych RF Sensorów N6841A. Przytoczone wyniki dotyczą jedynie wybranych parametrów, związanych z możliwościami odbioru słabych sygnałów i dokładnościami pomiaru parametrów częstotliwościowych emisji.

Badania przeprowadzono na 5 RF Sensorach. Zmierzone wartości czułości urządzeń oraz dokładności pomiaru częstotliwości były powtarzalne dla wszystkich egzemplarzy urządzeń. Można przewidywać, że zmierzone wartości są wiarygodne i reprezentatywne.

Na szczególną uwagę zasługują wyniki osiągnięte przy określaniu dokładności estymacji częstotliwości oraz przy pomiarze czułości korelacyjnej. Wysoka dokładność pomiaru częstotliwości pozwala przewidywać wysoką skuteczność urządzeń przy wykrywaniu i identyfikacji typów emisji, pomiarze parametrów stosowanych modulacji. Natomiast wysoka skuteczność detekcji słabych emisji metodą korelacyjną czyni tę metodę atrakcyjną w kontekście wykorzystania RF Sensorów w aplikacjach monitorowania i ochrony wybranych obszarów (lotniska, bazy wojskowe, budynki, ...).

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów wąskiej grupy parametrów. Badania dotyczące innych parametrów i właściwości oraz możliwości RF Sensorów N6841A, zwłaszcza tych dotyczących lokalizacji źródeł emisji, przedstawione są w innych opracowaniach i artykułach.

Praca naukowa finansowana przez NCBiR ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt rozwojowy.

LITERATURA

W artykule wykorzystano materiały udostępnione przez producenta aparatury Agilent Technologies na jego stronach internetowych:

- [1] cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-3839EN.pdf
- [2] www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/N6841A_Installation_Guide.pdf

J. FORNALIK, G. CZOPIK

Radio signal sources multisensor localization system

Abstract. The initial phase of a research on the active emitters location system is presented in the paper. Experiments were performed using dispersed system of specialized receivers. The receivers were located around the controlled area. Receivers were separated in a distance but connected by the communication network.

The receivers used during the research are N6841 RF Sensors manufactured by Agilent Technologies Inc. N6841 receiver is described at the beginning of the paper. Main objective of the research is to study and examine the properties of the receivers in case of using as a separate and as a networking mode receivers. Several definition of receiver sensitivity were used to make measurement. Sensitivity of the independent receiver was compared to sensitivity of networked receivers. A correlation algorithm of signals detection was used to calculate TDoA (Time Difference of Arrival). TDoA measurements will be used in emitters localization procedures.

Keywords: radio-electronic systems, localization, TDoA