

Zastosowanie technologii SDF do lokalizowania źródeł emisji BPSK i QPSK

Streszczenie. Metoda SDF, zwana także dopplerowską metodą lokalizacji, służy do estymacji współrzędnych położenia źródeł emisji przez ruchomy odbiornik pomiarowy. Niniejszy artykuł został poświęcony zastosowaniu technologii SDF w odniesieniu do źródeł emitujących sygnały z kluczowaniem fazy. W artykule przedstawiono m.in. sposób wyznaczania częstotliwości Dopplera na podstawie analizy widmowej odbieranego sygnału, opis przeprowadzonych badań empirycznych oraz uzyskane wyniki.

Abstract. SDF method, also known as the Doppler location method, is used to estimate the position coordinates of the emission sources by the mobile measuring receiver. In this paper is presented how to use SDF technology to locate sources that emit the phase shift keying signals. In the paper are presented i.a.: a methodology for determining of the Doppler frequency based on the spectral analysis of the received signal, a description of the empirical studies and the obtained results. (The use of SDF technology to BPSK and QPSK emission sources' location).

Słowa kluczowe: lokalizacja źródeł emisji, efekt Dopplera, technologia SDF, kluczowanie fazy.

Keywords: localization of the emission sources, Doppler effect, SDF technology, phase shift keying.

Wstęp

Lokalizacja, zwana również pozycjonowaniem, to proces, który polega na wyznaczeniu estymowanych wartości współrzędnych położenia źródła sygnału na podstawie cech odbieranego sygnału, który został wypromieniowany przez lokalizowany obiekt. Podstawowym kryterium klasyfikacji metod lokalizacji jest rodzaj parametru wyznaczanego w odbieranym sygnale, na podstawie którego określana jest pozycja źródła sygnału w danej metodzie. W omawianej klasyfikacji wyróżnić można pięć podstawowych grup metod pozycjonowania [1-7]:

- metody kątowe, np. AOA (*Angle of Arrival*),
- metody amplitudowe, np. RSS (*Received Signal Strength*),
- metody czasowe, np. TOA (*Time of Arrival*), TDOA (*Time Difference of Arrival*),
- metody częstotliwościowe, np. FDOA (*Frequency Difference of Arrival*), SDF (*Signal Doppler Frequency*),
- metody hybrydowe, będące połączeniem przynajmniej dwóch różnych metod.

Każda z powyższych grup metod posiada różne zalety i wady oraz dedykowany obszar zastosowań. Metody kątowe wymagają np. rozbudowanych systemów antenowych i/lub kosztownych namierników radiowych. W przypadku metod amplitudowych niezbędna jest znajomość charakteru tłumienia sygnału w analizowanym środowisku elektromagnetycznym. Wzrost dokładności metod czasowych związany jest m.in. ze zwiększaniem szerokości pasma sygnałów emitowanych przez lokalizowane obiekty. Z tego też względu znajdują one powszechne zastosowanie w szerokopasmowych systemach łączności bezprzewodowej oraz tzw. systemach ultraszerokopasmowych UWB (*Ultra-WideBand*). Szerokie pasmo sygnałów utrudnia natomiast korzystanie z metod częstotliwościowych. Metody te pozwalają uzyskać stosunkowo dobrą dokładność pozycjonowania w przypadku sygnałów wąskopasmowych.

W celu zmniejszenia wpływu wad konkretnych metod, coraz częściej sięga się po tzw. metody hybrydowe, które polegają na zastosowaniu minimum dwóch różnych technik lokalizacyjnych. W szczególnych przypadkach może to jednak nie dawać zamierzonego efektu. Inny sposób zwiększenia dokładności estymacji położenia lokalizowanych obiektów polega na dostosowaniu wybranej metody do szczególnego typu sygnału (np. konkretnej modulacji) lub charakterystycznych cech środowiska (np. uwzględnienie zjawiska wielodrogowości). Zgodnie

z tym podejściem, w [8] przedstawiono modyfikację metody SDF mającą na celu umożliwienie lokalizacji źródła sygnału harmonicznego propagującego w środowisku miejskim, w którym występuje zjawisko wielodrogowości. W niniejszym artykule autorzy pragną przedstawić sposób wykorzystania metody SDF w odniesieniu do źródeł emitujących sygnał z kluczowaniem (manipulacją) fazy.

Niniejszy artykuł został podzielony na pięć części. W sekcji drugiej przedstawiono krótką charakterystykę metody SDF i jej modyfikację dla potrzeb lokalizacji źródeł emisji PSK (*Phase Shift Keying*). Sekcja trzecia zawiera opis stanowiska pomiarowego, scenariusza badań empirycznych oraz metodykę realizacji pomiarów. W sekcji czwartej zaprezentowane zostały wyniki lokalizacji źródła emitującego sygnał z dwu- i czterowartościową modulacją fazy, przy wykorzystaniu analizy widmowej odbieranego sygnału oraz metody SDF. Uzyskane wyniki pokazały wpływ doboru parametrów analizy widmowej na dokładność określania pozycji lokalizowanego obiektu. Artykuł zakończono podsumowaniem.

Lokalizacja źródła sygnału harmonicznego za pomocą dopplerowskiej metody lokalizacji

Dopplerowska metoda lokalizacji, zwana także metodą lub technologią SDF (*Signal Doppler Frequency location method / technology*), została opracowana w Instytucie Telekomunikacji Wojskowej Akademii Technicznej. Podstawą jej wykorzystania w praktyce jest pomiar dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości w sygnale odbieranym przez poruszający się pojazd wyposażony w odbiornik pomiarowy.

Metoda SDF bazuje na analitycznej zależności opisującej częstotliwość Dopplera $f_{D0}(t)$ w funkcji współrzędnych (x_0, y_0, z_0) położenia źródła sygnału [9]:

$$(1) \quad f_{D0}(t) = kf_0 \frac{x_0 - vt}{\sqrt{(x_0 - vt)^2 + y_0^2 + z_0^2}}$$

gdzie $k = v/c$, v to prędkość przemieszczania się odbiornika względem nadajnika, c to prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku.

Przekształcając zależność (1) można wyznaczyć estymaty współrzędnych (x, y, z) położenia źródła sygnału, które wymagają pomiaru dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości $f_{De}(t)$ w kilku momentach czasu.

W przypadku sygnału harmonicznego dopplerowskie przesunięcie częstotliwości $f_{De}(t)$ wyznaczane jest jako różnica pomiędzy częstotliwością sygnału odebranego $f(t)$ a częstotliwością sygnału wypromieniowanego f_0 przez lokalizowane źródło [7,9]

$$(2) \quad f_{De}(t) = f(t) - f_0$$

gdzie częstotliwość $f(t)$ może zostać wyznaczona np. za pomocą dyskryminatora częstotliwości, metodą kwadraturową lub na podstawie analizy widma odbieranego sygnału [9].

Pomiar wartości $f_{De}(t)$ przynajmniej w dwóch chwilach czasu (t_1 i t_2) pozwala na wyznaczenie współrzędnych (x, y) położenia źródła sygnału metodą SDF zgodnie z poniższymi wzorami [7,10,11]:

$$(3) \quad \begin{cases} x = v \frac{t_1 A(t_1) - t_2 A(t_2)}{A(t_1) - A(t_2)} \\ y = \pm \sqrt{\left[\frac{v(t_1 - t_2) A(t_1) A(t_2)}{A(t_1) - A(t_2)} \right]^2 - z^2} \end{cases}$$

gdzie

$$(4) \quad A(t) = \frac{\sqrt{1 - F^2(t)}}{F(t)}, \quad F(t) = \frac{f_{De}(t)}{k f_0}$$

Zależności (3)-(4) pozwalają na wyznaczenie dwóch współrzędnych (x, y) położenia źródła sygnału, przy założeniu znajomości trzeciej współrzędnej $z = z_0$. Jest to tzw. lokalizacja na płaszczyźnie (2D). W [7,10] przedstawiono modyfikację metody SDF pozwalającą na realizację lokalizacji przestrzennej (3D).

Lokalizacja źródła emisji PSK

Problem zastosowania metody SDF do lokalizacji źródeł emitujących sygnały zmodulowane wynika z pewnej trudności wyznaczania częstotliwości Dopplera w widmie odbieranego sygnału. Widmo sygnałów zmodulowanych jest rozproszone. Jeżeli w takim widmie występują tzw. częstotliwości charakterystyczne (np. częstotliwość pilota, fali nośnej lub podnośne), wówczas pomiar dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości można realizować na bazie charakterystycznego prążka w widmie. Widmo większości typów emisji nie posiada jednak tak charakterystycznego znacznika (markera).

W przypadku źródeł emitujących sygnały z kluczowaniem fazy wykorzystuje się cechę charakterystyczną tych emisji. W widmie sygnału $s(t)$ z n -wartościową manipulacją fazy nie występuje typowy marker, natomiast znacznik taki pojawia się w widmie sygnału $s^n(t)$, podniesionego do n -tej potęgi, na częstotliwości $n f_0$, gdzie f_0 jest częstotliwością nośną widma $s(t)$.

W sytuacji, gdy sygnał $s(t)$ analizowany jest po przemianie, na częstotliwości pośredniej f_p , wówczas w widmie sygnału $s^n(t)$ marker pojawia się na częstotliwości $n f_p$. To typowe podejście dla sygnałów z kluczowaniem fazy jest wykorzystywane m.in. do ich detekcji (np. [12]) lub odtwarzania częstotliwości nośnej (np. [13]).

Badania empiryczne

Prezentowane w dalszej części artykułu wyniki badań odnoszą się do sygnałów z dwoma rodzajami modulacji fazy: BPSK oraz QPSK. Modulacja BPSK (*Binary PSK*), określana także akronimem 2PSK, to najprostsza, dwuwartościowa manipulacja fazy. Natomiast QPSK (*Quadrature PSK*), zwana również 4PSK, to czterowartościowa modulacja fazy, polegająca na kodowaniu dwubitowym na czterech ortogonalnych przesunięciach fazy.

Lokalizacja źródła emisji sygnałów 2PSK i 4PSK metodą SDF została przeprowadzona na bazie sygnałów zarejestrowanych za pomocą ruchomego odbiornika na zwykłej trasie pomiarowej. Ze względu na dużą zbieżność zrealizowanych badań z przeprowadzanymi wcześniej pomiarami, które przedstawiono m.in. w [7,10,11], zagadnienia niniejszej sekcji zostały przedstawione ogólnikowo.

Stanowisko pomiarowe

W badaniach empirycznych wykorzystano stanowisko, którego struktura była zbliżona do przedstawionej np. w [7,10,11]. Stanowisko pomiarowe składało się z dwóch części: statycznej – nadawczej (Tx) oraz ruchomej – odbiorczej (Rx).

Zasadniczymi elementami części nadawczej, umieszczonej w budynku, w pobliżu trasy pomiarowej, były:

- generator sygnałowy *Hameg HM8134-3* emitujący sygnał BPSK lub QPSK na częstotliwości nośnej 1832 MHz,
- wzmacniacz *Amplifier Research 5S1G4M4*,
- antena nadawcza *Kathrein Dual-band Omnidirectional Antenna 738 449* umieszczona na dachu budynku, która stanowiła cel lokalizacji.

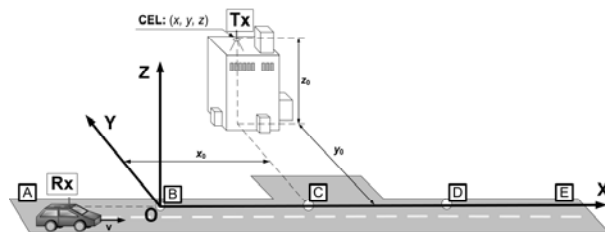
Na część odbiorczą, usytuowaną w pojeździe, składały się następujące elementy:

- antena odbiorcza *Kathrein Dual-band Omnidirectional Antenna 738 449* umieszczona na dachu pojazdu,
- szerokopasmowy odbiornik radiokomunikacyjny *Rohde&Schwarz EM550*,
- komputer przenośny z aplikacją *Rohde&Schwarz EMx50* do rejestracji odbieranego sygnału,
- układ zasilania pokładowego (akumulatory i przetwornica napięcia).

W trakcie realizacji pomiarów wykorzystano system bramek czasowych, który umożliwił automatyczne rozpoczęcie i zakończenie procesu rejestracji sygnału w momentach przecięcia wiązek podczerwieni przez poruszający się pojazd.

Scenariusz badań

Badania empiryczne zostały przeprowadzone na terenie Wojskowej Akademii Technicznej. Nadajnik umieszczony został w budynku 75, natomiast mobilny odbiornik przemieszczał się po jezdni przebiegającej w pobliżu wspomnianego budynku, co przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Scenariusz badań

Na rysunku zaznaczono charakterystyczne punkty [A]–[E] na trasie pomiarowej. W punktach [B] i [D] umieszczone zostały bramki czasowe odpowiedzialne za automatyzację procesu rejestracji sygnału.

Metodyka realizacji pomiarów

W punkcie [A] (rys. 1), gdy pojazd był nieruchomy, rejestrowany był sygnał odniesienia służący do określenia częstotliwości nośnej f_0 (pośredniej f_p). Następnie na odcinku [A]–[B] pojazd rozpędzał się do prędkości v około 10 m/s. Na odcinku [B]–[D] Rx przemieszczał się ze stałą prędkością i od punktu [D] do [E] wyhamowywał. Rejestracja sygnału 2PSK lub 4PSK uwzględniająca efekt Dopplera, odbywała się na odcinku trasy pomiarowej o długości 150 m, pomiędzy punktami [B] i [D]. Realizowana była również rejestracja sygnału w analogiczny sposób przy przemieszczaniu pojazdu w przeciwnym kierunku od punktu [E] do [A]. Dane przetwarzane były w postprocessingu.

Założenia dla badań empirycznych

W trakcie pomiarów oraz analizy zarejestrowanych sygnałów przyjęto następujące wartości parametrów:

- $f_0 = 1832$ MHz – częstotliwość nośna sygnału BPSK lub QPSK o szerokości pasma około $B = 600$ kHz (3 dB),
- $(x_0, y_0, z_0) = (75.0, 23.5, 12.5)$ m – rzeczywiste położenie lokalizowanego obiektu (anteny Tx) emitującego sygnał BPSK lub QPSK (przy kierunku ruchu od [E] do [A]: $y_0 = 18.0$ m),
- $v \approx 10$ m/s – dokładna prędkość przemieszczania pojazdu z Rx wyznaczana była na podstawie czasu rejestracji każdego sygnału na odcinku pomiarowym [B]–[D] o długości $S = 150$ m,
- $f_s = 1.28$ MHz – częstotliwość próbkowania zarejestrowanego sygnału,
- $\Delta f_s = 1$ Hz – podstawowa częstotliwość analizy,
- $\Delta T = \{0.1, 0.25, 0.5, 1.0\}$ s – okno czasowe wykorzystane do analizy sygnału,
- $\Delta t = \{0.1, 0.25, 0.5, 1.0\}$ s – przesunięcie okna czasowego.

Widmo sygnałów PSK analizowane jest w punktach pomiarowych t_i wyznaczanych co odstęp czasu Δt , na podstawie próbek sygnału o czasie trwania ΔT zarejestrowanych w przedziale czasu $[t_i - \Delta T, t_i]$.

Przykładowy pomiar dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości sygnałów PSK

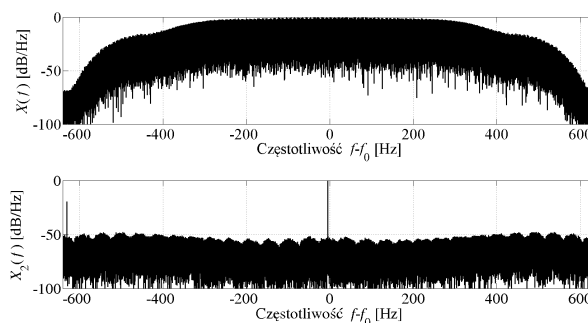
Na rysunku 2 przedstawiono w skali logarytmicznej przykładowe widmo $X(f)$ sygnału $s(t)$ z modulacją 2PSK oraz odpowiadające mu widmo $X_2(f)$ sygnału $s^2(t)$, podniesionego do drugiej potęgi.

Analogiczne dla modulacji 4PSK, na rysunku 3 przedstawiono wykresy widma $X(f)$ sygnału $s(t)$ oraz widma $X_4(f)$ sygnału $s^4(t)$, podniesionego do czwartej potęgi.

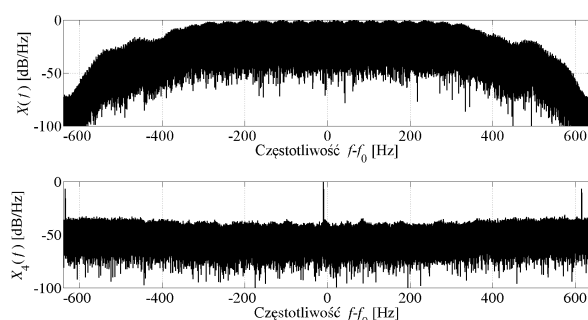
Charakterystyczny prążek w pobliżu częstotliwości 0 Hz występują odpowiednio dla modulacji 2PSK – w widmie $X_2(f)$ oraz dla modulacji 4PSK – w widmie $X_4(f)$. Na podstawie zmian położenia tych prążków na osi częstotliwości wyznaczane były kolejne wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości $f_{De}(t)$, zgodnie z przedstawioną powyżej metodyką.

Przykładowe przebiegi krzywych dopplerowskich uzyskane dla sygnału z modulacją 2PSK, dla wybranego

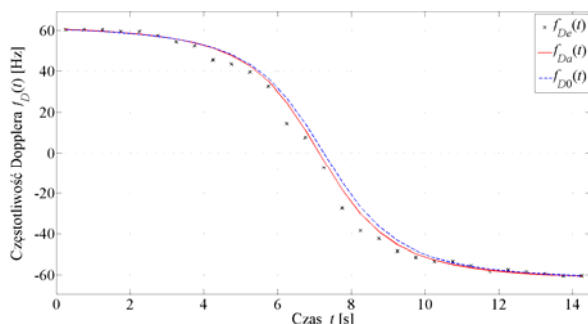
przejazdu na odcinku pomiarowym, przy $\Delta T = 0.5$ s i $\Delta t = 0.5$ s, zostały przedstawione na rysunku 4.



Rys.2. Przykładowe widmo $X(f)$ sygnału $s(t)$ z modulacją BPSK oraz odpowiadające mu widmo $X_2(f)$ sygnału $s^2(t)$ w paśmie podstawowym



Rys.3. Przykładowe widmo $X(f)$ sygnału $s(t)$ z modulacją QPSK oraz odpowiadające mu widmo $X_4(f)$ sygnału $s^4(t)$ w paśmie podstawowym



Rys.4. Przykładowe przebiegi krzywych dopplerowskich

Na podstawie wartości $f_{De}(t)$, zmierzonych w dyskretnych momentach czasu t_i , wyznaczone zostały estymaty współrzędnych (x, y) . Krzywa $f_{Da}(t)$, zaznaczona czerwoną linią ciągłą, została wyznaczona na podstawie zależności (1), do której podstawiono współrzędne (x, y, z_0) . Dla porównania, niebieską linią przerywaną zaznaczono krzywą teoretyczną $f_{D0}(t)$ dla rzeczywistej pozycji źródła (x_0, y_0, z_0) .

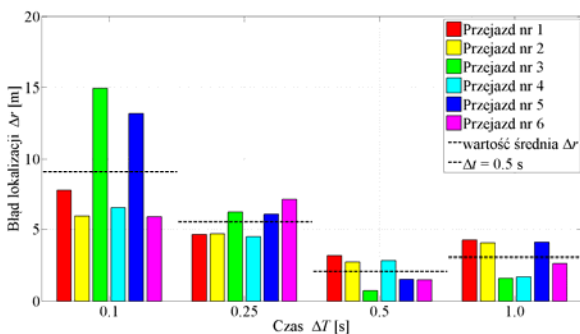
W analizowanym przypadku błąd Δr lokalizacji źródła sygnału na płaszczyźnie, wyznaczany ze wzoru [7]

$$(5) \quad \Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{|x - x_0|^2 + |y - y_0|^2}$$

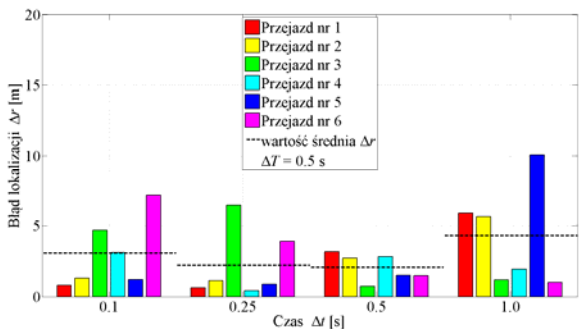
wyniósł około 1.5 m.

Wpływ wartości parametrów analizy na dokładność wyznaczania pozycji źródła emisji 2PSK

Bazując na zarejestrowanych sygnałach dokonano oceny wpływu wartości parametrów ΔT i Δt na dokładności lokalizacji źródła emisji 2PSK metodą SDF. Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym podejściu założono stałą wartość parametru $\Delta t = 0.5$ s i dokonywano zmiany wartości ΔT . W drugim etapie przyjęto wariant odwrotny, tzn. parametr ΔT miał stałą wartość równą 0.5 s, natomiast zmieniano wartość parametru Δt . Uzyskane wyniki w postaci wartości błędu lokalizacji Δr źródła emisji dla sześciu przejazdów na trasie pomiarowej, przy różnych wartościach analizowanych parametrów przedstawiono na rysunku 5 (zmienne ΔT) oraz na rysunku 6 (zmienne Δt).



Rys.5. Wartości błędu lokalizacji Δr w funkcji parametru ΔT dla modulacji BPSK, przy stałej wartości $\Delta t = 0.5$ s



Rys.6. Wartości błędu lokalizacji Δr w funkcji parametru Δt dla modulacji BPSK, przy stałej wartości $\Delta T = 0.5$ s

Na powyższych rysunkach linią przerywaną zaznaczono poziomy średniego błędu lokalizacji Δr_{avg} uzyskane na podstawie wartości błędu lokalizacji Δr dla różnych przejazdów przy określonych wartości parametrów ΔT i Δt . Wartości liczbowe średnich błędów lokalizacji Δr_{avg} zawarto w tabeli 1.

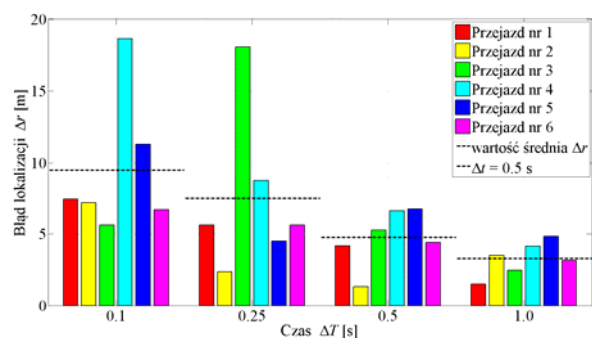
Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że dla zadanego scenariusza pomiarowego, najmniejsze wartości błędów lokalizacji źródła emisji 2PSK na płaszczyźnie uzyskano dla wartości parametrów analizy $(\Delta T, \Delta t) = (0.5 \text{ s}, 0.5 \text{ s})$. W tym przypadku średni błąd określenia pozycji nadajnika wyniósł poniżej 2.1 m. Niewiele gorsze wyniki uzyskano dla $(\Delta T, \Delta t) = (0.5 \text{ s}, 0.25 \text{ s})$ oraz $(\Delta T, \Delta t) = (1.0 \text{ s}, 0.5 \text{ s})$, odpowiednio około 2.2 m oraz 3.1 m. Dla rozpatrywanego scenariusza, przy tych wartościach parametrów analizy ΔT i Δt można otrzymać dobrą dokładność estymacji dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości oraz współrzędnych położenia źródła emisji BPSK.

Tabela 1. Średnie wartości błędu lokalizacji Δr_{avg} dla modulacji BPSK

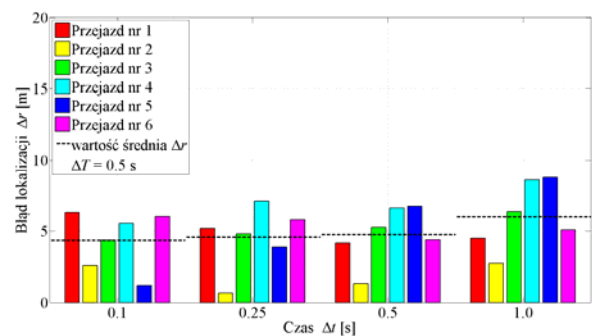
Zmienny parametr $\Delta T, \Delta t$ [s]	$\Delta r_{avg}(\Delta T)$ [m] $\Delta t = 0.5 \text{ s} = \text{const.}$	$\Delta r_{avg}(\Delta t)$ [m] $\Delta T = 0.5 \text{ s} = \text{const.}$
0.10	9.02	3.04
0.25	5.51	2.22
0.50	2.07	2.07
1.00	3.05	4.29

Wpływ wartości parametrów analizy na dokładność wyznaczania pozycji źródła emisji 4PSK

Dla zarejestrowanych sygnałów z modulacją QPSK przeprowadzono analogiczną analizę wpływu doboru wartości parametrów ΔT i Δt na błąd określania pozycji źródła sygnału metodą SDF. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 7 i 8, odpowiednio przy stałej wartości $\Delta t = 0.5$ s i zmiennej wartości ΔT oraz stałej $\Delta T = 0.5$ s i zmiennej Δt .



Rys.7. Wartości błędu lokalizacji Δr w funkcji parametru ΔT dla modulacji QPSK, przy stałej wartości $\Delta t = 0.5$ s



Rys.8. Wartości błędu lokalizacji Δr w funkcji parametru Δt dla modulacji QPSK, przy stałej wartości $\Delta T = 0.5$ s

Podobnie jak w przypadku analizy wyników dla modulacji BPSK, również w przypadku modulacji QPSK, na rysunkach 7 i 8 linią przerywaną zaznaczono Δr_{avg} , czyli wartości średnie błędu lokalizacji Δr dla określonej pary wartości parametrów ΔT i Δt . Wartości liczbowe Δr_{avg} zostały zawarte w tabeli 2.

Uzyskane dla modulacji 4PSK wyniki pokazują, że dla zadanego scenariusza pomiarowego, najmniejsze wartości błędu określania pozycji źródła sygnału otrzymano przy wartościach parametrów $(\Delta T, \Delta t) = (1.0 \text{ s}, 0.5 \text{ s})$. Błąd średni w tym przypadku wyniósł około 3.3 m. W przypadku, gdy $\Delta T = 0.5$ s i $\Delta t \leq 0.5$ s wartość Δr_{avg} była większa o około 33÷45 %.

Tabela 2. Średnie wartości błędu lokalizacji Δr_{avg} dla modulacji QPSK

Zmienny parametr $\Delta T, \Delta t$ [s]	$\Delta r_{\text{avg}}(\Delta T)$ [m] $\Delta t = 0.5 \text{ s} = \text{const.}$	$\Delta r_{\text{avg}}(\Delta t)$ [m] $\Delta T = 0.5 \text{ s} = \text{const.}$
0.10	9.47	4.33
0.25	7.47	4.56
0.50	4.74	4.74
1.00	3.26	5.99

Podsumowanie

W pierwszej części artykułu przedstawiono sposób wyznaczania dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości na podstawie analizy spektralnej sygnałów z kluczowaniem fazy. Pozwala to na zastosowanie metody SDF do lokalizacji źródeł emisji z tą modulacją. Druga część artykułu poświęcona została badaniom empirycznym, na podstawie których zrealizowano lokalizację źródła emisji 2PSK oraz 4PSK. Przedstawiono charakterystykę stanowiska pomiarowego oraz scenariusz i metodykę badań. Następnie zaprezentowano wyniki analizy zarejestrowanych sygnałów, na podstawie których wyznaczono błąd lokalizacji źródła metodą dopplerowską.

Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie najlepszych wartości parametrów analizy ΔT i Δt , przy których uzyskano najmniejsze wartości błędu lokalizacji. W przypadku modulacji BPSK, najmniejszą wartość średniego błędu określania pozycji nadajnika $\Delta r_{\text{avg}} \cong 2.1 \text{ m}$ uzyskano dla $(\Delta T, \Delta t) = (0.5 \text{ s}, 0.5 \text{ s})$. Dla modulacji QPSK, najmniejszy błąd $\Delta r_{\text{avg}} \cong 3.3 \text{ m}$ otrzymano dla $(\Delta T, \Delta t) = (1.0 \text{ s}, 0.5 \text{ s})$. Wartości $(\Delta T, \Delta t) = (1.0 \text{ s}, 0.5 \text{ s})$ można uznać za optymalne dla dwóch analizowanych przypadków. W tej sytuacji można szacować, że dla analizowanego scenariusza błąd określania współrzędnych położenia źródła emisji PSK na płaszczyźnie metodą SDF wynosić będzie około 3 m, niezależnie od wartościowości modulacji. Przedstawione wyniki pokazują ponadto, że dobór odpowiedniej wartości parametru ΔT jest bardziej istotny niż Δt .

Generalnie, pozycja źródła sygnału, wyznaczana metodą SDF, określana była z mniejszą dokładnością dla modulacji QPSK niż dla BPSK. Wynika to z mniejszej dokładności wyznaczania częstotliwości Dopplera dla emisji QPSK. Dla porównania można oszacować, że błąd określania dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości jest dwukrotnie większy w przypadku modulacji BPSK niż dla sygnału harmonicznego, a w przypadku QPSK aż czterokrotnie. Przy większej liczbie pomiarów, błędy te mogą się w pewnym stopniu kompensować. Wartości błędu lokalizacji, jakie otrzymano (około 2÷3 m) można uważać za zadowalające. We wcześniejszych badaniach dotyczących lokalizacji źródła sygnału harmonicznego, których wyniki zaprezentowano m.in. w: [7,10,11], średni błąd metody SDF dla lokalizacji 2D wynosił około 1 m, natomiast dla 3D – około 2 m. Należy jednak podkreślić, że niniejsze wyniki badań empirycznych pokazują potencjalną możliwość wykorzystania metody dopplerowskiej do określania współrzędnych położenia obiektów promieniujących sygnały zmodulowane. Na dokładność określania pozycji źródła w niniejszych badaniach zasadniczy wpływ miał sposób realizacji pomiarów. Przejazd po trasie nie zawsze odbywał się dokładnie po tym samym torze. Kolejną trudnością było utrzymanie stałej wartości prędkości pojazdu opierając się jedynie na podstawie wskazań prędkościomierza.

Bazowanie na wartości średniej prędkości oraz niedokładny pomiar rzeczywistej pozycji źródła względem odbiornika przekłada się na dokładność określenia pozycji źródła emisji PSK metodą SDF.

Możliwość lokalizacji źródeł powszechnie stosowanej emisji PSK, za pomocą metody SDF, uzasadnia wykorzystanie jej w różnych aplikacjach i systemach. Propozycje aplikacyjnych rozwiązań bazujących na technologii SDF dla potrzeb ratownictwa, zarządzania kryzysowego oraz nawigacji przedstawiono m.in. w [14-16].

LITERATURA

- [1] Küpper A., *Location-based services: Fundamentals and operation*, Wiley, (2007)
- [2] Sanford J. F., Potkonjak M., Slijepcevic S., *Localization in wireless networks: Foundations and applications*, Springer, (2012)
- [3] Zhao Y., Standardization of mobile phone positioning for 3G systems, *IEEE Commun. Mag.*, 40 (2002), n. 7, 108–116
- [4] Stefański J., *Badanie metod i projektowanie usług lokalizacyjnych w sieciach radiokomunikacyjnych*, 122 (2012), Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
- [5] Stefański J., *Metody i standardy pozycjonowania terminali w systemach komórkowych*, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, 79 (2006), nr.6, 180–185
- [6] Amar A., Weiss A. J., Localization of narrowband radio emitters based on doppler frequency shifts, *IEEE Trans. Signal Process.*, 56 (2008), n.11, 5500–5508
- [7] Kelner J. M., *Analiza dopplerowskiej metody lokalizacji źródeł emisji fal radiowych*, rozprawa doktorska, (2010), Warszawa, Polska: Wojskowa Akademia Techniczna
- [8] Ziółkowski C., Kelner J. M., Estymacja położenia źródła sygnału w warunkach wielodrogowej propagacji fal radiowych, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, 85 (2012), nr.4, 436–439
- [9] Rafa J., Ziółkowski C., Influence of transmitter motion on received signal parameters – Analysis of the Doppler effect, *Wave Motion*, 45 (2008), n.3, 178–190
- [10] Gajewski P., Kelner J. M., Ziółkowski C., Przestrzenna lokalizacja źródła sygnału radiowego z wykorzystaniem dopplerowskiej metody lokalizacji, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, 84 (2011), nr.6, 397–400.
- [11] Kelner J. M., Praktyczna ocena możliwości lokalizacji źródeł emisji radiowych na podstawie dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, 81 (2008), nr.4, 397–400
- [12] Skokowski P., Łopatka J., *Metody wykrywania i analizy sygnałów DSSS, VII Konferencja Naukowo-Techniczna nt.: Systemy Rozpoznania i Walki Elektronicznej (KNTWE'2008)*, Warszawa, (2008)
- [13] Studańska A., Studański R., Wąs R., Odbiór sygnałów z modulacją OQPSK zarejestrowanych w szerokim paśmie, *Przegląd Elektrotechniczny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, 84 (2011), nr.6, 608–611
- [14] Gajewski P., Kelner J. M., Ziółkowski C., Dynamiczna lokalizacja źródeł emisji na podstawie efektu Dopplera, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.7, 223–226
- [15] Kelner J. M., Ziółkowski C., System jednoczesnej lokalizacji obiektów bazujący na technologii SDF, *Elektronika-Konstrukcje, Technologie, Zastosowania*, 54 (2013), nr.1, 59–63
- [16] Kelner J. M., Wykorzystanie metody SDF w nawigacji lotniczej, *Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, 84 (2011), nr.6, 401–404

Autorzy: dr inż. Jan M. Kelner, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: jan.kelner@wat.edu.pl; dr hab. inż. Cezary Ziółkowski, prof. WAT, E-mail: cezary.ziolkowski@wat.edu.pl.