



Przestrzenna dopplerowska metoda lokalizacji źródeł sygnałów radiowych

PIOTR GAJEWSKI, CEZARY ZIÓŁKOWSKI, JAN M. KELNER

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
00-908 Warszawa 49, ul. S. Kaliskiego 2,
piotr.gajewski@wat.edu.pl, cezary.ziolkowski@wat.edu.pl, jan.kelner@wat.edu.pl

Streszczenie. Prezentowana w artykule problematyka poświęcona jest dopplerowskiej metodzie lokalizacji źródeł fal radiowych, nazywanej metodą SDF (*Signal Doppler Frequency location method*). Podstawę metody stanowi wykorzystanie efektu Dopplera, a w szczególności funkcyjna zależność opisująca zmiany chwilowych wartości częstotliwości odbieranego sygnału w funkcji zmian współrzędnych stanowiska pomiarowego względem lokalizowanego źródła. W artykule przedstawiono całościowy zakres zagadnień związanych z analizą teoretyczną, problematyką praktycznej realizacji pomiarów i analizą otrzymanych wyników. W zakresie przeprowadzonych badań empirycznych opisano strukturę stanowiska, trasę oraz metodykę realizacji pomiarów. Na podstawie danych pomiarowych dokonano wstępnej oceny dokładności opracowanej metody i określono uwarunkowania jej praktycznego wykorzystania. Uzyskane wyniki analizy porównawczej dowodzą perspektywicznego charakteru opracowanej metody SDF i pokazują jej odmienną względem dotychczas praktycznie stosowanych i rozwijanych metod lokalizacji źródeł fal radiowych.

Słowa kluczowe: radiokomunikacja ruchoma, efekt Dopplera, przestrzenna lokalizacja źródeł fal radiowych, dopplerowska metoda lokalizacji, SDF, *Signal Doppler Frequency*

1. Wstęp

Problematyka lokalizacji źródeł sygnałów w odniesieniu do sieci radiowych jest jednym z najważniejszych elementów prowadzenia walki elektronicznej. Podstawowa metoda umożliwiająca lokalizację nieznanego źródła emisji bazuje na technice AOA (*Angle Of Arrival*). W tym przypadku realizowane jest to poprzez wyznaczenie kierunków (namiarów) na źródło promieniowania elektromagnetycznego. Wymaga to jednak stosowania rozbudowanych systemów antenowych w odbiorczych urządzeniach

namierzających, co w znacznym stopniu utrudnia praktyczne wykorzystanie tego sposobu lokalizacji obiektów promieniujących. Stąd też dąży się do opracowania nowych metod, które przyczynią się do uproszczenia procedur pomiarowych w zakresie lokalizacji źródeł fal radiowych. Jedną z takich możliwości stwarza metoda SDF, bazująca na praktycznym wykorzystaniu skutków efektu Dopplera.

2. Dopplerowska metoda lokalizacji przestrzennej

Zaprezentowany w [1] i [4] analityczny opis efektu Dopplera stał się podstawą opracowania nowej metody lokalizacji [2], nazywanej metodą SDF (*Signal Doppler Frequency*) lub dopplerowską metodą lokalizacji [3]. Metoda ta bazuje na zależności opisującej częstotliwość Dopplera w funkcji trajektorii ruchu odbiornika względem źródła sygnału radiowego ([1], [4]):

$$f_D(\mathbf{x}, t) = f(\mathbf{x}, t) - f_0 = \frac{k}{1 - k^2} \left(k + \frac{x - vt}{\sqrt{(x - vt)^2 + (1 - k^2)(y^2 + z^2)}} \right) f_0, \quad (1)$$

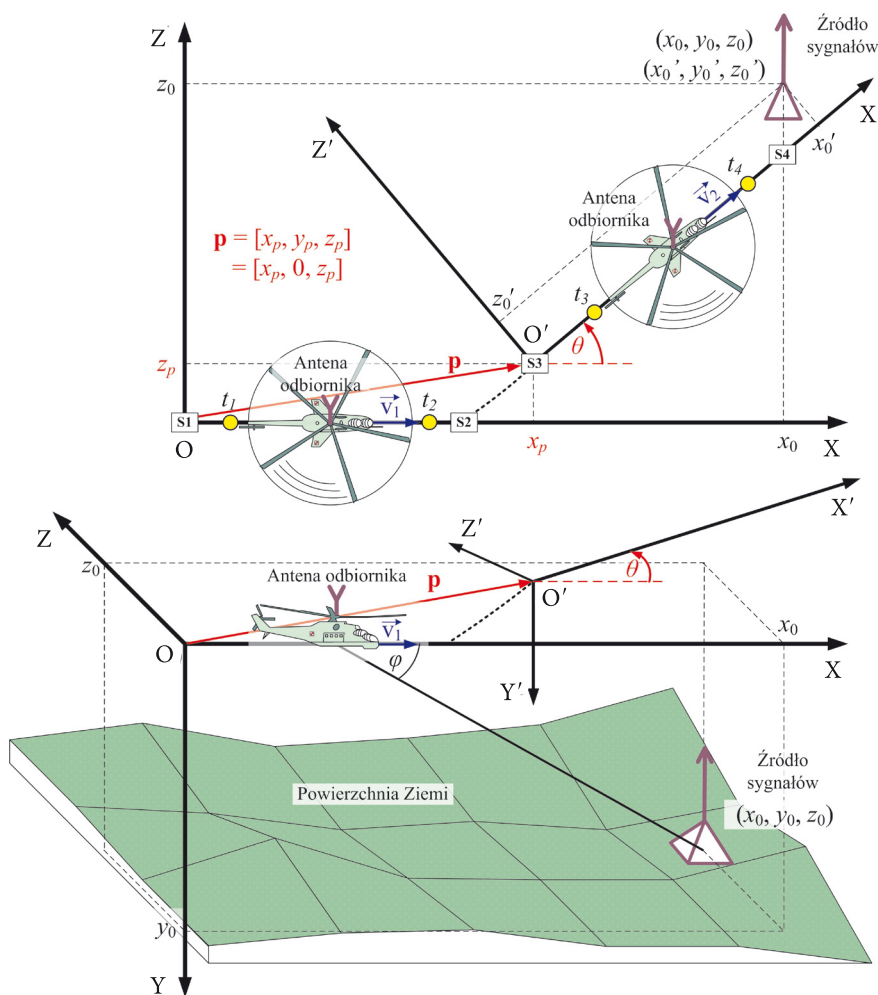
gdzie: f_0 — częstotliwość nadawanego sygnału;
 $f(\mathbf{x}, t)$ — częstotliwość odbieranego sygnału;
 $\mathbf{x} = (x, y, z)$ — współrzędne położenia źródła sygnału w przyjętym układzie odniesienia;
 t — czas; v — prędkość odbiornika;
 c — prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku, $k = v/c$.

W oparciu o zależność (1) stwierdzono, że krzywe Dopplera (przebiegi dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości w funkcji czasu lub przebytej drogi) mają charakter dystynktywny dla konkretnego usytuowania nadajnika względem trajektorii ruchu odbiornika sygnału. Można zatem powiedzieć, że na podstawie przebiegu częstotliwości chwilowej (a tym samym częstotliwości Dopplera) odbieranego sygnału można określić położenie źródła sygnału radiowego, co stanowi istotę prezentowanej metody. Dystynktywny charakter krzywych dopplerowskich dla różnych położenia źródła względem tej samej trajektorii ruchu odbiornika zaprezentowano m.in. w pracach [3], [4] i [7], natomiast w pracy [1] pokazano graficznie wpływ prędkości oraz poszczególnych współrzędnych na kształty krzywych Dopplera.

W pracach [3]-[9] przedstawiono uproszczoną wersję metody dopplerowskiej, umożliwiającą lokalizację źródła fal radiowych na płaszczyźnie, czyli określenie dwóch jego współrzędnych położenia. W przypadku metody SDF, odpowiednia zmiana kierunku trajektorii ruchu odbiornika jest wystarczająca ([2], [3]), aby można

było dokonać lokalizacji przestrzennej (3D), czyli określić trzy współrzędne (x, y, z) położenia źródła sygnału radiowego. Wówczas niezbędny jest pomiar częstotliwości Dopplera f_D minimum w czterech chwilach ([2], [3]), przy czym zmierzone (parami) wielkości muszą różnić się między sobą przynajmniej o dokładność, z jaką możliwe jest dokonanie pomiaru częstotliwości sygnału.

W celu wyprowadzenia zależności na współrzędne położenia źródła sygnału, rozpatrzono sytuację jak na rysunku 1 ([2], [3]). Punkty O i O' są początkami lokalnych układów współrzędnych $OXYZ$ oraz $O'X'Y'Z'$ (po zmianie kierunku ruchu), w których odbiornik posiada już ustalone prędkości v_1 i v_2 , a względem których wyznaczane są współrzędne położenia lokalizowanego źródła fal radiowych.



Rys. 1. Zasada realizacji procedury lokalizacji źródeł emisji radiowych metodą SDF

Założmy, że odbiornik, umieszczony na śmigłowcu, przemieszcza się ze stałą prędkością v_1 wzdłuż osi OX na odcinku od punktu S1 do S2 oraz po zmianie kierunku lotu ze stałą prędkością v_2 wzdłuż osi O'X' na odcinku od S3 do S4. Na analizowanych odcinkach trasy dokonywany jest pomiar częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału, minimum w czterech chwilach ([2], [3]): t_1 i t_2 (na odcinku S1→S2) oraz t_3 i t_4 (S3→S4), jak na rysunku 1. Na podstawie pomiaru częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału w chwilach czasu t_1 - t_4 , wyznaczane są odpowiadające im wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości. Dokonując elementarnych przekształceń wyrażenia (1), można otrzymać zależności opisujące współrzędne x , y , z położenia źródła sygnału ([2], [3]). Zależności dla przypadku dwuwymiarowej lokalizacji nadajnika na płaszczyźnie przedstawiono w pracach [2]-[9].

Na podstawie dwóch wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości $f_D(t_1)$ i $f_D(t_2)$ uzyskanych na trasie od punktu S1 do S2 wyznaczona zostaje współrzędna x opisana wzorem ([2], [3]):

$$x = v_1 \frac{t_1 A_1(t_1) - t_2 A_1(t_2)}{A_1(t_1) - A_1(t_2)}, \quad (2)$$

gdzie:

$$A_1(t) = \frac{\sqrt{1 - F_1^2(t)}}{F_1(t)}, \quad F_1(t) = \frac{f_D(t)}{f_0} \cdot \frac{1 - k_1^2}{k_1} - k_1, \quad k_1 = \frac{v_1}{c}. \quad (3)$$

W punkcie S2 następuje zmiana kierunku ruchu. Nowy układ współrzędnych O'X'Y'Z' (rys. 1) jest przesunięty o wektor $\mathbf{p} = [x_p, y_p, z_p]$ oraz obrocony o kąt θ (w płaszczyźnie OXZ) względem początku układu OXYZ. W celu uproszczenia analizy założono, że po zmianie kierunku, ruch nadal odbywa się w tej samej płaszczyźnie OXZ, czyli $y_p = 0$. Należy podkreślić, że w omawianych wyprowadzeniach wartość y_p nie wpływa na końcową postać wzorów, ze względu na przyjętą kolejność wyznaczania współrzędnych.

Na odcinku od punktu S3 do S4 uzyskuje się kolejne dwie wartości częstotliwości Dopplera $f_D(t_3)$ i $f_D(t_4)$, na podstawie których w układzie O'X'Y'Z' zostaje wyznaczana analogicznie współrzędna źródła sygnału wzdłuż kierunku ruchu ([2], [3]):

$$x' = v_2 \frac{t_3 A_2(t_3) - t_4 A_2(t_4)}{A_2(t_3) - A_2(t_4)}, \quad (4)$$

gdzie:

$$A_2(t) = \frac{\sqrt{1 - F_2^2(t)}}{F_2(t)}, \quad F_2(t) = \frac{f_D(t)}{f_0} \cdot \frac{1 - k_2^2}{k_2} - k_2, \quad k_2 = \frac{v_2}{c}. \quad (5)$$

W przypadku gdy $v_1 = v_2$, zależności (3) i (5) pokryją się i wówczas nie jest wymagane dodatkowe oznaczanie indeksem wielkości $A(t)$, $F(t)$ oraz k .

W wyniku zmiany kierunku ruchu, na podstawie zależności (2) i (4), przy uwzględnieniu transformacji pomiędzy układami współrzędnych, można wyznaczyć zależności na współrzędne z i y . Położenie źródła sygnału w układzie współrzędnych OXYZ można zatem opisać następującymi zależnościami ([2], [3]):

$$\left\{ \begin{array}{l} x = v_1 \frac{t_1 A_1(t_1) - t_2 A_1(t_2)}{A_1(t_1) - A_1(t_2)}, \\ z = z_p + \frac{x' + (x_p - x) \cos \theta}{\sin \theta} = z_p + \frac{1}{\sin \theta} \left[v_2 \frac{t_3 A_2(t_3) - t_4 A_2(t_4)}{A_2(t_3) - A_2(t_4)} + (x_p - x) \cos \theta \right], \\ y = \sqrt{\frac{1}{(1 - k_1^2)} \left[\frac{v_1 (t_1 - t_2) A_1(t_1) A_1(t_2)}{A_1(t_1) - A_1(t_2)} \right]^2 - z^2}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Końcowe wartości współrzędnych z i y położenia źródła zależą tylko od współrzędnej x_p oraz z_p wektora przesunięcia \mathbf{p} układów współrzędnych. Jak wspomniano powyżej, wynika to z przedstawionej kolejności wyznaczania współrzędnych.

Dla małych prędkości ($v_1 \ll c \Rightarrow k_1 \rightarrow 0$ oraz $v_2 \ll c \Rightarrow k_2 \rightarrow 0$) zależności na współrzędne upraszczają się do postaci ([2], [3]):

$$\left\{ \begin{array}{l} x = v_1 \frac{t_1 B_1(t_1) - t_2 B_1(t_2)}{B_1(t_1) - B_1(t_2)}, \\ z = \frac{1}{\sin \theta} \left[v_2 \frac{t_3 B_2(t_3) - t_4 B_2(t_4)}{B_2(t_3) - B_2(t_4)} + (x_p - x) \cos \theta \right], \\ y = \sqrt{\left[\frac{v_1 (t_1 - t_2) B_1(t_1) B_1(t_2)}{B_1(t_1) - B_1(t_2)} \right]^2 - z^2}, \end{array} \right. \quad (7)$$

gdzie:

$$B_1(t) = \lim_{k_1 \rightarrow 0} A_1(t) = \frac{\sqrt{1 - H_1^2(t)}}{H_1(t)}, \quad H_1(t) = \lim_{k_1 \rightarrow 0} F_1(t) = \frac{f_D(t)}{f_0 k_1}. \quad (8)$$

$$B_2(t) = \lim_{k_2 \rightarrow 0} A_2(t) = \frac{\sqrt{1 - H_2^2(t)}}{H_2(t)}, \quad H_2(t) = \lim_{k_2 \rightarrow 0} F_2(t) = \frac{f_D(t)}{f_0 k_2}. \quad (9)$$

Szczególny przypadek, wykorzystany podczas praktycznej realizacji pomiarów, występuje gdy $\theta = 90^\circ$. Wówczas zależność na współrzędną z upraszcza się do postaci ([2], [3]):

$$z = z_p + x' = z_p + v_2 \frac{t_3 A_2(t_3) - t_4 A_2(t_4)}{A_2(t_3) - A_2(t_4)} \xrightarrow{k_2 \rightarrow 0} z_p + v_2 \frac{t_3 B_2(t_3) - t_4 B_2(t_4)}{B_2(t_3) - B_2(t_4)}. \quad (10)$$

W tym przypadku również wartość współrzędnej x_p wektora przesunięcia \mathbf{p} nie ma wpływu na postać wyznaczanych współrzędnych położenia źródła sygnału radiowego.

W dalszej części pracy, do oceny dokładności metody lokalizacji, posłużono się miarą ΔR , zwaną błędem lokalizacji, zdefiniowaną wzorem [3]:

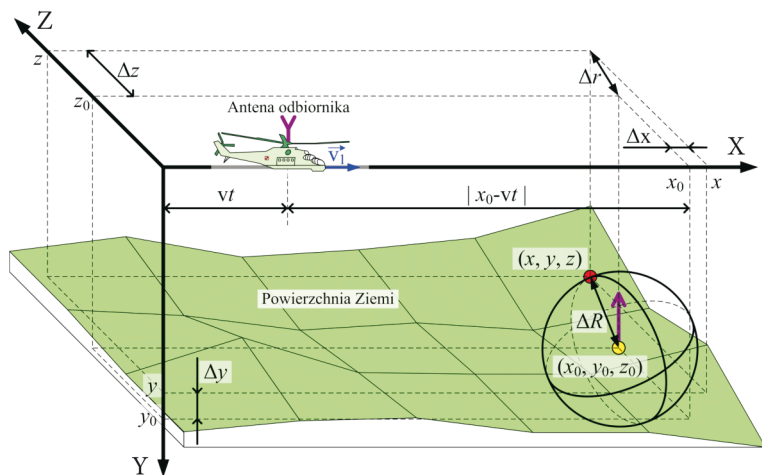
$$\begin{aligned} \Delta R &= \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} = \\ &= \sqrt{(\Delta r)^2 + (\Delta y)^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

gdzie: (x_0, y_0, z_0) — rzeczywiste współrzędne położenia źródła sygnału,
 (x, y, z) — współrzędne położenia źródła wyznaczone za pomocą metody SDF przy wykorzystaniu wzorów (6) lub (7),
 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — błędy wyznaczenia poszczególnych współrzędnych,
 Δr — błąd lokalizacji źródła na płaszczyźnie OXZ.

Dla przypadku lokalizacji na płaszczyźnie wzór (11) upraszcza się do postaci:

$$\Delta R \rightarrow \Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta z)^2}, \quad (12)$$

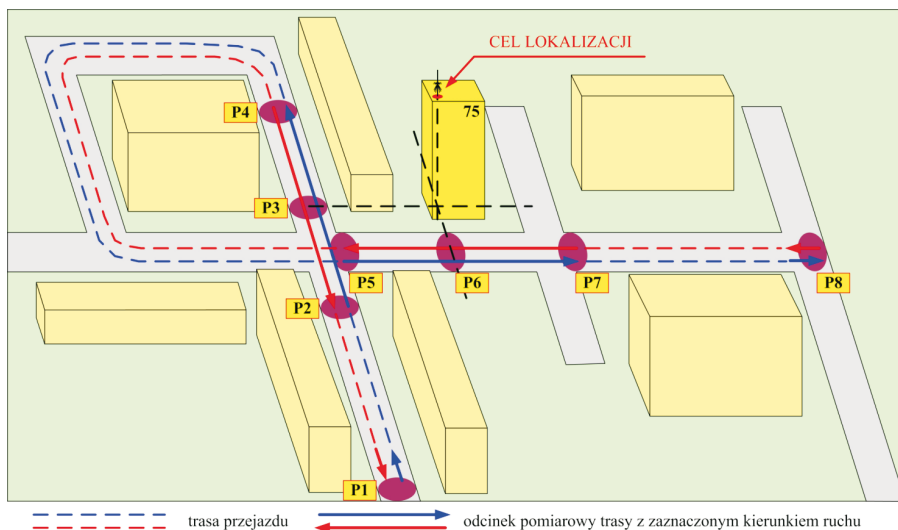
gdyż zakłada się znajomość wartości współrzędnej $y = y_0 = \text{const}$. W [7] i [8] przedstawiono interpretację geometryczną miary (12), jako promienia Δr okręgu, w obrębie którego znajduje się lokalizowany nadajnik sygnału radiowego. Poprzez analogię, można wprowadzić interpretację geometryczną analizowanej miary (11) dla przypadku lokalizacji przestrzennej, jako promień ΔR kuli, w obszarze której znajduje się lokalizowane źródło sygnału. Interpretację tę przedstawiono na rysunku 2 [3].



Rys. 2. Interpretacja geometryczna miary błędu ΔR lokalizacji źródła sygnału radiowego

3. Lokalizacja 3D w rzeczywistym środowisku radiowym

Weryfikację empiryczną dopplerowskiej metody lokalizacji przeprowadzono na terenie uczelni — Wojskowej Akademii Technicznej. W tym celu dobrano odpowiednie usytuowanie odcinków trasy pomiarowej (rys. 3) oraz zestawiono mobilne stanowisko badawcze ([6], [8]).

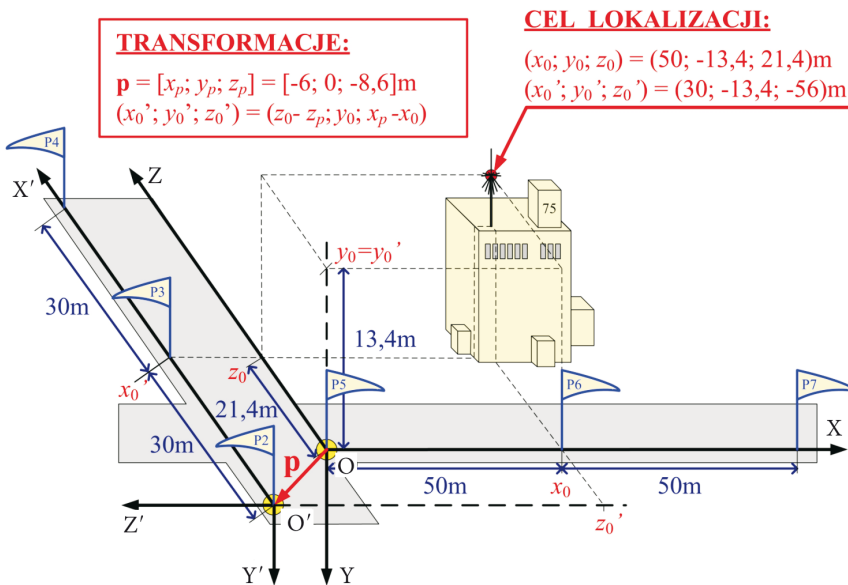


Rys. 3. Przebieg trasy przejazdu z zaznaczonymi odcinkami pomiarowymi

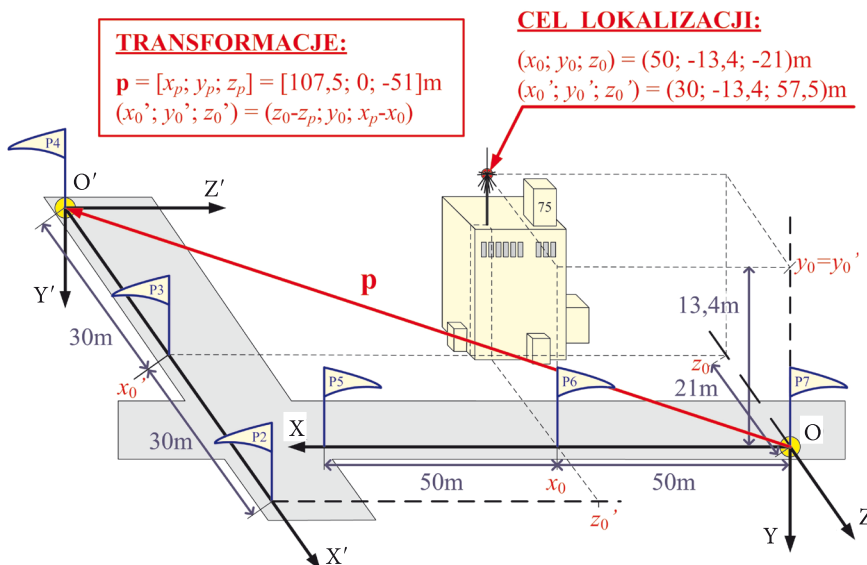
Za źródło sygnału harmonicznego o częstotliwości 900 MHz posłużył generator *Hammeg HM81384-3*. Generator wraz z wzmacniaczem *Amplifier Research 5S1G4M4* znajdował się w budynku 75 (rys. 3), na dachu którego umieszczono antenę *Diamond Super Discone Antenna D130*. Współrzędne położenia punktu zasilania anteny przyjęto jako miejsce lokalizacji źródła sygnału (rys. 4, 5). Pomiarów wykonano przy pomocy mobilnego stanowiska pomiarowego, które zostało opisane w [3], [6].

Trasa pomiarowa, przedstawiona na rysunku 3, została wybrana tak, aby można było dokonywać zmiany kierunku przemieszczania stanowiska pomiarowego do lokalizacji względem źródła sygnału. Dla ułatwienia wykonywania pomiarów, dwa odcinki pomiarowe zostały usytuowane prostopadłe względem siebie ($\theta = 90^\circ$). Procedurę lokalizacji wykonywano na podstawie wyników pomiarów zrealizowanych w trakcie przejazdu w dwóch przeciwnych kierunkach (rys. 3) na każdym odcinku pomiarowym (rys. 4, 5). Taka sytuacja wymagała przeorientowania układów współrzędnych. Usytuowanie układów współrzędnych względem lokalizowanego źródła, dla dwóch wariantów przejazdu po trasie pomiarowej, przedstawiono na rysunkach 4 (dla kierunku od punktu P1 do punktu P8) i 5 (od P8 do P1). Na każdym z nich zaznaczono współrzędne położenia źródła względem początków układów współrzędnych OXYZ oraz O'X'Y'Z'.

Na trasie pomiarowej (rys. 3) zostały zaznaczone charakterystyczne punkty P1-P8. Zasadnicze pomiary częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału



Rys. 4. Zwymiarowanie odcinków pomiarowych dla kierunku przejazdu od punktu P1 do P8



Rys. 5. Zwymiarowanie odcinków pomiarowych dla kierunku przejazdu od punktu P8 do P1

wykonywano na odcinkach pomiarowych między punktami P2 i P4 oraz P5 i P7. Wybrane odcinki pomiarowe spełniały dwa warunki. Po pierwsze w trakcie przejazdu na całym odcinku pomiarowym występowała bezpośrednia widoczność pomiędzy anteną odbiornika i anteną źródła sygnału. Po drugie odcinki zostały dobrane tak, aby normalne do trasy pomiarowej przechodzące przez punkt, w którym znajdowało się lokalizowane źródło sygnału, w punktach P3 i P6 dzieliły odcinki pomiarowe na dwie połowy (rys. 4, 5). Dzięki temu uzyskano symetryczne zmiany częstotliwości Dopplera na analizowanych odcinkach pomiarowych. Z punktu widzenia metody SDF nie jest wymagana symetryczność przebytej drogi względem źródła sygnału. Nie jest również wymagane zerowanie się częstotliwości Dopplera na odcinku pomiarowym, co pokazano w artykule [9].

Rzeczywiste położenie źródła sygnału względem początków przyjętych układów współrzędnych oraz odległości między punktami charakterystycznymi odcinków pomiarowych (podane na rysunkach 4 i 5) zostało wyznaczone za pomocą dalmierza laserowego. Zmierzone wartości współrzędnych położenia źródła sygnału: (x_0, y_0, z_0) oraz (x'_0, y'_0, z'_0) stanowiły punkt odniesienia dla wyznaczania wartości błędów lokalizacji. Realizacja pomiarów na dokładnie oznaczonej i zwymiarowanej trasie nie wymagała określania kierunku przemieszczania się stanowiska pomiarowego, co w ogólnym przypadku stanowi wymóg metody SDF.

4. Wyniki pomiarów

W trakcie przejazdu stanowiska pomiarowego wzdłuż wyznaczonych odcinków tras wykonywano pomiar częstotliwości chwilowej $f(t)$ odbieranego sygnału oraz pomiar czasu t , na podstawie którego pośrednio wyznaczano prędkość pojazdu (pomiaru wykonano dla $v_1 \equiv v_2 \equiv 10$ m/s). Każdorazowo przed przystąpieniem do pomiarów w ruchu dokonywano pomiaru częstotliwości źródła sygnału w punkcie P1 (lub P8 — dla przeciwnego kierunku przejazdu). Na podstawie 100 zmierzonych wartości chwilowych odbieranego sygnału wyznaczano średnią wartość częstotliwości f_0 sygnału nadawanego przez źródło. Wartość dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości $f_D(t)$ uzyskano jako różnicę wartości chwilowych częstotliwości $f(t)$ odbieranego sygnału i wartości średniej f_0 : $f_D(t) = f(t) - f_0$.

Pomiary na odcinkach pomiarowych między punktami P2 i P4 oraz P5 i P7 były niezależne. Przemierzając się na odcinku wyznaczonym przez punkty P2 i P4, wykonano trzykrotnie pomiar częstotliwości dla każdego kierunku przejazdu, natomiast dla odcinka wyznaczonego przez punkty P5 i P7 — dziesięciokrotnie dla każdego kierunku przejazdu. Na podstawie pomiarów na odcinkach pomiarowych P5→P7 zrealizowano algorytm lokalizacji 2D, którego wyniki zaprezentowano w pracach [2], [6] i [9]. Przykładowy przebieg wyników pomiarów, obejmujący cały cykl rejestracji zmian częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału na odcinku trasy z uwzględnieniem rozpędzania i wyhamowywania ruchu samochodu, przedstawiono m.in. w pracach [2], [6] i [9]. Podstawę do wyznaczenia współrzędnych zlokalizowanego źródła sygnału stanowiły wyniki pomiarowe, uzyskane przy przejeździe stanowiska pomiarowego z ustaloną prędkością na odcinkach wyznaczonych przez punkty odpowiednio P2 i P4 oraz P5 i P7. Dzięki odpowiednio zaplanowanym przebiegom tras pomiarowych uzyskano, na wybranych odcinkach, minimalizację zakłóceń pomiaru częstotliwości. Jak wynika z rysunku 3, szczególnie w otoczeniu odcinka pomiarowego P5→P7, ograniczona jest możliwość wystąpienia zjawiska odbicia sygnału, które w znacznym stopniu pogarsza dokładność lokalizacji. Fakt ten pokazuje porównanie wartości parametrów i przebiegu statystyk miar Δr i ΔR przedstawione w tabeli 1 i na rysunku 6.

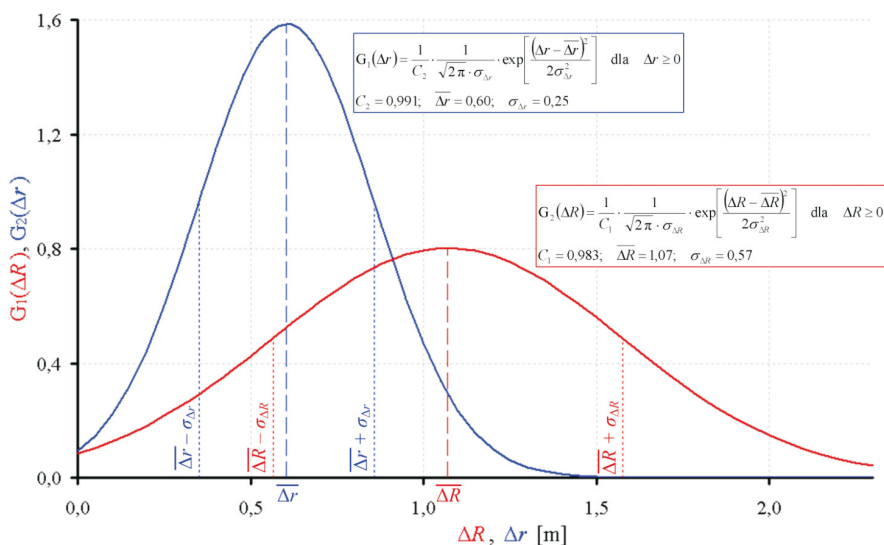
TABELA 1

Wartości miar błędów współrzędnych położenia oraz lokalizacji źródła sygnału radiowego

Miara błędu lokalizacji	Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]	Δr [m]	ΔR [m]
Wartość najmniejsza	0,0	0,0	0,1	0,10	0,14
Wartość największa	1,0	2,1	0,7	1,12	2,32
Wartość średnia	0,38	0,81	0,40	0,60	1,07
Odchylenie standardowe	0,30	0,57	0,22	0,25	0,51
Liczba uśrednianych wyników	20	60	6	60	60

Podstawę wyznaczenia wartości miar Δr i ΔR stanowiły zależności (11) i (12). Uzyskane rezultaty zestawiono w tabeli 1, przedstawiając w niej wartości ekstremalne, średnie oraz odchylenia standardowe błędów Δx , Δy , Δz współrzędnych położenia źródła oraz błędu lokalizacji na płaszczyźnie Δr i w przestrzeni ΔR .

Uwzględniając charakter otrzymanych rezultatów, postawiono hipotezę, że miary te można uważać za zmienne losowe opisane rozkładami normalnymi dla wartości nieujemnych. Weryfikację hipotez przeprowadzono w oparciu o test $\chi^2_{n;\alpha}$ [10], gdzie: $n = K - 3 = 3$ — liczba stopni swobody, $K = 6$ — liczba przedziałów, na które została podzielona seria pomiarowa, $\alpha = 1 - \beta$ — poziom istotności, β — poziom ufności.



Rys. 6. Teoretyczne rozkłady gęstości prawdopodobieństwa miar ΔR i Δr

Dla miary ΔR dokonano weryfikacji hipotezy o rozkładzie normalnym, którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa $G_1(\Delta R)$, przedstawiona na rysunku 6, opisana jest zależnością:

$$G_1(\Delta R) = \frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\Delta R}} \cdot \exp\left[-\frac{(\Delta R - \overline{\Delta R})^2}{2\sigma_{\Delta R}^2}\right] \quad \text{dla } \Delta R \geq 0, \quad (13)$$

gdzie: $C_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\Delta R}} \cdot \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(\xi - \overline{\Delta R})^2}{2\sigma_{\Delta R}^2}\right] \cdot d\xi = 0,983$ — współczynnik normalizujący rozkład;

$\overline{\Delta R}, \sigma_{\Delta R}$ — wartości (zawarte w tabeli 1) uzyskane na podstawie danych pomiarowych: $\overline{\Delta R} = 1,07$ m — wartość średnia rozkładu, $\sigma_{\Delta R} = 0,51$ m — odchylenie standardowe rozkładu.

Uwzględniając uzyskany wynik obliczeń ($\chi_1^2 = 2,5$), można stwierdzić prawdziwość hipotezy o rozkładzie normalnym miary ΔR na poziomie istotności $\alpha_1 = 5,8\%$ (poziomu ufności $\beta_1 = 94,2\%$).

Podobną analizę przeprowadzono dla miary Δr — dokonano weryfikacji hipotezy o rozkładzie normalnym, którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa $G_2(\Delta r)$, przedstawiona na rysunku 6, opisana jest wzorem:

$$G_2(\Delta r) = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\Delta r}} \cdot \exp\left[-\frac{(\Delta r - \overline{\Delta r})^2}{2\sigma_{\Delta r}^2}\right] \quad \text{dla } \Delta r \geq 0, \quad (14)$$

gdzie: $C_2 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\Delta r}} \cdot \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(\xi - \overline{\Delta r})^2}{2\sigma_{\Delta r}^2}\right] \cdot d\xi = 0,991$ — współczynnik

normalizujący rozkład;

$\overline{\Delta r}, \sigma_{\Delta r}$ — wartości (zawarte w tabeli 1) uzyskane na podstawie danych pomiarowych: $\overline{\Delta r} = 0,60$ m — wartość średnia rozkładu, $\sigma_{\Delta r} = 0,25$ m — odchylenie standardowe rozkładu.

Uwzględniając uzyskany z obliczeń wynik ($\chi_2^2 = 1,75$), można stwierdzić, że dla miary Δr prawdziwa jest hipoteza o rozkładzie normalnym na poziomie istotności $\alpha_2 \cong 15\%$ (poziomu ufności $\beta_2 \cong 85\%$).

5. Podsumowanie

Prezentowana w artykule problematyka dotyczy oceny możliwości lokalizacji źródeł fal radiowych na podstawie przebiegu krzywych dopplerowskich. Przedstawiony materiał obejmuje całościowy zakres zagadnień związanych z analizą opracowanej metody. Punktem wyjścia jest postać rozwiązania równania falowego, opisująca zjawisko propagacji fali elektromagnetycznej, w którym uwzględniono ciągłą zmianę w czasie wzajemnego położenia źródła i odbiornika sygnału. Analityczny opis zjawiska propagacji uwzględniający ruch obiektów stanowi podstawę wyznaczenia zależności opisujących współrzędne położenia źródła, sygnału co jest istotą opracowanej metodyki lokalizacji.

W celu oceny możliwości praktycznego wykorzystania wyników analizy teoretycznej opracowano stanowisko i metodykę pomiarową oraz wyznaczono trasę praktycznej realizacji pomiarów. Dane uzyskane w wyniku przeprowadzenia kilkunastu cykli pomiarowych pokazują praktyczny charakter opracowanej metody.

Z zależności analitycznych opisujących współrzędne położenia lokalizowanych obiektów wynikają podstawowe uwarunkowania związane z praktycznym wykorzystaniem metody. Uwarunkowania te dotyczą zbioru danych wejściowych, które w tym przypadku stanowią: współrzędne położenia początków tras pomiarowych (punkty O i O') oraz kierunek i prędkość przemieszczania się stanowiska pomiarowego. Celem przeprowadzonych badań było określenie dokładności i praktycznych uwarunkowań wykorzystania opracowanej metody. Oceny dokładności metody dokonano w odniesieniu do położenia źródła sygnału względem punktów O i O', zaś kierunki przemieszczania stanowiska pomiarowego wynikały z zaplanowanej trasy przejazdu. Wartość prędkości wyznaczono metodą pośrednią, tj. poprzez pomiar czasu przejazdu stanowiska pomiarowego na odcinkach trasy wyznaczonych przez punkty P5 i P7 oraz P2 i P4.

Uzyskany w wyniku pomiarów średni błąd lokalizacji wyniósł $\overline{\Delta R} = 1,07$ m. Porównanie tego wyniku z wymiarem liniowej anteny nadawczej ($h_r = 1,7$ m) dowodzi możliwości praktycznego wykorzystania opracowanej metody i stanowi podstawę do prowadzenia dalszych prac nad jej modyfikacją. Dotyczy to w szczególności wykorzystania systemu GPS do zapewnienia pełnej autonomii względem tras pomiarowych. W zakresie prowadzenia dalszych prac badawczych stworzy to możliwość wykonania pomiarów na dużych odległościach pomiędzy źródłem sygnału a przemieszczającym się stanowiskiem pomiarowym. W zrealizowanej i zaprezentowanej w artykule metodyce pomiarowej, jako źródło sygnału wykorzystano generator sygnału harmonicznego. Dalszy kierunek prac związany jest zatem z uniezależnieniem metodyki lokalizacyjnej od struktury czasowo-częstotliwościowej sygnału generowanego przez lokalizowane źródło. W tym celu przewiduje się wykorzystanie pętli automatycznej regulacji częstotliwości ARC (AFC, *Automatic Frequency Control*) do pomiaru zmian częstotliwości odbieranego sygnału wynikających z ruchu stanowiska pomiarowego.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako Projekt Badawczy Promotorski MNiSW nr N N517 394334 oraz w latach 2010-2011 jako Projekt Badawczy Własny MNiSW nr N N517 394138.

Artykuł wpłynął do redakcji 29.10.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2010 r.

LITERATURA

- [1] J. RAFA, C. ZIÓLKOWSKI, *Influence of transmitter motion on received signal parameter — Analysis of the Doppler effect*, Wave Motion, 45, 3, January 2008, 178-190.
- [2] C. ZIÓLKOWSKI, J. RAFA, J. M. KELNER, *Sposób namiaru i lokalizacji źródeł przestrzennych fal radiowych z wykorzystaniem efektu Dopplera*, zgłoszenie patentowe nr P381154, Warszawa, 27 listopada 2006; Biuletyn Urzędu Patentowego, 36, 12(899), 9 czerwca 2008, 24.
- [3] J. M. KELNER, *Analiza dopplerowskiej metody lokalizacji źródeł emisji fal radiowych*, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Warszawa, 2010.
- [4] C. ZIÓLKOWSKI, J. RAFA, J. M. KELNER, *Lokalizacja źródeł fal radiowych na podstawie sygnałów odbieranych przez ruchomy odbiornik pomiarowy*, Biul. WAT, Nowe Technologie w Telekomunikacji, 55, nr specjalny, 2006, 67-82.
- [5] C. ZIÓLKOWSKI, J. RAFA, J. M. KELNER, *Przestrzenno-częstotliwościowe uwarunkowania lokalizacji źródeł fal radiowych wykorzystującej efekt Dopplera*, Biul. WAT, 56, 3, 2007, 7-20.
- [6] C. ZIÓLKOWSKI, J. M. KELNER, L. KACHEL, *Ocena dokładności dopplerowskiej metody lokalizacji źródeł emisji radiowych*, Biul. WAT, 58, 3, 2009, 303-317.
- [7] P. GAJEWSKI, C. ZIÓLKOWSKI, J. M. KELNER, *Subscriber location in radio communication nets*, Journal of Telecommunications and Information Technology, 2, 2008, 88-92.
- [8] J. M. KELNER, C. ZIÓLKOWSKI, L. KACHEL, *The empirical verification of the location method based on the Doppler effect*, in Proceedings 17th International Conference on: *Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON'2008*, 3, Wrocław, 19-21 May 2008, 755-758.
- [9] J. M. KELNER, C. ZIÓLKOWSKI, *Using the Doppler methodology for object location estimation in lifeboat service*, 6th International Conference on: *Perspectives and Development of Rescue, Safety and Defence Systems in the 21st Century RSDS'2008*, Gdańsk, 25-26 June 2008; Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, 49, K/2(172), 2008, 93-103.
- [10] J. S. BENDAT, A. G. PIERSOL, *Random data: Analysis and measurement procedures*, 3rd Edition, John Wiley & Sons.

P. GAJEWSKI, C. ZIÓLKOWSKI, J. M. KELNER

Space Doppler location method of radio signal sources

Abstract. This paper presents a location method of radio emission source, which is called Signal Doppler Frequency (SDF) or Doppler location method. The method is based on applied Doppler effect, including especially functional dependence defining variations of actual values of the received signal frequency as a function of coordinates' changes for the measuring point in relation to the source being located. The article shows a holistic scope of issues concerning theoretical analysis, performance of measurements in practice and analysis results. The empirical research covered description of test-band's structure, route, and methods used to perform measurements. Initial evaluation of method's accuracy and determinants of its practical application were specified according to the measurement data. Results of comparative analysis prove that the elaborated SDF method can be considered as perspective one and they show how different it is from the methods of radio waves location used up till the present moment.

Keywords: mobile communication, Doppler effect, 3D/2D location method of radio emission sources, Doppler location method, SDF location method, Signal Doppler Frequency