



Lokalizacja źródeł fal radiowych na podstawie sygnałów odbieranych przez ruchomy odbiornik pomiarowy¹

CEZARY ZIÓŁKOWSKI, JÓZEF RAFA*, JAN M. KELNER

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
Zakład Radiokomunikacji

*Wydział Cybernetyki, Instytut Matematyki i Kryptologii,
Zakład Analizy Matematycznej i Matematyki Stosowanej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule przedstawiono oryginalną metodykę wyznaczania współrzędnych położenia źródeł promieniowania fal elektromagnetycznych, wykorzystującą pomiar częstotliwości chwilowej sygnału odbieranego przez poruszający się odbiornik. Podstawę opracowanej metodyki stanowi zależność analityczna opisująca wartość dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości jako funkcja parametrów ruchu, parametrów generowanego sygnału oraz współrzędnych uwarunkowanych wzajemnym położeniem źródła i odbiornika sygnału. Przedstawiona analiza umożliwia ocenę wpływu różnych parametrów na zasięg prowadzenia lokalizacji źródeł fal radiowych funkcjonujących w systemach radiokomunikacyjnych i radiotechnicznych, wykorzystujących emisje sygnałów o stałej częstotliwości nośnej.

Słowa kluczowe: radiokomunikacja ruchoma, efekt Dopplera, lokalizacja źródeł fal radiowych

Symbole UKD: 621.396.9

1. Wprowadzenie

Lokalizacja źródeł sygnałów radiowych jest jednym z kierunków poszerzania zakresu usług telekomunikacyjnych realizowanych w sieciach radiokomunikacyjnych. Główne obszary jej wykorzystania to przede wszystkim radionawigacja, nadzór i kontrola nad wykorzystaniem zasobów fal radiowych, lokalizacja użytkowników sieci radiokomunikacyjnych, rozpoznanie radioelektroniczne w zastosowaniach militarnych oraz bezpieczeństwa wewnętrznego.

¹ Prezentowana metodyka objęta jest ochroną patentową.

W praktyce do określania położenia źródeł sygnałów radiowych znajduje zastosowanie pięć przedstawionych poniżej metod ([1-3]).

1. Metoda COO (*Cell of Origin*) polega na identyfikacji stacji dostępowej realizującej obsługę danego źródła sygnału radiowego (użytkownika sieci). Dokładność określenia położenia źródła sygnału uwarunkowana jest wielkością obszaru obsługiwanego przez stację dostępową. Stąd, lokalizacja źródła sygnału (użytkownika sieci) jest najdokładniejsza w odniesieniu do pikokomórek.
2. Metoda TOA (*Time of Arrival*) — jej podstawą jest pomiar czasu propagacji pomiędzy źródłem sygnału a stacją dostępową. Metoda ta wymaga stosowania w stacjach dostępowych wzorców czasu o wysokiej dokładności.
3. Metoda EOTD (*Enhanced Observed Time Difference*) wykorzystuje różnice czasów propagacji sygnału generowanego przez źródło do kilku (zwykle trzech) stacji dostępowych. Na podstawie różnic czasów dotarcia sygnału do poszczególnych stacji dostępowych o zadanych współrzędnych położenia wyznaczone jest położenie źródła sygnału.
4. Metoda A-GPS (*Assisted GPS*) — jej stosowanie uwarunkowane jest dodatkowym wyposażeniem źródła sygnału w odbiornik GPS, z którego dane przesyłane są do systemu lokalizacji elementów systemu radiokomunikacyjnego.
5. Metoda AOA (*Angle of Arrival*) bazuje na wykorzystaniu namiaru, tj. kierunku na źródło promieniowania względem układu namierzającego. Namiar wyznaczony jest przy wykorzystaniu jednej z dwóch metod: metody amplitudowej bądź metody amplitudowo-fazowej. Zasadniczą wadą metod AOA jest konieczność stosowania rozbudowanych systemów antenowych.

Każda z powyższych metod lokalizacji źródeł sygnałów ma swoje zasadnicze wady. Wykorzystanie pierwszych czterech metod możliwe jest tylko w przypadku gdy lokalizowane źródło sygnału jest jednym z elementów funkcjonujących w danym systemie radiokomunikacyjnym. W tym przypadku możliwe jest wykorzystanie określonej struktury transmitowanych sygnałów oraz przesyłanie danych niezbędnych do wyznaczenia położenia wybranego elementu systemu radiowego będącego ruchomym źródłem sygnału. Ostatnia z wyżej wymienionych metod może być wykorzystana do wyznaczania położenia źródeł sygnałów funkcjonujących w warunkach pełnej niezależności od systemu realizującego procedury namiaru. Jednakże w tym przypadku, wyznaczanie kierunku na źródło promieniowania elektromagnetycznego wymaga stosowania rozbudowanych systemów antenowych w odbiorczych urządzeniach namierzających.

Wady, którymi obarczone są poszczególne metody określania położenia źródeł sygnałów radiowych w znacznym stopniu utrudniają ich praktyczne wykorzystanie. Stąd też dąży się do opracowania nowych metod, które przyczynią się do uproszczenia procedur pomiarowych w zakresie lokalizacji obiektów promieniujących radiowe fale elektromagnetyczne. Jedną z takich możliwości jest wyznaczenie rozwiązania równania falowego, uwzględniającego ciągłą zmianę wzajemnego położenia źródła

i odbiornika sygnału. Dzięki niemu istnieje możliwość wyznaczania położenia źródeł fal radiowych na podstawie częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału. Stanowi ono jednocześnie podstawę analitycznego opisu efektu Dopplera.

W niniejszym artykule przedstawiono problematykę przestrzennych uwarunkowań związanych z lokalizacją źródeł sygnałów na bazie analitycznego rozwiązania opisującego efekt Dopplera.

2. Wykorzystanie efektu Dopplera w systemach nawigacji i lokalizacji

Skutki efektu Dopplera, opisanego po raz pierwszy w publikacji [4], znajdują szerokie zastosowanie w systemach radionawigacji i lokalizacji źródeł promieniowania fal radiowych. Podstawę algorytmów, na bazie których funkcjonują te systemy, stanowi uproszczona zależność opisująca wartość przesunięcia częstotliwości f_D odbieranego sygnału:

$$f_D = f_0 \frac{v}{c} \cos \gamma, \quad (1)$$

gdzie: v — prędkość zmiany położenia pomiędzy źródłem sygnału a odbiornikiem;
 f_0 — częstotliwość emitowanej fali nośnej;
 c — prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku;
 γ — kąt pomiędzy kierunkiem wektora prędkości a kierunkiem wyznaczonym przez położenie źródła sygnału i odbiornika.

Powyższa zależność znalazła zastosowanie w tzw. radarach dopplerowskich, wykorzystywanych w systemach radionawigacyjnych. Ich przeznaczeniem jest pomiar prędkości przemieszczania się obiektu. W celu wyznaczenia wektora prędkości w radarach dopplerowskich stosuje się trzy wiązki antenowe. Poprzez pomiar dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości odbitej od powierzchni ziemi fali nośnej każdej z wiązek, przy znanym kącie γ padania wiązki względem normalnej do powierzchni ziemi, na podstawie zależności (1) wyznaczone są składowe wektora prędkości poruszającego się obiektu. Charakterystykę i szczegółowy opis różnych rozwiązań technicznych wykorzystywanych w radarach dopplerowskich zawarto w monografii [5].

Efekt Dopplera znajduje szerokie zastosowanie w satelitarnych systemach nawigacyjnych. W tym przypadku wykorzystywana jest znajomość trajektorii lotu każdego satelity. W systemach tych stosuje się różne techniki wykorzystujące efekt Dopplera. Najprostsza, a zarazem najstarsza, metoda polega na wyznaczaniu odległości obiektu od poszczególnych orbit, które w połączeniu ze znanym położeniem satelitów umożliwiają jego lokalizację. W tym przypadku kryterium wystąpienia minimalnej odległości obiekt-orbita jest zerowanie się wartości dopplerowskiego

przesunięcia częstotliwości odbieranego sygnału. Praktyczny przykład zastosowania tej metody stanowi system TRANSIT.

W obecnie eksploatowanych systemach nawigacji satelitarnej położenie obiektu określane jest na podstawie odbioru sygnałów o złożonych strukturach kodowych (np. NAVSTAR GPS). Jednakże dodatkowe wykorzystanie efektu Dopplera w znacznej mierze poprawia zarówno skuteczność, jak i dokładność realizacji procesu nawigacyjnego. W tym przypadku na podstawie dopplerowskiej zmiany częstotliwości określana jest szybkość zmian wzajemnego położenia obiekt-satelita, co stanowi dodatkową informację wykorzystywaną w algorytmach wyznaczania położenia obiektu. Przykłady takich rozwiązań i opis praktycznie funkcjonującego systemu ASHTECH XII GPS zawarto w publikacjach [6] i [7].

Efekt Dopplera, oprócz wykorzystania w systemach nawigacyjnych, znajduje również zastosowanie we współczesnych systemach lokalizacji źródeł sygnałów promieniujących fale radiowe. Przykład metody znajdującej zastosowanie do lokalizacji obiektów w systemach wykorzystujących dostęp kodowy CDMA przedstawia publikacja [8]. Istota proponowanego rozwiązania polega na wyznaczeniu funkcji korelacji wzajemnej sygnału odebranego i sygnału wzorca. Ponieważ funkcja ta zależy od lokalizacji obiektu i znanych parametrów ruchu satelity, przenoszonych do odbieranego sygnału poprzez efekt Dopplera, więc jest ona wykorzystana do wyznaczenia współrzędnych położenia źródła emisji fal radiowych.

Przedstawiona w artykule metoda lokalizacji obiektów na podstawie rozwiązania równania falowego, uwzględniającego ruch funkcji źródłowej, stanowi rozszerzenie zakresu możliwych zastosowań efektu Dopplera.

3. Analityczny opis efektu Dopplera

W wyniku ciągłych zmian położenia pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem fali elektromagnetycznej występują zmiany parametrów odbieranego sygnału. Równanie falowe, które spełnia natężenie pola elektrycznego $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = (0, 0, E)$, przy założeniu liniowego charakteru systemu antenowego ($\mathbf{i} = (0, 0, i)$) oraz stałej prędkości $\mathbf{v} = (v, 0, 0)$ przemieszczania się źródła sygnału wzdłuż kierunku zmiennej x , można przedstawić w postaci [9, 10]:

$$\frac{1}{c^2} \partial_t^2 E(\mathbf{x}, t) - \nabla^2 E(\mathbf{x}, t) = -\mu_0 \partial_z i(z, t) \delta(x - vt) \delta(y), \quad (2)$$

gdzie: $i(z, t)$ — wektor gęstości prądu będącego źródłem pola elektromagnetycznego;

μ_0 — przenikalność magnetyczna ośrodka.

Uwzględniając założenie o stacjonarnym charakterze rozkładu gęstości prądu w antenie mamy $i(z, t) = I(z) \cdot i(t)$, gdzie $I(z)$ to rozkład amplitud gęstości prądu

wzdłuż przewodu anteny, a $i(t)$ to funkcja opisująca charakter zmian gęstości w czasie. W tym przypadku równanie (2) możemy zapisać w postaci:

$$\frac{1}{c^2} \partial_t^2 E(\mathbf{x}, t) - \nabla^2 E(\mathbf{x}, t) = -\mu_0 I(z) \partial_t (i(t) \delta(x - vt)) \delta(y). \quad (3)$$

Rozwiązanie powyższego równania falowego przeprowadzono w dwóch etapach [9, 10]. Pierwszy z nich polegał na wyznaczeniu rozwiązania fundamentalnego równania (3). Postać końcową rozwiązania analizowanego problemu uzyskano poprzez splot rozwiązania fundamentalnego z funkcją źródłową, opisującą rozkład prądu wzdłuż przewodu antenowego.

Postać równania stanowiącego podstawę do wyznaczenia rozwiązania fundamentalnego $E(\mathbf{x}, t)$ jest następująca:

$$\frac{1}{c^2} \partial_t^2 E(\mathbf{x}, t) - \nabla^2 E(\mathbf{x}, t) = \delta(t) \delta(x) \delta(y) \delta(z). \quad (4)$$

Dokonując zamiany zmiennych, analizowane równanie sprowadzono do postaci:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x_0^2} V(\mathbf{x}_0) - 2k \frac{\partial^2}{\partial x_0 \partial x_1} V(\mathbf{x}_0) - (1 - k^2) \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} V(\mathbf{x}_0) - \\ - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} V(\mathbf{x}_0) - \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} V(\mathbf{x}_0) = \delta(x_0) \delta(x_1) \delta(x_2) \delta(x_3), \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie: $x_0 = ct$, $x_1 = x - vt$, $x_2 = y$, $x_3 = z$, $k = v/c$, $\mathbf{x}_0 = (x_0, x_1, x_2, x_3)$.

Korzystając z przekształceń całkowitych Laplace'a i Fouriera oraz dokonując grupowania składników, otrzymano następujące liniowe równanie różniczkowe o stałych współczynnikach:

$$\frac{d^2}{dx_1^2} \widehat{V}(\xi) + \frac{2k}{(1 - k^2)} \xi_0 \frac{d}{dx_1} \widehat{V}(\xi) - \frac{(\xi_0^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2)}{(1 - k^2)} \widehat{V}(\xi) = -\frac{1}{(1 - k^2)} \delta(x_1), \quad (6)$$

gdzie: $\widehat{V}(\xi) = \mathcal{F} \{ \mathcal{L} \{ V(\mathbf{x}_0) \} \}$, a $\xi = (\xi_0, x_1, \xi_2, \xi_3)$ to zmienne przekształcenia Laplace'a i Fouriera.

Przedłużone na ujemny zbiór wartości zmiennej x_1 rozwiązanie powyższego równania wyraża następująca zależność:

$$\widehat{V}(\xi) = \frac{1}{1 - k^2} \cdot \frac{H(x_1) e^{\lambda_1 x_1} + H(-x_1) e^{\lambda_2 x_1}}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (7)$$

gdzie: $H(x)$ — funkcja Heaviside'a;

$\lambda_{1,2}$ — pierwiastki równania charakterystycznego opisane wyrażeniem

$$\lambda_{1,2} = \frac{-k\xi_0 \mp \sqrt{\xi_0^2 + (1-k^2)(\xi_2^2 + \xi_3^2)}}{1-k^2}.$$

Problem wyznaczenia oryginału przekształcenia Fouriera sprowadza się do obliczenia całki podwójnej o następującej postaci:

$$\bar{V}(\xi_0) = F_{\xi}^{-1} \left\{ \widehat{V}(\xi) \right\} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{V}(\xi_0, x_1, \xi_2, \xi_3) e^{-i(\xi_2 x_2 + \xi_3 x_3)} d\xi_2 d\xi_3. \quad (8)$$

Do wyznaczenia analitycznej postaci powyższego wyrażenia wykorzystano metodę Cagniarda-de Hoopa ([11, 12]). Dokonując odpowiedniego podstawienia zmiennych (transformata de Hoopa), a następnie dokonując iteracji i całkując po konturze Cagniarda, wyrażenie (8) przekształcono do postaci:

$$\begin{aligned} \bar{V}(\xi_0) = & \frac{\xi_0}{4\pi^2 R_1(x_1, \mathbf{x}_2)} \int_{\eta_0}^{\infty} e^{-\xi_0 \eta} d\eta \times \\ & \times \int_{-q_0}^{q_0} \frac{dq}{\sqrt{\left(\eta - \frac{k}{1-k^2} x_1\right)^2 - \frac{R_1^2(x_1, \mathbf{x}_2)}{(1-k^2)} \left(q^2 + \frac{1}{1-k^2}\right)}}, \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie: $\eta_0 = [kx_1 - R_1(x_1, \mathbf{x}_2)] / (1-k^2)$ — dolna granica całkowania zmiennej η ;

$q_0 = \sqrt{(1-k^2) \left[\left((1-k^2)\eta - kx_1 \right) / R_1(x_1, \mathbf{x}_2) \right]^2 - 1} / (1-k^2)$ — granice całkowania zmiennej q ;

$$R_1(x_1, \mathbf{x}_2) = \sqrt{x_1^2 + (x_2^2 + x_3^2)(1-k^2)}.$$

Dokonując operacji podwójnego całkowania oraz wykonując retransformatę Laplace'a otrzymano:

$$E(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{4\pi c R_0(\mathbf{x}, t)} \delta\left(t - \frac{\eta_0(\mathbf{x}, t)}{c}\right), \quad (10)$$

gdzie: $R_0(\mathbf{x}, t) = \sqrt{(x-vt)^2 + (1-k^2)(y^2 + z^2)}$, a x, y, z , to współrzędne położenia odbiornika.

Uzyskane rozwiązanie fundamentalne stanowi podstawę do wyznaczenia postaci rozwiązania równania opisującego analizowany problem. Zostało to zrealizowane poprzez wykorzystanie operacji splotu rozwiązania fundamentalnego z funkcją opisującą przestrzenny rozkład prądu w antenie, a mianowicie:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{x}, t) &= -\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) * \mu_0 I(z) \partial_t (i(t) \delta(x-vt)) \delta(y) = \\ &= -\frac{\mu_0}{4\pi c R_0(\mathbf{x}, t)} \delta\left(t - \frac{\eta_0(\mathbf{x}, t)}{c}\right) * I(z) \partial_t (i(t) \delta(x-vt)) \delta(y). \end{aligned} \quad (11)$$

Po założeniu harmonicznego charakteru wymuszenia, przyjęciu systemu antenowego w postaci dipola półfalowego oraz dokonaniu przekształceń analogicznie jak w [13], w przypadku strefy dalekiej otrzymano następującą postać poszukiwanego rozwiązania:

$$E(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi R_0(\mathbf{x}, t)} I_0 \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{R_0(\mathbf{x}, t)}\right)}{1 - \frac{z^2}{R_0^2(\mathbf{x}, t)}} e^{-i\beta_1 kx - i\beta_1 R_0(\mathbf{x}, t) - i\frac{\pi}{2}} e^{-i\omega_1 t}. \quad (12)$$

gdzie: $\omega = 2\pi f_0$ — pulsacja (f_0 — częstotliwość) generowanego sygnału,

$$\omega_1 = \omega / (1 - k^2), \quad \beta = \omega / c, \quad \beta_1 = \beta / (1 - k^2);$$

I_0 — amplituda sygnału wymuszającego.

Stąd, amplituda $E_0(\mathbf{x}, t)$ i kąt fazowy $\Phi(\mathbf{x}, t)$ odbieranego sygnału wyrażą się następującymi zależnościami:

$$E_0(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 c}{2\pi R_0(\mathbf{x}, t)} I_0 \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{R_0(\mathbf{x}, t)}\right)}{1 - \frac{z^2}{R_0^2(\mathbf{x}, t)}}, \quad (13)$$

$$\Phi(\mathbf{x}, t) = \omega_1 t - \beta_1 kx - \beta_1 R_0(\mathbf{x}, t) - \frac{\pi}{2}. \quad (14)$$

Wartość chwilowa częstotliwości $f(\mathbf{x}, t)$ przyjmie zatem postać:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}, t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Phi(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{1 - k^2} f_0 + \\ &+ \frac{k}{1 - k^2} \frac{x - vt}{\sqrt{(x - vt)^2 + (1 - k^2)(y^2 + z^2)}} f_0. \end{aligned} \quad (15)$$

Ostatecznie więc, częstotliwość Dopplera $f_D(\mathbf{x}, t)$ wyraża następująca zależność:

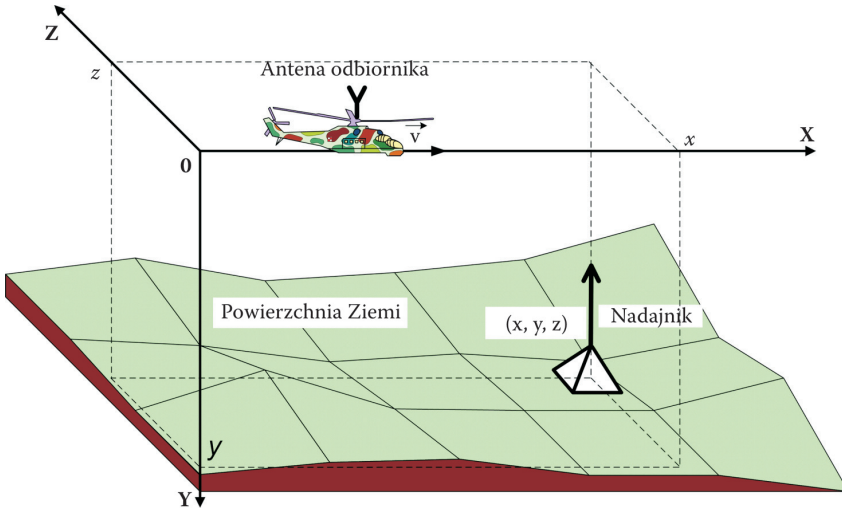
$$f_D(\mathbf{x}, t) = f(\mathbf{x}, t) - f_0 = \frac{k}{1 - k^2} \left(k + \frac{x - vt}{\sqrt{(x - vt)^2 + (1 - k^2)(y^2 + z^2)}} \right) f_0 \quad (16)$$

Analizując powyższe wyrażenie, można stwierdzić, że wartość dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości zależy nie tylko od prędkości ruchu i częstotliwości źródła sygnału, ale również od położenia odbiornika względem trajektorii ruchu nadajnika.

4. Współrzędne położenia źródeł fal radiowych jako funkcje dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości

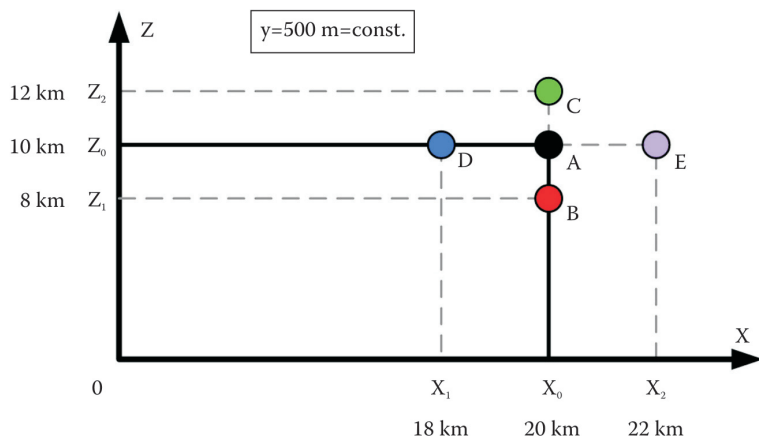
Uwzględniając zasadę wzajemności Lorentza (np. [13, 14]), można stwierdzić, że na podstawie zależności (16) istnieje możliwość wyznaczenia współrzędnych położenia źródeł fal radiowych w przypadku, gdy są one nieruchome a odbiornik przemieszcza się ze stałą prędkością v . Pomiary wartości chwilowych częstotliwości odbieranego sygnału przez ruchomy system pomiarowy stanowią zatem podstawę do wyznaczania współrzędnych położenia (x, y, z) źródeł fal radiowych.

W celu pokazania dystyngtywnego charakteru zmian dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości względem położenia źródeł fal radiowych, rozpatrzono sytuację jak na rysunku 1.

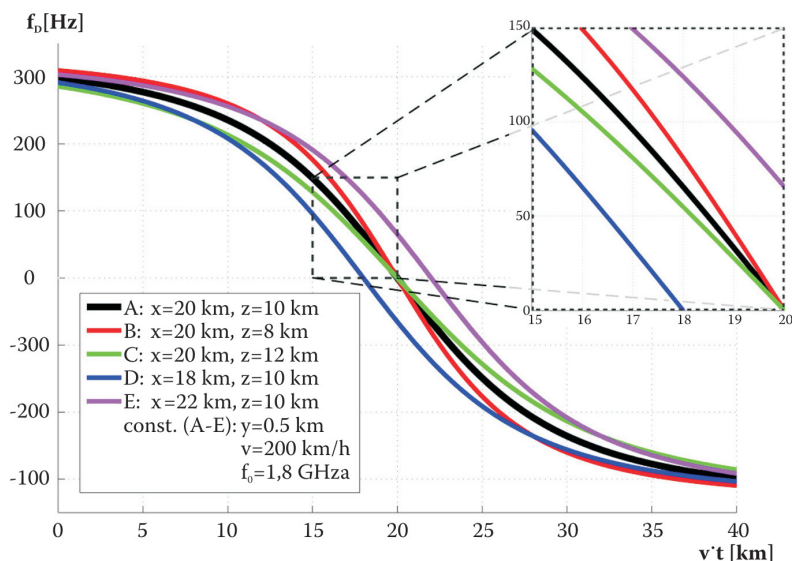


Rys. 1. Struktura przestrzenno-czasowa wzajemnego położenia odbiornika i nadajnika przyjęta do obliczeń numerycznych

Uwzględniając pięć różnych położenia nadajnika jak na rysunku 2 na podstawie zależności (16) wyznaczono przebiegi krzywych dopplerowskich, które przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Zróżnicowane usytuowanie źródła sygnału na płaszczyźnie XZ rozpatrzone w analizie numerycznej



Rys. 3. Zróżnicowany przebieg krzywych dopplerowskich w funkcji różnego położenia źródła promieniowania fal radiowych

Zróżnicowany przebieg krzywych dopplerowskich, charakterystyczny dla każdego usytuowania źródła sygnału, stanowi istotę metodyki wykorzystania wartości chwilowej częstotliwości do lokalizacji źródeł promieniowania fal ra-

diowych, przy założeniu zadanej wysokości y przemieszczania się odbiornika pomiarowego.

Korzystając z wyrażenia (16), można wyznaczyć zależności opisujące poszczególne współrzędne x, y, z położenia nadajnika względem początkowego usytuowania odbiornika. Dla uproszczenia przyjęto, że odbiornik przemieszcza się na ustalonej wysokości nad terenem płaskim (współrzędna y została przyjęta jako wielkość znana i ustalona). Problem sprowadza się zatem do wyznaczenia tylko dwóch współrzędnych x i z . Wyznaczając wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości dla dwóch różnych momentów czasu t_1 i t_2 oraz dokonując elementarnych przekształceń wyrażenia (16), otrzymujemy zależności opisujące współrzędne x i z położenia źródła sygnału:

$$\begin{cases} x = v \frac{t_1 A(t_1) - t_2 A(t_2)}{A(t_1) - A(t_2)}, \\ z = \pm \sqrt{\frac{1}{(1-k^2)} \left[\frac{v(t_1 - t_2) A(t_1) A(t_2)}{A(t_1) - A(t_2)} \right]^2 - y^2}, \end{cases} \quad (17)$$

gdzie: $A(t) = \frac{\sqrt{1-F^2(t)}}{F(t)} = \frac{1}{\sqrt{F^2(t)} - 1}, F(t) = \frac{f_D(t)}{f_0} \cdot \frac{1-k^2}{k} - k.$

Jak wynika z powyższych zależności, do wyznaczenia współrzędnych położenia źródła sygnału wymagany jest zatem pomiar częstotliwości Dopplera f_D w co najmniej dwóch różnych momentach czasu.

5. Przestrzenny zakres lokalizacji położenia źródeł fal radiowych

Rysunek 3 pokazuje, że kształt krzywej Dopplera jest ściśle zależny od współrzędnych $\mathbf{x} = (x, y, z)$ położenia nadajnika względem trajektorii ruchu odbiornika. Zależy on również od prędkości odbiornika v oraz częstotliwości nadawanego sygnału f_0 [9, 10]. Jednakże w pewnej odległości od źródła sygnału częstotliwość Dopplera f_D zmienia się już nieznacznie i przyjmuje wartość bliską jednej z dwóch wartości granicznych:

$$f_{Dgr}^+ = \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ t=0}} f_D(\mathbf{x}, t) = \frac{f_0 k}{1-k^2} (k+1) = \frac{f_0 k}{1-k} \underset{k \rightarrow 0}{\cong} f_0 k = f_0 \frac{v}{c} = f_{Dgr} \quad (18)$$

$$f_{Dgr}^- = \lim_{t \rightarrow \infty} f_D(\mathbf{x}, t) = \frac{f_0 k}{1-k^2} (k-1) = -\frac{f_0 k}{1+k} \underset{k \rightarrow 0}{\cong} -f_0 k = -f_0 \frac{v}{c} = -f_{Dgr}. \quad (19)$$

Graniczna wartość f_{Dgr}^+ odpowiada zbliżaniu się odbiornika do źródła, natomiast f_{Dgr}^- — oddalaniu od niego. Jak widać, graniczna wartość częstotliwości Dopplera $f_{Dgr} = f_0 v/c$, znana z podręczników fizyki, jest niezależna od współrzędnych (x, y, z) położenia nadajnika względem odbiornika. W przypadku granicznym nie można zatem wnioskować o lokalizacji (współrzędnych położenia) źródła na podstawie dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości. Istnieje więc ograniczony obszar, w którym możliwe jest wyznaczenie współrzędnych źródeł fal radiowych. Obszar ten w dalszej części publikacji, zwany będzie *obszarem skutecznego (efektywnego) pomiaru*. Poza tym obszarem istnieje tzw. *strefa (obszar) stałego dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości*, w której wyznaczenie współrzędnych źródła sygnału nie jest możliwe. Obszary te i ich rzuty na płaszczyznę XZ przedstawiono na rysunkach 4-6.

Podstawą wyznaczenia płaszczyzny granicznej pomiędzy obszarami jest występowanie zmian wartości częstotliwości dopplerowskiej. Jeżeli pomiar dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości realizowany jest z bezwzględną dokładnością Δf_D ($\Delta f_D = f_0 \cdot \delta f$, δf — błąd względny pomiaru częstotliwości), wówczas następujące nierówności:

$$f_{Dgr}^- + \Delta f_D \leq f_D \leq f_{Dgr}^+ - \Delta f_D \quad (20)$$

wyznaczają obszar skutecznego pomiaru. Natomiast nierówności

$$(f_D < f_{Dgr}^- + \Delta f_D) \wedge (f_D > f_{Dgr}^+ - \Delta f_D) \quad (21)$$

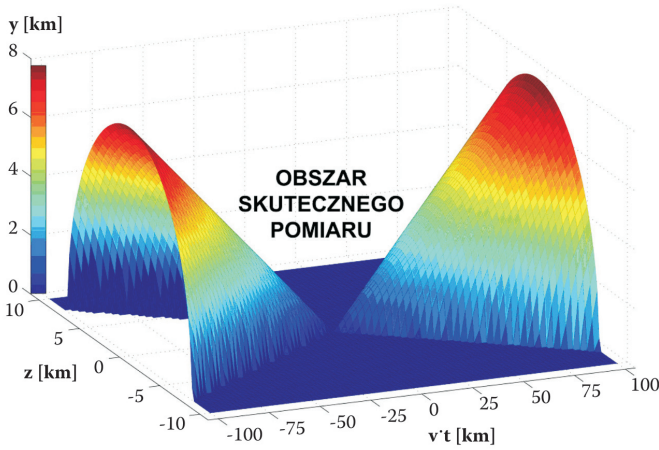
stanowią podstawę wyznaczenia obszaru stałego dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości. Stosując przybliżone wartości graniczne częstotliwości Dopplera f_{Dgr} , powyższe zależności można przedstawić w postaci:

$$f_D \leq |f_{Dgr} - \Delta f_D| \text{ oraz } f_D > |f_{Dgr} - \Delta f_D|. \quad (22)$$

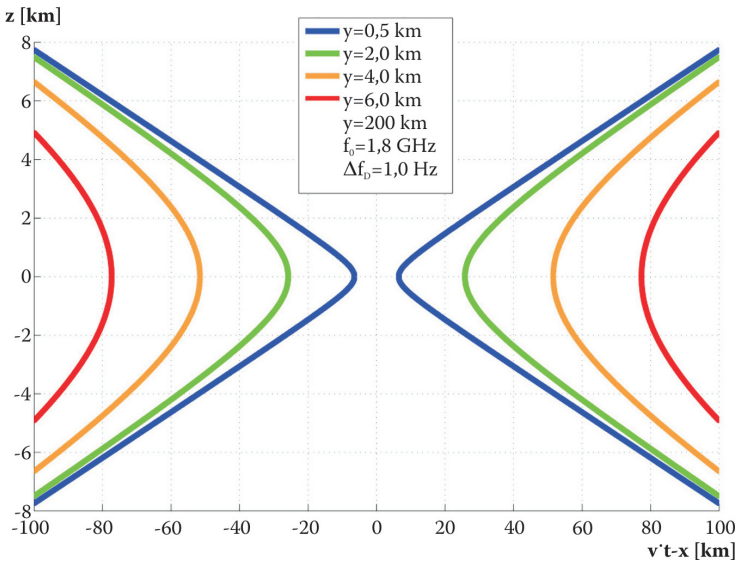
Na rysunku 4 przedstawiono płaszczyznę graniczną oddzielającą obszar skutecznego pomiaru od obszaru stałego dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości.

Prowadząc dla wybranych wysokości y przekroje płaszczyzny przedstawionej na rysunku 4, otrzymano krzywe graniczne zobrazowane na rysunku 5.

Należy zwrócić uwagę na to, że pomiar częstotliwości dopplerowskiej odbywa się przy ustalonych wartościach współrzędnych położenia nadajnika względem przyjętego w odbiorniku układu odniesienia. Sam ruch odbiornika odbywa się natomiast tylko wzdłuż osi OX tego układu. Dlatego też, z punktu widzenia praktycznej realizacji pomiarów, istotne znaczenie ma *długość odcinka drogi efektywnego pomiaru* Δs , na którym istnieje możliwość rejestracji wykrywalnych zmian częstotliwości Dopplera f_D .

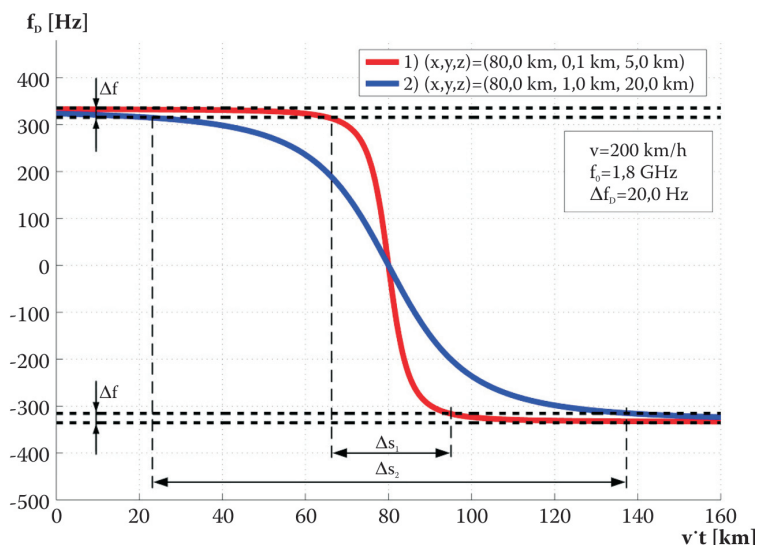


Rys. 4. Płaszczyzna graniczna oddzielająca obszar skutecznego pomiaru od obszaru stałego dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości w funkcji różnego położenia nadajnika względem odbiornika
 $(v = 200 \text{ km/h}, f_0 = 1,8 \text{ GHz}, \Delta f_D = 1 \text{ Hz})$



Rys. 5. Krzywe graniczne obszaru skutecznego pomiaru jako przekroje płaszczyzny granicznej dla wybranych wysokości przelotu w funkcji różnego położenia źródła sygnału

Wpływ położenia źródła fal radiowych względem trajektorii ruchu ruchomego odbiornika pomiarowego zaprezentowano na rysunku 6. W celu poglądowego zobrazowania sposobu wyznaczania Δs na podstawie przebiegu funkcyjnej zależności $f_D(vt)$ jako kryterium długości odcinka drogi Δs przyjęto wartość dokładności pomiaru częstotliwości równą $\Delta f_D = 20 \text{ Hz}$.



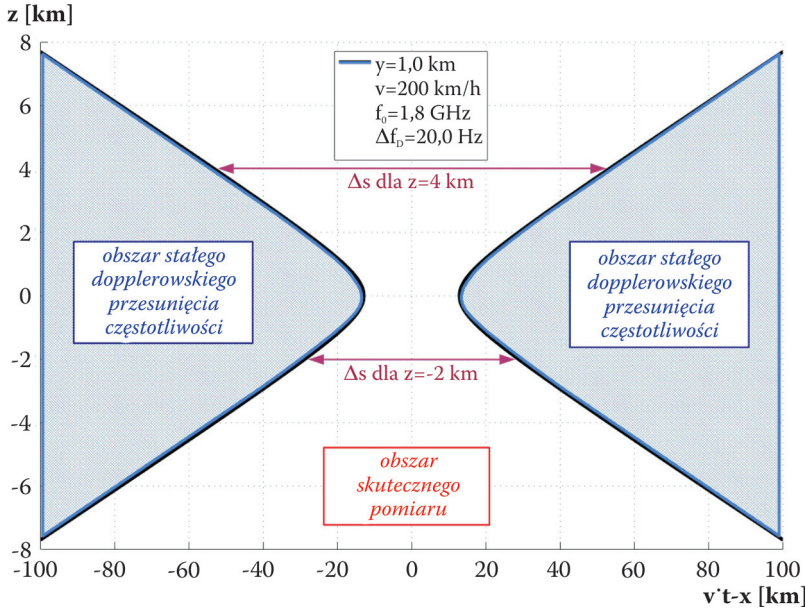
Rys. 6. Sposób wyznaczania długości odcinka Δs efektywnego pomiaru (obszaru skutecznego pomiaru) na podstawie krzywej częstotliwości Dopplera przy różnym położeniu źródła sygnału

Jak widać, im dalej od miejsca lokalizacji nadajnika przebiega trajektoria ruchu ruchomego systemu pomiarowego, tym większa jest długość drogi Δs , na której możliwy jest efektywny pomiar zmian częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału.

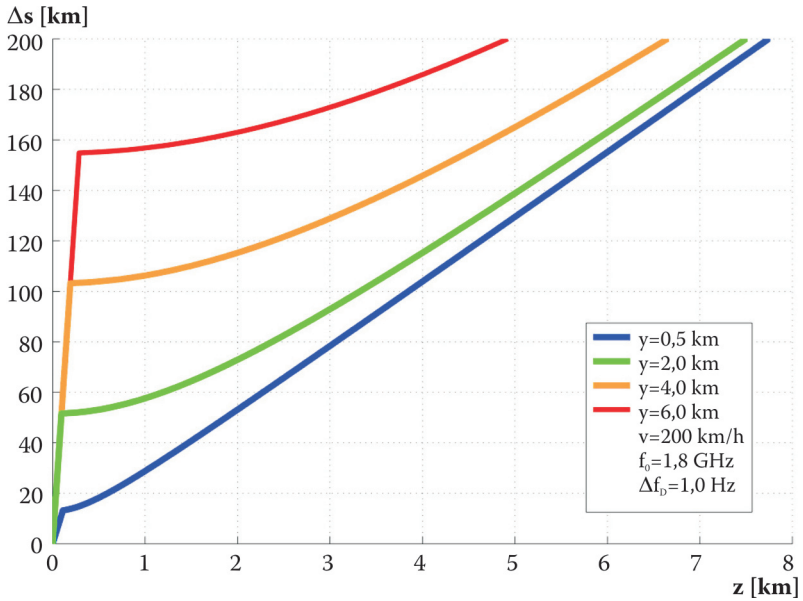
Do wyznaczenia długości odcinka Δs efektywnego pomiaru można również wykorzystać krzywe graniczne przedstawione na rysunku 5. W tym przypadku parametrem jest wysokość y usytuowania trajektorii ruchu ruchomego odbiornika nad powierzchnią ziemi. Przykład określania długości drogi Δs przedstawiono na rysunku 7.

Długość odcinka Δs w obszarze skutecznego pomiaru Δs można również wyznaczyć na drodze analitycznej, dokonując przekształceń wzoru (16) opisującego częstotliwość Dopplera:

$$\begin{aligned}
 \Delta s &= \sqrt{\frac{(1-k^2)(y^2+z^2)}{1}} + \sqrt{\frac{(1-k^2)(y^2+z^2)}{1}} \cong \\
 &\sqrt{\left[\frac{(f_{Dgr}^+ - \Delta f_D)(1-k^2)}{f_0} - k\right]^2 - 1} + \sqrt{\left[\frac{|f_{Dgr}^- + \Delta f_D|(1-k^2)}{f_0} - k\right]^2 - 1} \cong \\
 &\cong 2 \sqrt{\frac{(1-k^2)(y^2+z^2)}{1}} \cong 2 \sqrt{\frac{y^2+z^2}{1}} \quad (23) \\
 &\sqrt{\left[\frac{(f_{Dgr} - \Delta f_D)(1-k^2)}{f_0} - k\right]^2 - 1} \quad \sqrt{\left[\frac{(f_{Dgr} - \Delta f_D)}{kf_0} - k\right]^2 - 1}
 \end{aligned}$$



Rys. 7. Schemat wyznaczania długości odcinka drogi Δs w obszarze skutecznego pomiaru w płaszczyźnie XZ



Rys. 8. Długość odcinka drogi w obszarze skutecznego pomiaru Δs w funkcji współrzędnych z i y położenia źródła sygnału

Funkcyjną zależność pomiędzy długością odcinka Δs a wartością współrzędnej z położenia źródła sygnału, z uwzględnieniem różnych wysokości trajektorii ruchu systemu pomiarowego, przedstawiono na rysunku 8.

Jak widać z powyższych wykresów, wraz ze wzrostem minimalnej odległości położenia nadajnika fal radiowych względem trajektorii ruchu systemu pomiarowego w sposób zasadniczy wzrasta wielkość odcinka drogi efektywnego pomiaru.

6. Podsumowanie

Przedstawiona w artykule analiza zależności opisującej efekt Dopplera pokazuje, że chwilowa wartość częstotliwość Dopplera może być wykorzystana do lokalizowania źródeł sygnałów radiowych. Dzięki analitycznej zależności łączącej częstotliwość Dopplera ze współrzędnymi położenia źródła można wyznaczyć poszczególne współrzędne na podstawie pomiaru częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału. Ze względu na charakter przebiegu krzywych Dopplera, istnieje ograniczony obszar skutecznego pomiaru częstotliwości, w którym określanie współrzędnych nadajnika jest możliwe. Kształt płaszczyzny granicznej pomiędzy obszarem efektywnego pomiaru a obszarem dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości w praktyce narzuca metodykę wykonywania pomiarów. Poprzez wybór odpowiednich parametrów ruchu odbiornika pomiarowego tj. trajektorii ruchu i prędkości można wpływać na zasięg prowadzenia lokalizacji źródeł promieniowania fal radiowych.

Zaprezentowana w niniejszym artykule ocena możliwości lokalizacji źródeł fal radiowych za pomocą przedstawionej metody stanowi podstawę do przeprowadzenia badań empirycznych. Uzyskane na gruncie teoretyczno-symulacyjnym wyniki stanowią podstawę do przeprowadzenia pomiarów w warunkach rzeczywistych, co umożliwi praktyczną weryfikację modelu.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.07.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 11.09.2006 r.

LITERATURA

- [1] J. STEFAŃSKI, *Metody i standardy pozycjonowania terminali w systemach komórkowych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6/2006 (LXXIX).
- [2] J. STEFAŃSKI, *Nowa metoda lokalizowania terminala ruchomego w systemach WCDMA/FDD*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Poznań, 2006.
- [3] I. J. GUPTA, *Stray signal source location in far-field antenna/RCS ranges*, Antennas and Propagation Magazine, IEEE, vol. 46. Issue 3, June 2004.
- [4] C. DOPPLER, *Über das farbige Licht der Dopplersterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*, Abhandlungen der Königlichen Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften 1843, 2: 465.
- [5] M. KAYTON, W. R. FRIED, *Avionics Navigation System*, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [6] J. ASHJAEI, *Ashtech XII GPS technology*, Position Location and Navigation Symposium, IEEE PLANS'90, 1990.

- [7] J. SENNOTT, J. SPALDING, *Multipath sensitivity and carrier slip tolerance of an integrated Doppler DGPS navigation algorithm*, Position Location and Navigation Symposium, IEEE PLANS'90, 1990.
- [8] K. SOOHONG, CH. JOOHWAN, *Finding user position location using the Doppler information in satellite CDMA systems*, Vehicular Technology Conference, IEEE VTS-Fall VTC 2000, vol. 6.
- [9] J. RAFA, C. ZIÓŁKOWSKI, *Wpływ ruchu źródła fali elektromagnetycznej na parametry odbieranego sygnału*, XXXIII Ogólnopolska Konferencja Zastosowań Matematyki, Zakopane, 2004.
- [10] C. ZIÓŁKOWSKI, *Zjawisko Dopplera w systemach radiokomunikacji mobilnej*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji 2005, Kraków, 2005.
- [11] D. G. DUFFY, *Transform Methods for Solving Partial Differential Equations*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1994.
- [12] A. T. DE HOOP, *Handbook of Radiation and Scattering of Waves: Acoustic Waves in Fluids, Elastic Waves in Solids, Electromagnetic Waves*, Academic Press, San Diego, 1995.
- [13] C. A. BALANIS, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [14] P. SZULKIN, S. POGORZELSKI, *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1964.
- [15] C. ZIÓŁKOWSKI, J. M. KELNER, *Lokalizacja źródeł sygnałów radiowych z wykorzystaniem efektu Dopplera*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Poznań, 2000.

C. ZIÓŁKOWSKI, J. RAFA, J. M. KELNER

**Location of radio waves sources on the basis of the received signals
by mobile measurement receiver**

Abstract. In this paper an original methodology of the position calculation of electromagnetic waves sources is introduced. This methodology applies measurement of the frequency temporary value of the received signal over moving receiver. The basis of worked out methodology is the analytic dependence, which describes Doppler's frequency shift as a function of motion parameters, generated signal and mutual position of a signal source and receiver. The described analysis ensures assessment of different parameters influence on the range of radio wave sources location. The issues presented here concern radio engineering and communication systems applying the emissions with constant carrier frequency.

Keywords: mobile communications, Doppler effect, location of radio waves sources

Universal Decimal Classification: 621.396.9