



## Przestrzenno-częstotliwościowe uwarunkowania lokalizacji źródeł fal radiowych wykorzystującej efekt Dopplera

CEZARY ZIÓŁKOWSKI, JÓZEF RAFA\*, JAN M. KELNER

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,

\*Wydział Cybernetyki, Instytut Matematyki i Kryptologii,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** Artykuł poświęcony jest analizie przestrzenno-częstotliwościowych uwarunkowań praktycznego wykorzystania opracowanej przez autorów oryginalnej metody lokalizacji źródeł promieniowania fal radiowych, której podstawę stanowi pomiar dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości. Prezentowana tematyka stanowi kontynuację problematyki przedstawionej w publikacji [1]. Zagadnienie przestrzennej dyskretności i częstotliwościowej dokładności realizacji pomiarów ma istotne znaczenie w zakresie praktycznego wykorzystania efektu Dopplera do wyznaczania współrzędnych położenia źródeł fal radiowych. Przedstawiona analiza umożliwi ocenę wpływu różnych parametrów na dokładność prowadzenia lokalizacji źródeł fal radiowych funkcjonujących w systemach radiokomunikacyjnych i radiotechnicznych. Jednocześnie stanowi podstawę do opracowania wymagań na parametry techniczne urządzeń wchodzących w skład stanowiska pomiarowego oraz warunkuje opracowanie metodyki realizacji pomiarów.

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

**Symbole UKD:** 621.396.93

### 1. Wprowadzenie

Tematyka publikacji [1] dotyczy genezy metody lokalizacji źródeł promieniowania fal radiowych wykorzystującej pomiar dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości. Podstawa jej opracowania wynika z zależności opisującej dopplerowskie przesunięcie częstotliwości  $f_D(\mathbf{x}, t)$  [2, 3]:

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

gdzie:  $k = v/c$ ,  $v$  — prędkość odbiornika,  
 $c$  — prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku,  
 $f_0$  — częstotliwość emitowanej fali nośnej,  
 $\mathbf{x} = (x, y, z)$  — współrzędne położenia źródła sygnału.

Jak wynika z powyższej zależności, na podstawie pomiaru wartości chwilowych dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości  $f_D(\mathbf{x}, t)$  dla różnych momentów czasu  $t$  możemy utworzyć układ równań, którego niewiadomymi będą współrzędne położenia  $x, y, z$  źródła sygnału. Gdy przyjmie się założenie, że stanowisko pomiarowe przemieszcza się na ustalonej wysokości nad terenem płaskim (współrzędna  $y$  to wielkość ustalona), problem sprowadza się do wyznaczenia dwóch współrzędnych  $x$  i  $z$ . Dokonując w tym przypadku pomiaru wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości dla dwóch różnych momentów czasu  $t_1$  i  $t_2$  oraz przeprowadzając elementarne przekształcenia wyrażenia (1), otrzymujemy następujące zależności opisujące współrzędne  $x$  i  $z$  położenia źródła sygnału:

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

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

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.

Opracowana metoda w odróżnieniu od dotychczas stosowanych (np. [4, 5, 6, 7]) nie posiada takich zasadniczych wad, jak konieczność zapewnienia określonej struktury czasowo-częstotliwościowej transmitowanych sygnałów lub wykorzystania rozbudowanych, kalibrowanych systemów antenowych w odbiorczych urządzeniach namierzających. Praktyczne wykorzystanie opracowanej metody

wymaga zastosowania stanowiska pomiarowego składającego się z odbiornika radiokomunikacyjnego z typowym systemem antenowym, układu pomiaru prędkości przemieszczania się i układu lokalizacji położenia stanowiska pomiarowego (np. odbiornik GPS). Prostota stanowiska i sposobu realizacji pomiarów stanowią zasadnicze atuty opracowanej metody lokalizacji źródeł promieniowania fal radiowych. Główny problem, związany z jej praktycznym wykorzystaniem, wynika z ograniczonych możliwości pomiaru zmian chwilowej wartości częstotliwości odbieranego sygnału mających dystynktywny charakter.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę wpływu dokładności pomiaru dopplerowskich zmian częstotliwości na błędy lokalizacji źródeł fal radiowych oraz przestrzenne uwarunkowania pomiaru wymaganego poziomu degradacji wartości zmian częstotliwości odbieranego sygnału. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do opracowania wymagań na parametry techniczne urządzeń wchodzących w skład stanowiska pomiarowego oraz warunkują opracowanie metodyki realizacji pomiarów.

## 2. Przestrzenne uwarunkowania pomiaru zmian częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału

Podstawą wykorzystania chwilowej wartości częstotliwości do wyznaczania współrzędnych nadajnika jest konieczność wystąpienia zmian mierzonego parametru odbieranego sygnału. Stąd też pojawia się problem wyznaczenia liniowej (wzdłuż trajektorii ruchu) minimalnej długości odcinka  $\Delta l$ , którego przebycie zapewni rozróżnialną zmianę chwilowej wartości częstotliwości.

Zakres i minimalne długości odcinków drogi  $\Delta l$ , warunkujące zmiany przesunięcia częstotliwości, wynikają z charakteru krzywej Dopplera ([1] rys. 3 i 6). Jeżeli odległość nadajnika od odbiornika jest duża, to częstotliwość dopplerowska  $f_D$  zmienia się nieznacznie i przyjmuje wartość bliską jednej z ekstremalnych  $\pm f_{Dgr}$ . W momencie, gdy odbiornik pomiarowy przemieszcza się w małej odległości od nadajnika, zmiany  $f_D$  są większe. Stąd też, w celu wykorzystania zmian częstotliwości chwilowej do lokalizacji źródeł, pomiary mogą być wykonywane co pewien odcinek drogi  $\Delta l$  przebytej przez system pomiarowy. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  uwarunkowana jest uzyskaniem zmiany względnej wartości częstotliwości dopplerowskiej  $\Delta f_D/f_0$ , porównywalnej z kryterium rozróżnialności zmian, np. stabilnością częstotliwości  $\delta f$  źródła sygnału.

W celu wyznaczenia długości odcinka  $\Delta l$ , do zależności (1) wprowadzono zmienną pomocniczą  $l = vt$ . Zmienna  $l$  reprezentuje odległość, jaką pokonuje odbiornik przemieszczający się z prędkością  $v$  od chwili  $t = 0$  w kierunku równoległym do osi OX. Dokonując różniczkowania po zmiennej  $l$ , uzyskujemy wyrażenie o postaci:

$$\frac{df_D}{dl} = \frac{-kf_0}{1-k^2} \left[ \frac{2(x-l)^2 + (1-k^2)(y^2 + z^2)}{\left[ (x-l)^2 + (1-k^2)(y^2 + z^2) \right]^{\frac{3}{2}}} \right]. \quad (3)$$

Przechodząc z przyrostów infityzmalnych na przyrosty różnicowe  $df_D \rightarrow \Delta f_D$ ,  $dl \rightarrow \Delta l$ , otrzymujemy:

$$\frac{\Delta f_D}{\Delta l} = \frac{-kf_0}{1-k^2} \left[ \frac{2(x-l)^2 + (1-k^2)(y^2 + z^2)}{\left[ (x-l)^2 + (1-k^2)(y^2 + z^2) \right]^{\frac{3}{2}}} \right]. \quad (4)$$

Na podstawie powyższej zależności wyznaczono długość odcinka  $\Delta l$  opisującego warunki realizacji pomiarów, który po uwzględnieniu zmiennej czasowej  $t$  przyjmuje postać:

$$\Delta l = -\frac{\Delta f_D}{f_0} \cdot \frac{(1-k^2)}{k} \cdot \frac{\left[ (x-vt)^2 + (1-k^2)(y^2 + z^2) \right]^{\frac{3}{2}}}{\left[ 2(x-vt)^2 + (1-k^2)(y^2 + z^2) \right]}. \quad (5)$$

Wyznaczona długość odcinka  $\Delta l$  warunkuje zmiany dopplerowskiej częstotliwości  $\Delta f_D/f_0$  na poziomie wartości stabilności częstotliwości  $\delta f$  źródła sygnału. Wyniki obliczeń numerycznych zaprezentowano dla różnych położen nadajnika  $x$  względem trajektorii ruchu odbiornika, różnych prędkości odbiornika  $v$  oraz różnych wartości kryterialnych rozróżnienia zmian częstotliwości.

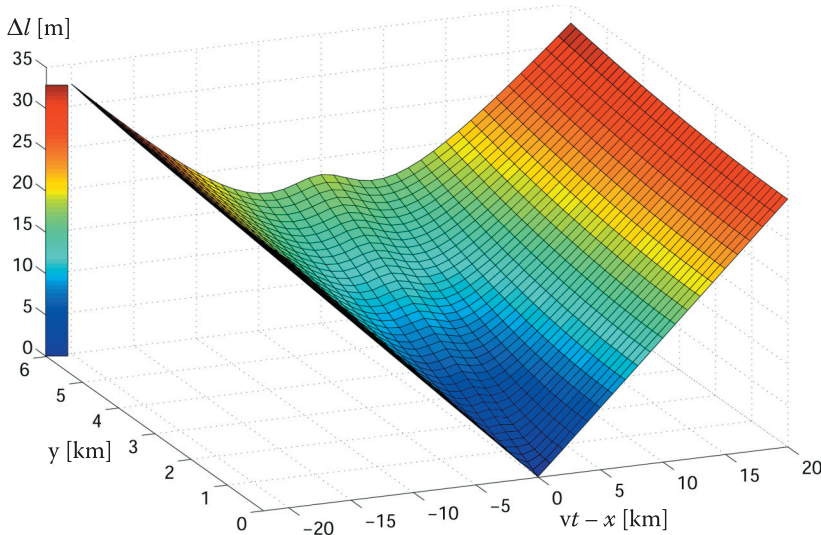
Przy realizacji obliczeń numerycznych przyjęto następujące założenia:

- częstotliwość nadawanego sygnału  $f_0 = 1,8$  GHz,
- wartość stabilności częstotliwości nadajnika  $\delta f = 5,6 \cdot 10^{-10}$  ( $|\Delta f_D| = 1$  Hz),
- prędkość odbiornika  $v \leq 300$  km/h,
- $t = 0 \Rightarrow vt = 0 \Rightarrow x - vt = x$  — każdorazowo założono rozpoczęcie ruchu dla nowych współrzędnych  $\mathbf{x} = (x, y, z)$  położenia nadajnika względem odbiornika,
- $\Delta f_D < 0$  — odbiornik przybliża się do nadajnika —  $f_D$  jest funkcją malejącą;
- $-\Delta f_D / f_0 = n \cdot \delta f$  — względny błąd pomiaru częstotliwości Dopplera  $f_D$  (kryterium rozróżnialności zmian) wyrażony jest poprzez  $n$ -krotność stabilności częstotliwości  $\delta f$ .

W wyniku przyjętych założeń, wzór (5) można uprościć do postaci:

$$\Delta l = n\delta f \cdot \frac{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}{k(2x^2 + y^2 + z^2)}. \quad (6)$$

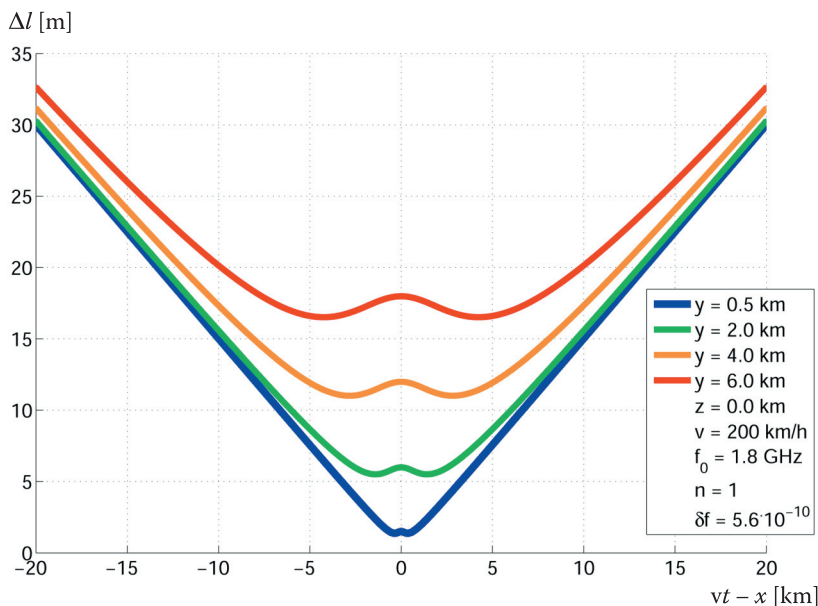
Graficzne zobrazowanie zmian długości odcinka drogi  $\Delta l$  zaprezentowano na kolejnych wykresach. Rysunki 1-8 przedstawiają zmiany  $\Delta l$  jako funkcje współrzędnych  $\mathbf{x} = (x, y, z)$  położenia nadajnika względem odbiornika, prędkości odbiornika  $v$  oraz kryterium rozróżnialności zmian częstotliwości, tj. wielokrotności parametru  $\delta f$ .



Rys. 1. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja współrzędnych  $x, y$  położenia nadajnika względem odbiornika

Na rysunkach 1 i 3 przedstawiono wykresy ilustrujące wpływ parametrów charakteryzujących kształt trajektorii ruchu odbiornika pomiarowego na zmiany długości odcinka drogi  $\Delta l$ . Krzywe zobrazowane na rysunkach 2 i 4 przedstawiają przykładowe przekroje uzyskane na podstawie trójwymiarowych wykresów umieszczonych na rysunkach 1 i 3. Jak widać, współrzędne  $y$  i  $z$  nie wpływają na graniczne wartości częstotliwości  $f_D(\mathbf{x}, t)$  [1], a jedynie na kształty przebiegu krzywych Dopplera. Oznacza to, że zmiany wartości  $y$  i  $z$  nie wpływają na liczbę punktów pomiarowych warunkujących mierzalną *rozróżnialność* zmian częstotliwości, a jedynie powodują zmiany minimalnych długości odcinków drogi  $\Delta l$ . Na podstawie dwuwymiarowych wykresów przedstawionych na rysunkach 2 i 4 można zauważyć, że wraz z oddalaniem się od źródła sygnału zróżnicowanie długości odcinków  $\Delta l$  dla poszczególnych współrzędnych maleje. Oznacza to, że współrzędne  $y$  i  $z$  tylko w pobliżu źródła wpływają w istotny sposób na długość odcinka pomiarowego  $\Delta l$ . Wraz z oddalaniem się od źródła, wpływ ten ma coraz mniejsze znaczenie. Ponadto, analizując rysunki 2 i 4, można zauważyć, że odpowiednie przebiegi krzywych są jednakowe. Wynika to z faktu, że występujące we wzorach (1) i (6) współrzędne  $y$  i  $z$  mają *symetryczny*

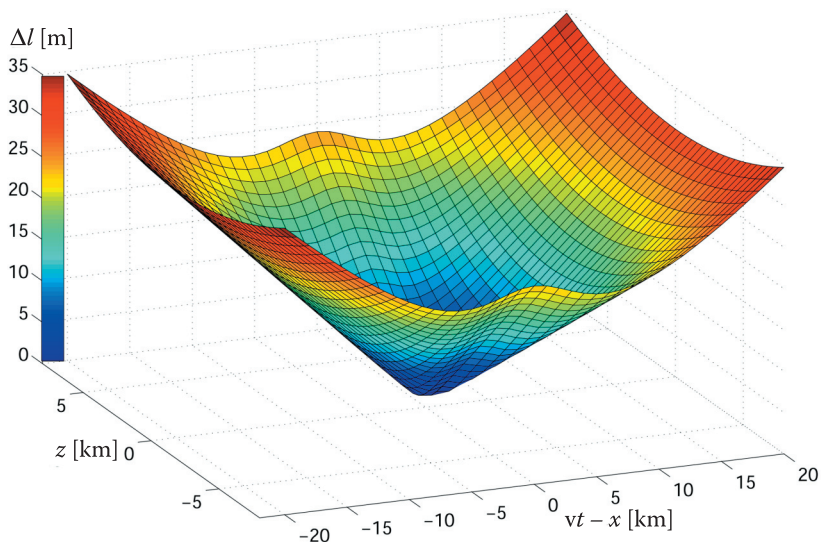
charakter. Zróznicowanie trójwymiarowych wykresów przedstawionych na rysunkach 1 i 3 wynika z różnych zakresów analizy zmiennych niezależnych, tj. zakres zmian współrzędnej  $y$  analizowany jest tylko dla wartości dodatnich, natomiast zmienność współrzędnej  $z$  rozpatrzono zarówno dla wartości dodatnich, jak i ujemnych.



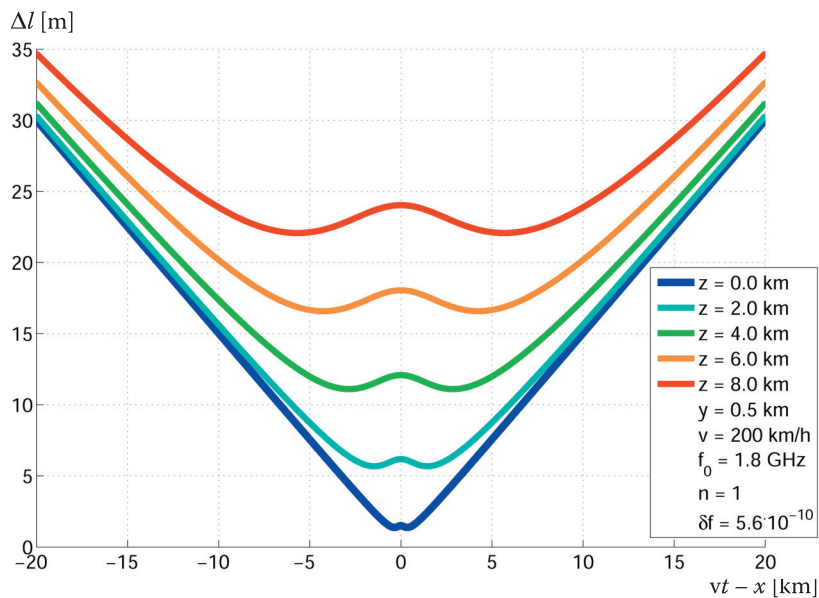
Rys. 2. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja odległości  $vt$  pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem wzdłuż osi OX, dla różnych wartości współrzędnej  $y$

Rysunki 5 i 6 prezentują wpływ dynamiki ruchu odbiornika pomiarowego na zmiany minimalnej długości odcinka  $\Delta l$  zapewniającej mierzalną rozróżnialność pomiarów. Prędkość  $v$  wpływa bezpośrednio na wartości graniczne  $\pm f_{Dgr}$ , częstotliwości Dopplera ([1]), zatem zmiana prędkości ma bezpośredni wpływ na liczbę punktów pomiarowych w zakresie zmienności dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości  $f_D$ . Prędkość wpływa również na długości odcinków  $\Delta l$ , co przedstawiają wykresy 5 i 6. Na ich podstawie oraz po uwzględnieniu zależności (6) można stwierdzić, że wartość  $\Delta l$  jest odwrotnie proporcjonalna do prędkości wartości prędkości  $v$ .

Kolejne rysunki (rys. 7 i 8) ilustrują wpływ dokładności pomiaru częstotliwości na zmiany długości odcinka drogi  $\Delta l$ . Jako miarę wartości błędu pomiarowego przyjęto wielokrotności stabilności częstotliwości  $n \cdot \delta f$ . Jak wynika ze wzoru (6), zależność pomiędzy długością odcinka  $\Delta l$  a błędem pomiaru częstotliwości  $n \cdot \delta f$  jest liniowa. Porównując wyniki przedstawione na wszystkich powyższych wykresach, można zauważyć, że zdecydowanie największy wpływ na kształtowanie wartości odcinka  $\Delta l$  ma błąd pomiaru częstotliwości.

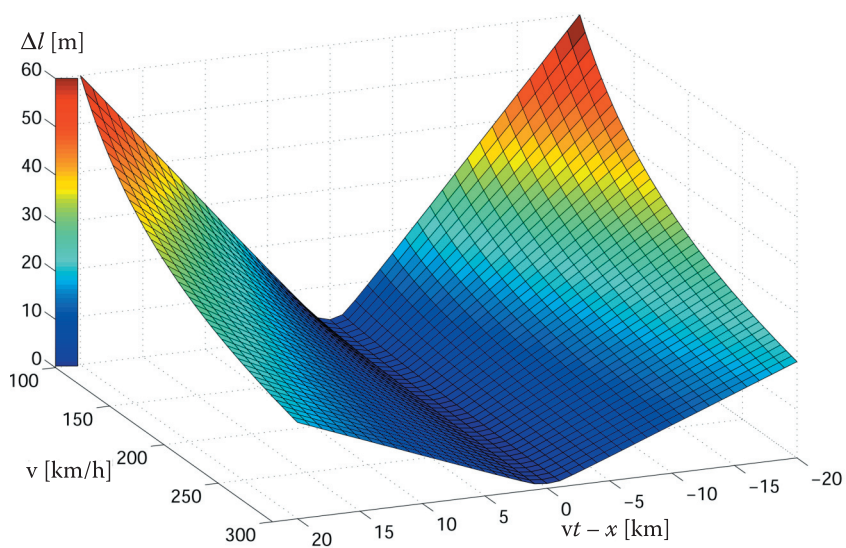


Rys. 3. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja dwóch współrzędnych  $x, z$  położenia nadajnika względem odbiornika

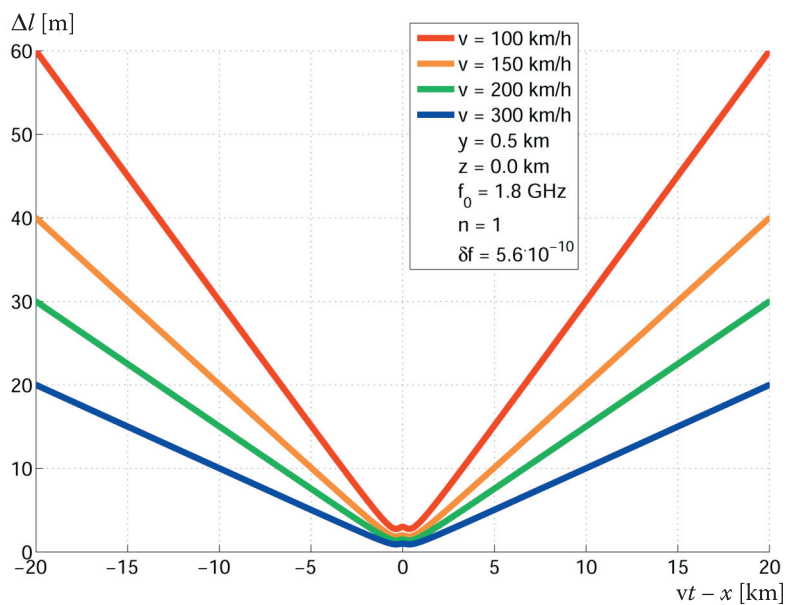


Rys. 4. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja odległości  $vt - x$  pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem wzdłuż osi OX, dla różnych wartości współrzędnej  $z$



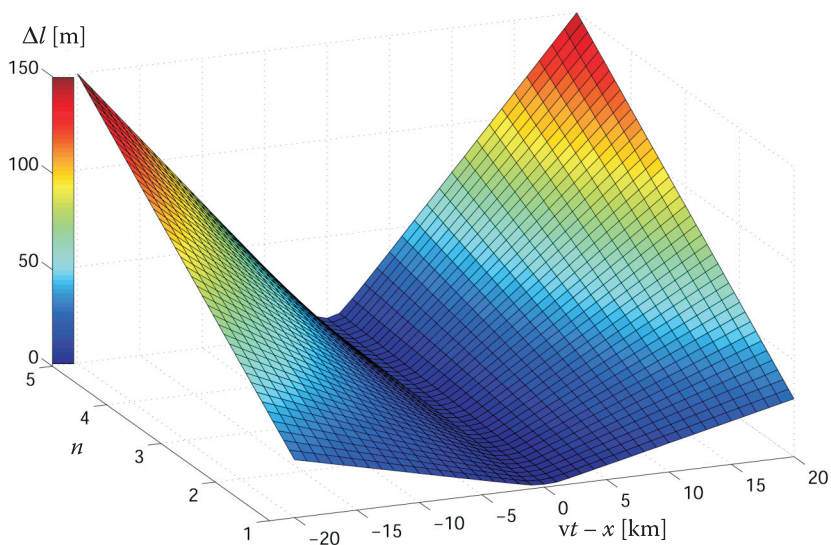


Rys. 5. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja współrzędnej  $x$  położenia nadajnika względem odbiornika oraz prędkości  $v$  odbiornika

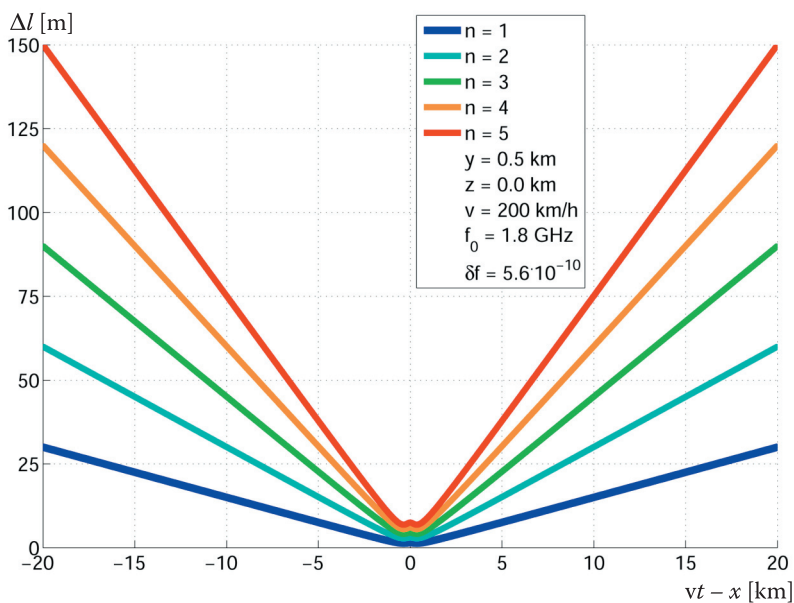


Rys. 6. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja odległości  $vt - x$  pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem wzdłuż osi OX, dla różnych wartości prędkości  $v$



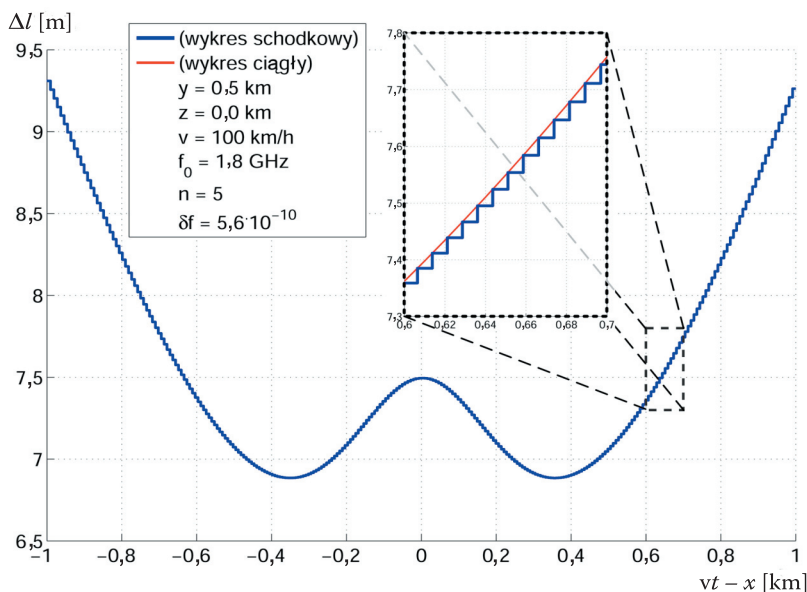


Rys. 7. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja współrzędnej  $x$  położenia nadajnika względem odbiornika oraz  $n$ -krotności stabilności częstotliwości  $\delta f$



Rys. 8. Długość odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja odległości  $vt - x$  pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem wzdłuż osi OX, dla różnych wartości  $n$ -krotności stabilności częstotliwości  $\delta f$

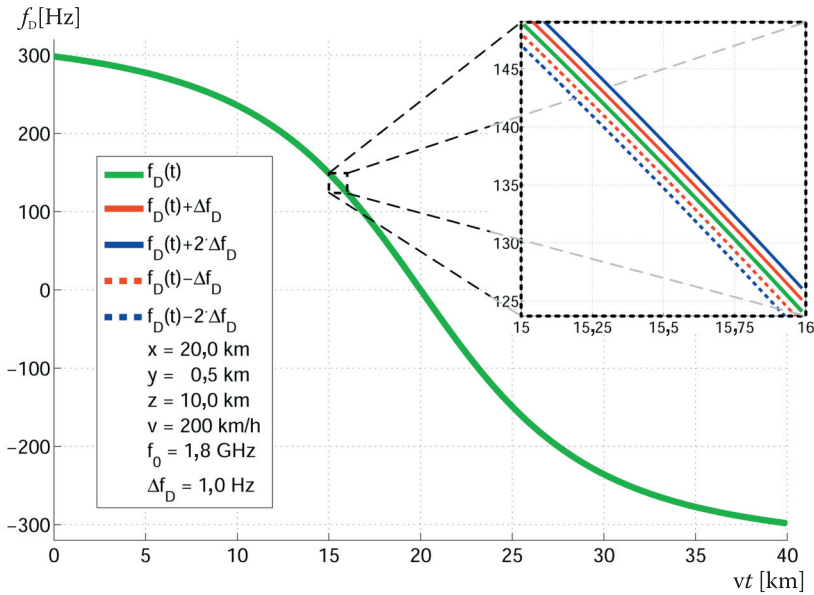
Zaprezentowane powyżej wykresy wykonano przy założeniu, że początek pomiaru ( $t = 0$ ) rozpoczyna się każdorazowo dla nowej współrzędnej  $x$  położenia nadajnika względem odbiornika. W przypadku przyjęcia jednego wspólnego momentu czasu stanowiącego początek cyklu pomiarowego, przy ustalonych współrzędnych, np. dla  $\mathbf{x} = (x, y, z) = (1,0; 0,5; 0,0)$  km, przebieg  $\Delta l$  ma postać krzywej schodkowej, co przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Przykładowy schodkowy przebieg długości odcinka drogi  $\Delta l$  jako funkcja odległości  $vt - x$  nadajnika od odbiornika wzdłuż osi OX, dla ustalonej wartości współrzędnych  $y$  i  $z$

### 3. Wpływ błędu pomiaru częstotliwości na dokładność lokalizacji źródła sygnału

Podstawą wyznaczenia położenia źródła sygnału jest pomiar częstotliwości chwilowej  $f(\mathbf{x}, t) = f_0 + f_D(\mathbf{x}, t)$ . W wyniku obecności zakłóceń oraz skończonej dokładności metodyki i systemu pomiarowego, wyznaczenie wartości częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału odbywa się z określonym błędem. Analizę wpływu błędów pomiarowych na dokładność lokalizacji przeprowadzono przy następujących założeniach [8]: rzeczywiste położenie źródła sygnału  $\mathbf{x} = (x, y, z) = (20; 0,5; 10)$  km, częstotliwość nadawanego sygnału  $f_0 = 1,8$  GHz, prędkość odbiornika  $v = 200$  km/h. Na rysunku 10 przedstawiono przebieg zmian częstotliwości dopplerowskiej  $f_D$  z uwzględnieniem błędów  $\pm 1$  Hz i  $\pm 2$  Hz.



Rys. 10. Przebieg zmian częstotliwości Dopplera  $f_D$  z uwzględnieniem błędów  $\pm 1$  Hz i  $\pm 2$  Hz jako funkcja przebytej drogi  $vt$

W celu oceny dokładności lokalizacji źródła, wprowadzono miarę błędu lokalizacji zdefiniowaną następująco [8]:

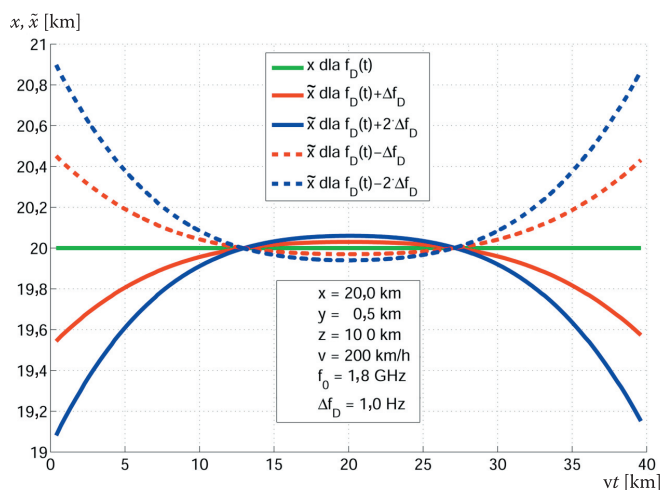
$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta z)^2}, \quad (7)$$

gdzie:  $\Delta x = |x - \tilde{x}|$ ,  $\Delta z = |z - \tilde{z}|$ ,  $\tilde{x}$  i  $\tilde{z}$  — współrzędne położenia źródła wyznaczone na podstawie wartości częstotliwości chwilowej sygnału z uwzględnieniem występujących błędów pomiarowych  $\Delta f_D \neq 0$  i przy wykorzystaniu zależności (2),  $x$  i  $z$  — rzeczywiste współrzędne położenia źródła sygnału. Przyjętą miarę można traktować jako wielkość promienia okręgu, w obrębie którego znajduje się lokalizowane źródło fali radiowej.

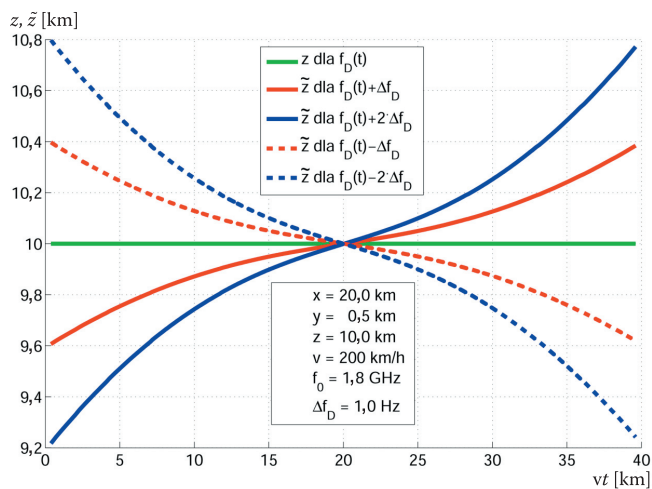
Przebieg wartości współrzędnych  $\tilde{x}$  i  $\tilde{z}$  położenia źródła sygnału z uwzględnieniem przyjętych błędów pomiarowych przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

Rysunek 13 ilustruje zmianę miary błędu lokalizacji  $\Delta r$  w funkcji przebytej drogi  $vt$  przez system pomiarowy, w obszarze skutecznego pomiaru.

Jak wynika z powyższych wykresów, dokładność lokalizacji źródła fal radiowych jest ściśle związana z odległością systemu pomiarowego od źródła sygnału. Nasuwa to wniosek, że poprzez odpowiedni dobór metodyki realizacji pomiarów częstotliwości chwilowej związanej z wyborem różnych trajektorii ruchu odbiornika pomiarowego, można wpływać na dokładność lokalizacji źródła sygnału.

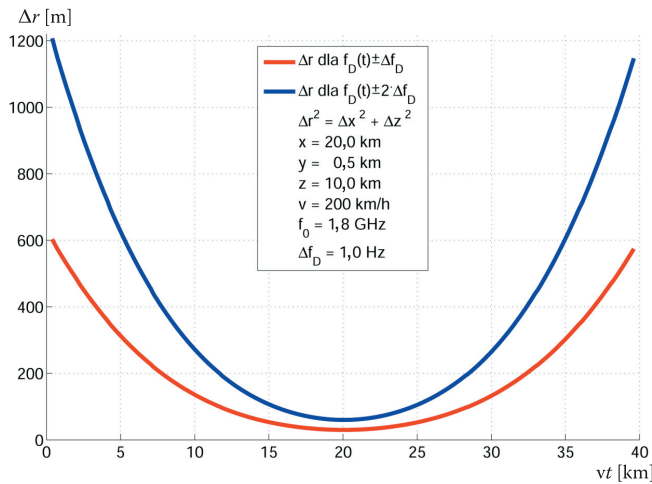


Rys. 11. Przebiegi wartości współrzędnej  $\tilde{x}$  w funkcji przebytej drogi  $vt$ , przy uwzględnieniu błędów odczytu wartości częstotliwości Dopplera  $f_D$



Rys. 12. Przebiegi wartości współrzędnej  $\tilde{z}$  w funkcji przebytej drogi  $vt$ , przy uwzględnieniu błędów odczytu wartości częstotliwości Dopplera  $f_D$

Jednocześnie powyższe wykresy dowodzą, że wartość błędu pomiaru częstotliwości chwilowej sygnału ma najistotniejszy wpływ na dokładność lokalizacji źródła fali radiowej.



Rys. 13. Przebiegi wartości błędu lokalizacji  $\Delta r$  w funkcji przebytej drogi  $vt$ , przy uwzględnieniu błędów odczytu wartości częstotliwości Dopplera  $f_D$

#### 4. Podsumowanie

Dokładność lokalizacji źródeł sygnałów warunkują zasadniczo dwa parametry — dokładność pomiaru wartości częstotliwości chwilowej, a tym samym częstotliwości Dopplera oraz odległość nadajnika od odbiornika w chwili realizacji pomiaru. Im odległość ta jest mniejsza, tym popełniany błąd przy określaniu współrzędnych położenia źródła sygnału jest mniejszy. Poprzez odpowiedni dobór metodyki pomiarowej związanej z wyborem różnych trajektorii ruchu odbiornika pomiarowego można uzyskać jednocześnie szeroki zakres realizacji pomiarów i dużą dokładność lokalizacji źródła promieniowania fal radiowych. Uzyskane wyniki umożliwiają opracowanie metodyki realizacji pomiarów i jednocześnie definiują wymagania na parametry techniczne urządzeń wchodzących w skład stanowiska pomiarowego.

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 we wrześniu 2007 r.

#### LITERATURA

- [1] C. ZIÓŁKOWSKI, J. RAFA, J. M. KELNER, *Lokalizacja źródeł fal radiowych na podstawie sygnałów odbieranych przez ruchomy odbiornik pomiarowy*, Biul. WAT: Nowe Technologie w Telekomunikacji, numer specjalny, vol. 55, WAT, Warszawa, 2006, 67-82.

- [2] J. RAFA, C. ZIÓLKOWSKI, *Influence of transmitter motion on received signal parameters — Analysis of the Doppler effect*, Wave Motion, Elsevier, 2007, doi: 10.1016/j.waremoti.2007.05.003.
- [3] C. ZIÓLKOWSKI, *Zjawisko Dopplera w systemach radiokomunikacji mobilnej*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, KKRRiT'2005, Kraków, 15-17 czerwca 2005, 195-198, CD-ROM.
- [4] M. HATA, T. NAGATSU, *Mobile Location Using Signal Strength Measurements in a Cellular System*, IEEE Transaction on Vehicular Technology, no. 2, vol. 29, May 1980, 245-252.
- [5] A. KÜPPER, *Location-Base-Service; Fundamentals and Operation*, John Wiley & Sons, New York, October 2005.
- [6] J. STEFAŃSKI, *Metody i standardy pozycjonowania terminali w systemach komórkowych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6/2006, Wydawnictwo SIGMA NOT, Warszawa, czerwiec 2006, rocznik 79, 180-185, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, KKRRiT'2006, Poznań, 7-9 czerwca 2006, 484-490, CD-ROM.
- [7] S. ROSŁONIEC, *Metody wyznaczania współrzędnych kątowych wybranego obiektu za pomocą monoimpulsowych urządzeń radiolokacyjnych*, Prace Przemysłowego Instytutu Telekomunikacji, 54, zes. 134, PIT, Warszawa, 2004, 1-18.
- [8] C. ZIÓLKOWSKI, J. M. KELNER, *Lokalizacja źródeł sygnałów radiowych z wykorzystaniem efektu Dopplera*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, KKRRiT'2006, Poznań, 7-9 czerwca 2006, 233-236, CD-ROM.

C. ZIÓLKOWSKI, J. RAFA, J. M. KELNER

### Space-spectral conditions of radio wave sources location based on Doppler effect

**Abstract.** The space-spectral conditions analysis of practical utilization of the radio wave sources location method is presented in this paper. A measurement of the Doppler offset frequency is a basis of the original method. The presented subject matter is continuation of the analysed problem in Ref. 1. The space discretization and accuracy of frequency offset measurement are of essential importance for practical utilization of the Doppler effect in a radio wave sources location. Presented analysis enables us to assess influence of different parameters on accuracy of the radio wave sources location in radio communication systems. The analysis results are the basis for formulation of technical requirements on equipment parameters of the measuring position and for development of measurement methodology.

**Keywords:** mobile radio communication, Doppler effect, location of radio waves sources

**Universal Decimal Classification:** 621.396.93