



Ocena dokładności dopplerowskiej metody lokalizacji źródeł emisji radiowych

CEZARY ZIÓŁKOWSKI, JAN M. KELNER, LESZEK KACHEL

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
Zakład Radiokomunikacji, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Praca poświęcona jest problematyce lokalizacji źródeł emisji fal radiowych przy wykorzystaniu dopplerowskich zmian częstotliwości, będących wynikiem ruchu stanowiska pomiarowego. Przedstawione zostały zależności analityczne, stanowiące podstawę teoretyczną oraz wybrane wyniki pomiarów umożliwiające ocenę skuteczności opracowanej metody. Opis struktury ruchomego stanowiska pomiarowego i problematyka doboru parametrów pomiarowych warunkujących minimalizację błędu lokalizacji źródeł emisji stanowi zasadniczy zakres tematyczny pracy. Prezentowane wyniki wstępnych badań empirycznych, zrealizowanych przy użyciu opracowanego stanowiska i metodyki pomiarowej, stanowią podstawę do oceny skuteczności metody lokalizacji źródeł emisji wykorzystującej pomiar zmian częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału.

Słowa kluczowe: radiokomunikacja mobilna, efekt Dopplera, lokalizacja źródeł fal radiowych, dopplerowska metoda lokalizacji

Symbole UKD: 621.396.93

1. Wprowadzenie

Wszystkie dotychczas stosowane w praktyce metody lokalizacji źródeł emisji bazują na jednej z dwóch grup metod:

- metody wykorzystujące pomiar czasu propagacji fali pomiędzy źródłem sygnału a stanowiskami pomiarowymi o znanym przestrzennym położeniu,
- metody bazujące na wyznaczaniu przez stanowiska pomiarowe o znanym przestrzennym położeniu kierunków (namiarów) na lokalizowane źródło sygnału.

Wykorzystanie metod należących do pierwszej z wyżej wymienionych grup możliwe jest tylko w przypadku, gdy lokalizowane źródło sygnału jest jednym z elementów funkcjonujących w danym systemie radiokomunikacyjnym. W tym przypadku niezbędna jest bowiem znajomość struktury czasowo-częstotliwościowej transmitowanych sygnałów. Metody należące do drugiej grupy znajdują zastosowanie w przypadku pełnej niezależności systemu realizującego procedurę namiaru od systemów, w którym funkcjonuje lokalizowane źródło emisji. Jednakże w tym przypadku wyznaczenie kierunku na promieniujące źródło 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. Dlatego dąży się do opracowania nowych metod, które przyczynią się do uproszczenia zarówno procedur, jak i stanowisk pomiarowych. Jedną z takich możliwości stwarza pomiar częstotliwości chwilowej sygnału odbieranego przez poruszający się odbiornik pomiarowy.

W wyniku ciągłych zmian położenia pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem występują zmiany parametrów odbieranego sygnału. Zakładając liniowy charakter systemu antenowego ($\mathbf{i} = (0, 0, i)$) oraz stałą prędkość $\mathbf{v} = (v, 0, 0)$ przemieszczania się źródła sygnału (wzdłuż kierunku zmiennej x), wektor natężenia pola elektrycznego ma postać $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = (0, 0, E)$, natomiast częstotliwość Dopplera opisana jest zależnością [1, 2]:

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

gdzie: $k = \frac{v}{c}$, c — prędkość światła.

Analizując powyższe wyrażenie, można stwierdzić, że wartość dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości zależy nie tylko od prędkości ruchu i częstotliwości źródła sygnału, lecz także od położenia odbiornika względem trajektorii ruchu nadajnika. Dystynktywny charakter przebiegu krzywych dopplerowskich względem położenia źródeł emitujących fale elektromagnetyczne przedstawiono między innymi w publikacjach [2, 3]. Zróznicowany przebieg krzywych dopplerowskich, charakterystyczny dla każdego usytuowania źródła sygnału, stanowi istotę metody wykorzystania wartości chwilowej częstotliwości do przestrzennej lokalizacji źródeł promieniowania fal radiowych.

Korzystając z wyrażenia (1), można wyprowadzić zależności na poszczególne współrzędne x , y , z położenia nadajnika względem początkowego usytuowania odbiornika. Przyjmując, że odbiornik przemieszcza się na ustalonej wysokości ($y = y_0 = \text{const}$), w tym przypadku problem sprowadza się do wyznaczenia współrzędnych x i z . Wyznaczając wartości dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości

dla dwóch różnych momentów czasu t_1 i t_2 oraz dokonując elementarnych przekształceń równania (1), otrzymujemy zależności na współrzędne x i z położenia źródła sygnału [5, 2, 3, 4]:

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

gdzie wielkość A opisana jest wzorem:

$$A(t) = \frac{\sqrt{1 - F^2(t)}}{F(t)}, \quad F(t) = \frac{f_D(t) 1 - k^2}{f_0 k} - k. \quad (3)$$

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

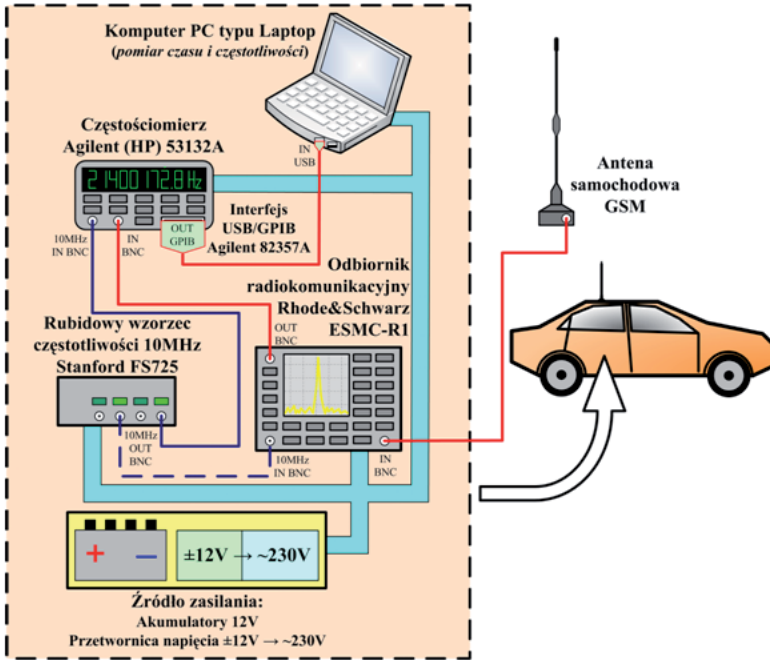
Opracowana metoda lokalizacji wykorzystująca efekt Dopplera została poddana badaniom symulacyjnym. Ich celem była ocena wartości błędu wnoszonego przez opracowaną metodę oraz określenie wymagań na wartości parametrów pomiarowych minimalizujących dokładność lokalizacji położenia źródła emitującego falę radiową. Uzyskane wyniki, ukazujące znaczną poprawę dokładności lokalizacji obiektów radiowych w porównaniu do dotychczas stosowanych metod, przedstawiono między innymi w publikacjach [6, 7, 8, 9]. Praktyczny aspekt pokazujący efektywność wykorzystania opracowanej metody w ratownictwie morskim przedstawiono w referacie [10].

Wyniki otrzymywane w trakcie badań symulacyjnych pokazują dużą efektywność metody w zakresie dokładności lokalizacji i prostoty systemu pomiarowego. Jednocześnie stanowią uzasadnienie potrzeby przeprowadzenia badań empirycznych w rzeczywistych warunkach pomiarowych. Ich realizacja uwarunkowana jest budową ruchomego stanowiska pomiarowego, którego zasadniczy cel stanowi pomiar zmian częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału emitowanego przez lokalizowane źródło.

2. Struktura stanowiska pomiarowego

Teoretyczno-symulacyjna analiza możliwości nowej metody doprowadziła do zestawienia stanowiska pomiarowego umożliwiającego weryfikację metody na gruncie empirycznym. Z zależności (2) można wnioskować, że oprócz pomiaru wartości częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału przez poruszające się stanowisko pomiarowe, danymi wejściowymi niezbędnymi do określenia współrzędnych

położenia są następujące parametry: kierunek i prędkość ruchu oraz dowiązanie punktu odniesienia do współrzędnych geograficznych. Wymagania te narzuciły strukturę stanowiska pomiarowego, którą przedstawiono na rysunku 1.

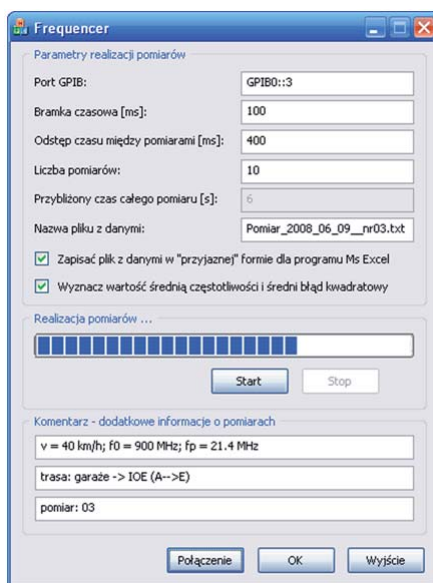


Rys. 1. Struktura stanowiska do lokalizacji źródeł sygnałów radiowych

- Elementy stanowiska umieszczone na samochodzie osobowym stanowiły:
- *Compact Receiver Rhode&Schwarz ESMC-R1* — odbiornik sygnału na częstotliwości 900 MHz, z wyjściem sygnału na częstotliwości pośredniej 21,4 MHz;
 - *Universal Frequency Counter Agilent (HP) 53132A* — częstociomierz odpowiadający za pomiar częstotliwości sygnału odbieranego z wyjścia sygnału częstotliwości pośredniej (21,4 MHz) odbiornika;
 - *Rubidium Frequency Standard Stanford Research System FS725* — wysoko-stabilne źródło sygnału harmonicznego 10 MHz pracujące jako wzorzec częstotliwości podłączony do miernika częstotliwości lub odbiornika (odpowiada za zwiększenie dokładności pomiarów częstotliwości odbieranego sygnału);
 - *MagTel GSM Car Antenna* — zewnętrzna antena samochodowa (z podstawką magnetyczną) wykorzystywana w telefonii komórkowej GSM;

- *USB-GPIB Interface Agilent 82357A* — interfejs przejściowy USB-GPIB, za pomocą którego dokonywany jest zapis na komputerze pomiarów częstotliwości z miernika 53132A;
- mikrokomputer typu laptop — służący do zapisu danych pomiarowych, tj. częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału oraz bieżącej skali czasu;
- przetwornica napięcia oraz układ akumulatorów odpowiadających za zasilanie urządzeń stanowiska.

Pomiary częstotliwości chwilowej realizowane są na częstotliwości pośredniej odbiornika wynoszącej 21,4 MHz. Do pomiaru wykorzystywany jest częstościomierz sterowany poprzez interfejs GPIB. Mierzone wartości częstotliwości chwilowej rejestrowane są na komputerze poprzez interfejs przejściowy USB-GPIB. Na potrzeby stanowiska pomiarowego wykonano oprogramowanie przy wykorzystaniu *Microsoft Visual C++ .NET 2002 Standard Edition*. Program *Frequencer*, którego panel główny przedstawia rysunek 2, ma za zadanie sterować podstawowymi funkcjami częstościomierza oraz rejestrację i zapis do pliku wartości częstotliwości odbieranego sygnału. Program zapewnia wyznaczanie skali czasu oraz ustawianie bramki czasowej częstościomierza, odstępu pomiędzy próbkami i liczby wykonywanych pomiarów. W zrealizowanych badaniach empirycznych bramka czasowa wynosiła 5 ms.

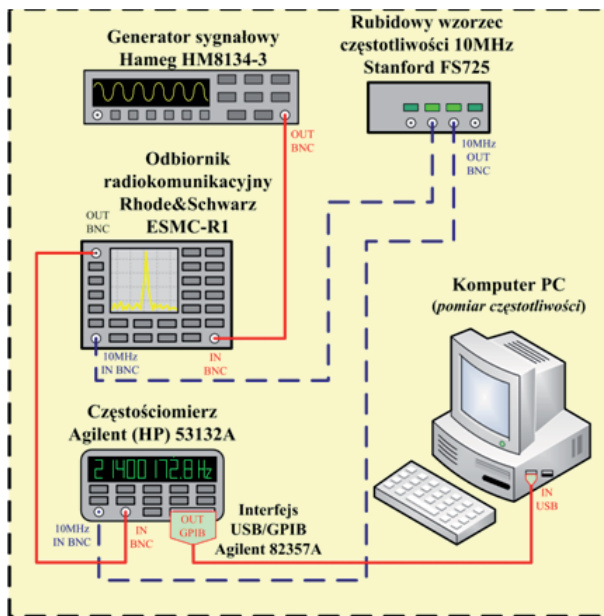


Rys. 2. Panel sterowania programu *Frequencer*

3. Parametry pomiarowe

Zasadniczym celem wstępnych pomiarów było wyznaczenie wartości parametrów realizacji pomiarów zapewniających maksymalną dokładność odczytu częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału. W tym celu wykonano walidację stanowiska, polegającą na określeniu: sposobu synchronizacji elementów stanowiska, wpływu czasu τ_B akwizycji danych pomiarowych oraz wpływu poziomu sygnału wejściowego U_{WE} odbiornika na dokładność pomiaru częstotliwości, wyrażoną odchyleniem standardowym σ_f .

W trakcie realizacji pomiarów laboratoryjnych stanowisko połączone było w sposób bezpośredni ze źródłem sygnału. Jako źródło wykorzystano generator *Hameg HM8134-3*. Schemat stanowiska laboratoryjnego, za którego pomocą wyznaczono przedstawione powyżej parametry, zilustrowano na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego do badań laboratoryjnych

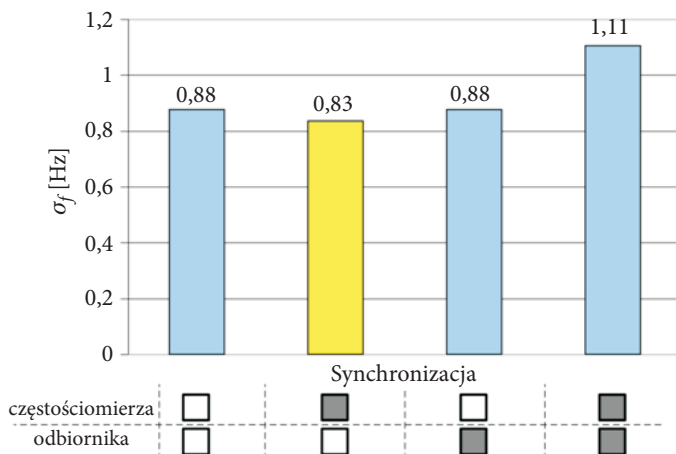
Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone dla sygnału harmonicznego o częstotliwości 900 MHz. Wybór częstotliwości typowej dla sieci komórkowych GSM, podyktowany był możliwością oceny porównawczej dokładności lokalizacji opracowanej metody z metodami wykorzystywanymi w sieciach komórkowych.

Na etapie badań laboratoryjnych oceny wpływu poszczególnych ustawień dokonywano w oparciu o pomiar wartości średniej \bar{f} częstotliwości sygnału na wyjściu pośredniej częstotliwości odbiornika oraz odchylenia standardowego σ_f

od wartości średniej. W dalszej części artykułu, wyznaczane odchylenia standardowe σ_f dla $N = 100$ pomiarów wartości chwilowych jest tożsame z pojęciem dokładności (lub błędu) odczytu częstotliwości.

3.1. Wpływ synchronizacji elementów stanowiska na dokładność pomiaru częstotliwości

W opracowanej metodzie duże znaczenie ma pomiar wartości częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału z możliwie dużą dokładnością. Dlatego zdecydowano się synchronizować poszczególne elementy stanowiska (odbiornik lub częstotściomierz) rubidowym wzorcem częstotliwości. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki wpływu synchronizacji poszczególnych urządzeń.

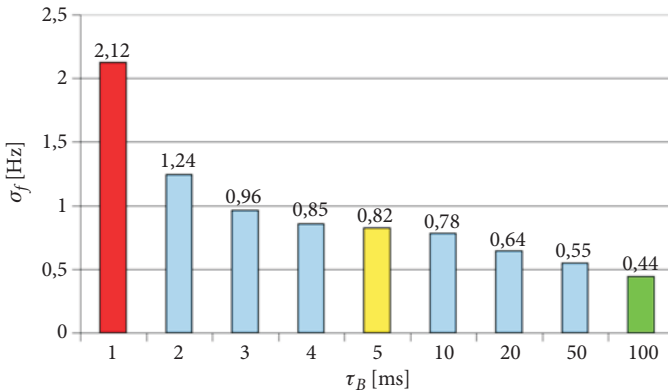


Rys. 4. Wpływ synchronizacji elementów stanowiska na dokładność pomiaru częstotliwości σ_f

Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że odbiornik i częstotściomierz wykorzystane w stanowisku, są urządzeniami charakteryzującymi się stabilnością krótkookresową, która jest rzędu $10^{-7} \div 10^{-8}$. Dodatkowo synchronizowanie tych urządzeń wzorcem częstotliwości nie jest konieczne. Nieznaczne polepszenie dokładności odczytu częstotliwości uzyskuje się jedynie przy synchronizacji częstotściomierza, dlatego w dalszej części realizowanych badań tylko miernik Agilent 53132A był stabilizowany rubidowym wzorcem częstotliwości.

3.2. Wpływ czasu akwizycji danych pomiarowych na dokładność odczytu częstotliwości

Celem badań w zakresie czasu akwizycji danych pomiarowych było wyznaczenie minimalnego odstępu pomiarowego τ_B (czyli czasu bramkowania pomiarów) zapewniającego uzyskanie minimalnej wartości błędu σ_f pomiaru częstotliwości. Wyniki uzyskanych pomiarów przedstawiono na rysunku 5.



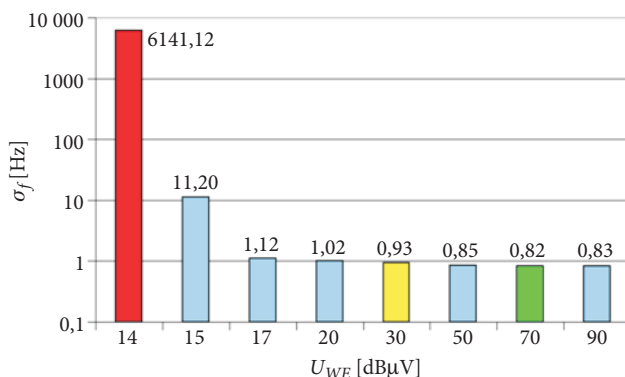
Rys. 5. Wpływ czasu τ_B akwizycji danych pomiarowych na dokładność pomiaru częstotliwości σ_f

Na podstawie otrzymanych wyników, można stwierdzić, że zapewnienie błędu poniżej 1 Hz wymaga zastosowania czasu bramkowania danych pomiarowych wynoszącego minimum 3 ms. W badaniach empirycznych wykorzystano czas akwizycji danych pomiarowych wynoszący 5 ms. Wybór takiej wartości uwarunkowany był prędkością przemieszczania stanowiska pomiarowego (około 40 km/h) [11].

3.3. Wpływ poziomu sygnału na wejściu odbiornika

Istotne znaczenie na dokładność pomiaru częstotliwości chwilowej ma poziom odbieranego sygnału. Jego pomiar stanowi podstawę do oceny minimalnej wartości sygnału warunkującej uzyskanie danych pomiarowych z określoną dokładnością. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 6.

Z powyższego rysunku wynika, że zapewnienie dokładności odczytu częstotliwości poniżej 1 Hz wymaga poziomu sygnału około 20 dB μ V na wejściu odbiornika. Należy podkreślić, że wyniki te uzyskano dla toru przewodowego — połączenie generatora sygnału i odbiornika za pomocą przewodu (rys. 3). Przeprowadzono również podobne badania dla toru radiowego — do przesłania sygnału od generatora do odbiornika radiokomunikacyjnego wykorzystano dwie anteny *MagTel GSM Car Antenna*. W tym przypadku progowa wartość poziomu sygnału wynosiła 30 dB μ V, co zostało wykorzystane w trakcie przeprowadzonych badań empirycznych.



Rys. 6. Wpływ poziomu sygnału U_{WE} na wejściu odbiornika pomiarowego na dokładność pomiaru częstotliwości σ_f

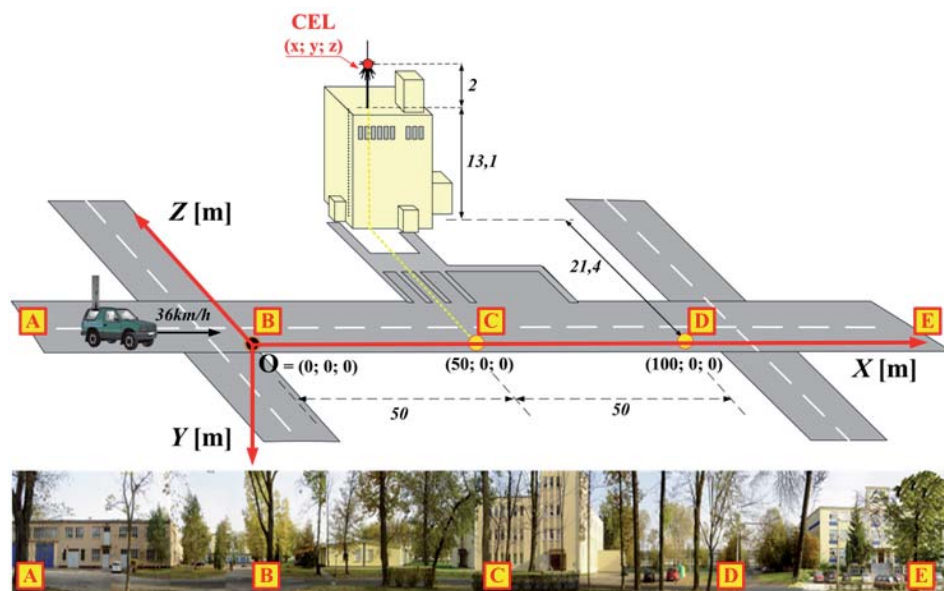
4. Ocena mobilnego stanowiska pomiarowego na podstawie dokładności lokalizacji źródła sygnału

4.1. Scenariusz pomiarowy

Wstępne badania empiryczne wykonano na jednej trasie pomiarowej, której strukturę przedstawiono na rysunku 7. Jako źródło sygnału wykorzystano generator *Programmable Synthesizer Hameg HM8134-3*, podłączony do anteny (pracującej w paśmie 13-1300 MHz) *Diamond Antenna D130*, poprzez wzmacniacz sygnału radiowego *Amplifier Research 5SIG4M4*. Nadajnik ze wzmacniaczem umieszczono w sali wykładowej na drugim piętrze, natomiast antena nadawcza znajdowała się na dachu budynku. Stanowisko do lokalizacji zamontowane było w samochodzie osobowym, który przemieszczał się po wybranej trasie. Trasę pomiarową oraz współrzędne usytuowania źródła sygnału względem przyjętego układu współrzędnych przedstawiono na rysunku 7.

Przed zasadniczą częścią realizacji procesu pomiarowego, za pomocą dalmierza laserowego wykonano pomiary odległości charakterystycznych punktów trasy oraz wyznaczono współrzędne położenia anteny źródła sygnału (x_0, y_0, z_0) . Otrzymane wyniki stanowiły podstawę do określenia dokładności lokalizacji źródła sygnału przy wykorzystaniu wykonanego stanowiska pomiarowego.

Na rysunku 7 zaznaczono charakterystyczne punkty (A÷E) mające istotne znaczenie dla realizacji procedury pomiarowej. Przed każdorazowym przejazdem po trasie pomiarowej, w punkcie A dokonywano ustawienia poziomu nadawanego sygnału na częstotliwości 900 MHz. Regulacja poziomu nadawanego sygnału dokonywana przez operatora źródła sygnału odbywała się na podstawie danych odczytywanych z odbiornika. Informacja o aktualnym poziomie odbieranego sygnału przekazywana



Rys. 7. Scenariusz pomiarowy

była zwrotnie poprzez radiotelefon. Moc nadawanego sygnału ustawiano, tak aby w punkcie A w odbiorniku jego poziom wynosił minimum 30 dB μ V.

Przed wykonaniem właściwych pomiarów dokonywano pomiaru średniej częstotliwości odbieranego sygnału w warunkach statycznych. W tym celu za pomocą programu *Frequencer* (rys. 2) stukrotnie mierzono wartość częstotliwości odbieranego sygnału. Następnie pojazd ze stanowiskiem rozpędzany był na odcinku A÷B do prędkości około 40 km/h. Za pomocą programu *Frequencer* rejestrowano częstotliwość odbieranego sygnału oraz skalę czasu, ze szczególnym uwzględnieniem mijanych punktów kontrolnych B, C, D. W trakcie właściwych pomiarów, na odcinku B÷D, starano się, aby pojazd przemieszczał się ze stałą prędkością około 40 km/h. Na odcinku D÷E samochód był wyhamowywany.

Na końcu trasy pomiarowej, w punkcie E ponownie dokonywano pomiaru średniej częstotliwości nadawanego sygnału (jak w punkcie A). Miało to na celu stwierdzenie ewentualnego trendu wartości częstotliwości odbieranego sygnału, wynikającego z niestabilności źródła sygnału radiowego. Jak wykazały zrealizowane w punktach A i E pomiary, nie stwierdzono na tyle istotnie dużych zmian wartości średniej częstotliwości odbieranego sygnału, aby zachodziła potrzeba uwzględniania niestabilności w procesie analizy danych pomiarowych.

Przetwarzanie wyników polegało na uzyskaniu wartości częstotliwości Dopplera oraz na wyodrębnieniu danych tylko na trasie pomiędzy punktami B÷D. Częstotliwość Dopplera uzyskano poprzez odjęcie wartości częstotliwości mierzonych na trasie pomiarowej i wartości średniej częstotliwości zarejestrowanej i wyznaczonej

w punkcie A. Wyodrębnienie danych z odcinka trasy B÷D wykonano na podstawie danych zarejestrowanych przy pomocy programu *Frequencer*. Na podstawie pomiaru czasu zweryfikowano średnią wartość prędkości samochodu na odcinku B÷D. Wartość ta wynosiła około 36 km/h (tab. 1 i 2).

TABELA 1

Wyniki pomiarów dla trasy A→E i dla położenia źródła $(x_0; y_0; z_0) = (50; -13,4; 21,4)$ m

Numer przejazdu	Średnia prędkość pojazdu na odcinku B-D	Uśrednione wartości współrzędne położenia źródła sygnału		Błędy wyznaczenia uśrednionych wartości współrzędnych położenia		Błąd lokalizacji
	v [km/h]	x [m]	z [m]	Δx [m]	Δz [m]	ΔR [m]
1	36,00	49,51	21,88	0,49	0,48	0,69
3	36,00	49,35	21,17	0,65	0,23	0,69
5	36,99	50,04	21,46	0,04	0,06	0,07
7	36,00	49,34	20,87	0,66	0,53	0,85
9	36,00	50,79	21,99	0,79	0,59	0,99
11	35,06	50,39	21,69	0,39	0,29	0,49
13	36,00	49,66	21,42	0,34	0,02	0,34
15	35,53	49,64	21,05	0,36	0,35	0,50
17	36,00	49,82	21,95	0,18	0,55	0,58
19	36,00	49,98	21,83	0,02	0,43	0,43
średnia:	35,96	49,85	21,53	0,39	0,35	0,56

TABELA 2

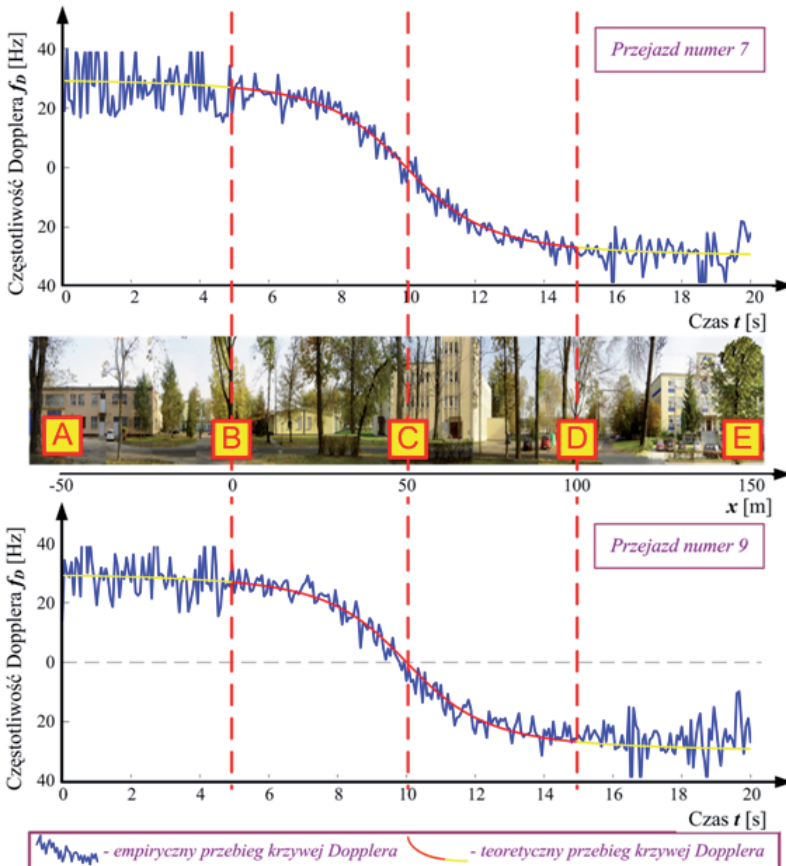
Wyniki pomiarów dla trasy E→A i dla położenia źródła $(x_0; y_0; z_0) = (50; -13,4; -21,4)$ m

Numer przejazdu	Średnia prędkość pojazdu na odcinku D-B	Uśrednione wartości współrzędne położenia źródła sygnału		Błędy wyznaczenia uśrednionych wartości współrzędnych położenia		Błąd lokalizacji
	v [km/h]	x [m]	z [m]	Δx [m]	Δz [m]	ΔR [m]
2	35,06	49,82	-21,11	0,18	0,11	0,21
4	36,24	48,96	-20,82	1,04	0,18	1,06
6	34,18	50,53	-20,70	0,53	0,30	0,61
8	36,24	49,98	-21,91	0,02	0,91	0,91
10	36,24	50,11	-21,07	0,11	0,07	0,13
12	36,00	50,63	-21,32	0,63	0,32	0,71
14	35,29	50,71	-21,68	0,71	0,68	0,98
16	36,24	50,25	-21,07	0,25	0,07	0,26
18	36,00	49,77	-21,64	0,23	0,64	0,68
20	34,18	50,07	-20,55	0,07	0,45	0,46
średnia:	35,57	50,08	-21,19	0,38	0,37	0,60

Po każdorazowym przejeździe od punktu A do E (numery nieparzyste przejazdów w tabelach wyników), dokonywano również adekwatnych pomiarów na trasie powrotnej — od punktu E do A (numery parzyste przejazdów).

4.2. Wyniki pomiarów

Badania empiryczne przeprowadzono na trasie od punktu A do E dla położenia źródła $(x_0, y_0, z_0) = (50; -13,4; 21,4)$ m względem przyjętego początku układu współrzędnych w punkcie B oraz dla trasy od E do A: $(x_0, y_0, z_0) = (50; -13,4; -21,4)$ m — w punkcie D (rys. 7). Na podstawie danych zarejestrowanych za pomocą programu *Frequencer* wyznaczono czasy Δt_1 , Δt_2 i $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ przebycia charakterystycznych odcinków trasy pomiarowej B÷C, C÷D oraz B÷D (rys. 7). Na podstawie wyznaczonych czasów określono średnią prędkość pojazdu (tab. 1 i 2). Dane zarejestrowane przez program *Frequencer* umożliwiły wyznaczenie przebiegów częstotliwości Dopplera w funkcji czasu i przebytej drogi. Przykładowe przebiegi przedstawiono na rysunku 8. Zarejestrowane w trakcie pomiarów zmiany często-



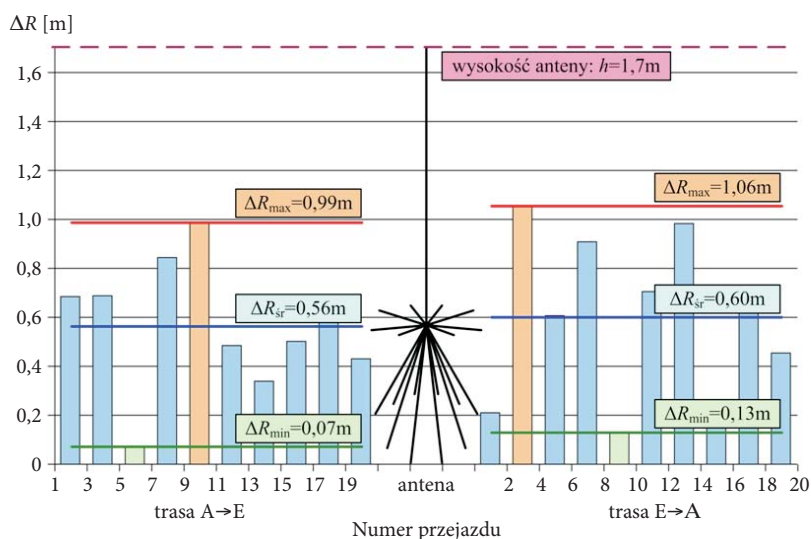
Rys. 8. Przykładowe przebiegi empirycznych i teoretycznych krzywych Dopplera wzdłuż trasy A→E zrealizowane na podstawie przeprowadzonych pomiarów

tliwości chwilowej sygnału mają nieregularny charakter. Jest to wynikiem z jednej strony występujących w środowisku pomiarowym zakłóceń addytywnych, z drugiej zaś — jest efektem niejednorodności przestrzennej otoczenia trasy pomiarowej, co skutkuje występowaniem zjawisk odbicia i dyfrakcji.

Na podstawie przebiegów częstotliwości Dopplera wyznaczono uśrednione wartości współrzędnych położenia x, z źródła sygnału w przyjętym układzie współrzędnych. Te dane posłużyły do obliczenia wartości błędów współrzędnych $\Delta x, \Delta z$ oraz błędów lokalizacji ΔR , które wyznaczono na podstawie poniższych zależności [3, 4]:

$$\Delta x = |x - x_0|, \quad \Delta z = |z - z_0|, \quad \Delta R = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta z)^2}. \quad (4)$$

Wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań empirycznych zestawiono w tabelach 1 (dla trasy A→E) i 2 (dla trasy E→A). Uzyskane wartości błędów lokalizacji przedstawiono na rysunku 9, porównując je z wymiarami anteny nadawczej *Diamond Antenna D130*.



Rys. 9. Porównanie wartości błędów ΔR lokalizacji dla poszczególnych przejazdów na trasach A→E i E→A z wysokością h anteny nadawczej

5. Podsumowanie

Opracowane i wykonane stanowisko pomiarowe stanowi podstawę do oceny możliwości lokalizacji źródeł emisji w warunkach występujących w rzeczywistym środowisku pomiarowym. Przeprowadzone wstępne pomiary umożliwiły dobór parametrów pomiarowych warunkujących uzyskanie minimalnego błędu pomiaru

częstotliwości chwilowej odbieranego sygnału. Wyniki otrzymane na podstawie pomiarów w rzeczywistym środowisku pomiarowym umożliwią ilościową ocenę dokładności lokalizacji źródeł emisji przy wykorzystaniu mobilnego stanowiska pomiarowego. Jak wynika z rezultatów zawartych w tabelach 1 i 2, nawet maksymalna wartość błędu lokalizacji, wynosząca 1,06 m, nie przekracza 2/3 wartości wysokości anteny, będącej źródłem pola elektromagnetycznego. Dowodzi to, że wykorzystanie efektu Dopplera umożliwi znaczną poprawę dokładności lokalizacji źródeł emisji w porównaniu z dotychczas stosowanymi metodami [6, 7, 8, 9]. Należy przy tym również podkreślić, że opracowane stanowisko może stanowić w pełni autonomiczny układ warunkujący lokalizację promieniujących obiektów. Dla zapewnienia pełnej niezależności realizacji procedur pomiarowych od wyboru trasy planuje się doposażenie zaprojektowanego stanowiska w odbiornik GPS i dokładny system pomiaru bieżącej prędkości pojazdu.

Artykuł wpłynął do redakcji 8.01.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2009 r.

LITERATURA

- [1] J. RAFA, C. ZIÓLKOWSKI, *Influence of transmitter motion on received signal parameter — Analysis of the Doppler effect*, Wave Motion, 45, 3, Elsevier, January 2008, 178-190.
- [2] C. ZIÓLKOWSKI, J. RAFA, J. M. KELNER, *Lokalizacja źródeł fal radiowych na podstawie sygnałów odbieranych przez ruchomy odbiornik pomiarowy* [Location of radio waves sources on the basis of the received signals by mobile measurement receiver], Biul. WAT, Nowe Technologie w Telekomunikacji, 55, nr spec., Warszawa, 2006, 67-82.
- [3] P. GAJEWSKI, J. M. KELNER, C. ZIÓLKOWSKI, *Subscriber location in radio communication nets*, Journal of Telecommunications and Information Technology, 2, Instytut Łączności, Warszawa, 2008, 88-92.
- [4] J. M. KELNER, C. ZIÓLKOWSKI, L. KACHEL, *The empirical verification of the location method based on the Doppler effect*, 17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON'2008, Wrocław, 19-21.05.2008, materiały konferencyjne, vol. 3, CD-ROM, Państwowy Instytut Telekomunikacji, 755-758.
- [5] C. ZIÓLKOWSKI, J. RAFA, J. M. KELNER, *Sposób namiaru i lokalizacji źródeł przestrzennych fal radiowych z wykorzystaniem efektu Dopplera*, zgłoszenie patentowe nr P 381154 z dnia 27.11.2006, Biuletyn Urzędu Patentowego, 12, 899, vol. 36, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa, 09.06.2008.
- [6] Y. ZHAO, *Standardization of mobile phone positioning for 3G systems*, IEEE Communications Magazine, 40, 7, July 2002, 108-116.
- [7] M. VOSSIEK, L. WIEBKING, P. GULDEN, J. WIEGHARDT, C. HOFFMANN, P. HEIDE, *Wireless local positioning*, IEEE Microwave Magazine, 4, 4, December 2003, 77-86.
- [8] I. J. GUPTA, *Stray signal source location in far-field antenna/RCS ranges*, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 46, 3, June 2004, 20-29.
- [9] J. STEFAŃSKI, *Metody i standardy pozycjonowania terminali w systemach komórkowych*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, KKRRiT'2006, Poznań, 07-09.06.2006, 484-490, CD-ROM; Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, vol. 79, 6,

Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych Sigma-NOT, Warszawa, czerwiec 2006, 180-185.

- [10] C. ZIÓŁKOWSKI, J. M. KELNER, *Zastosowanie dopplerowskiej metody oceny położenia obiektów w ratownictwie morskim [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 (VI Międzynarodowa Konferencja na temat: Perspektywy i Rozwój Systemów Ratownictwa, Bezpieczeństwa i Obronności w XXI Wieku), RSDS'2008, Gdańsk, 25-26.06.2008; *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 49, K/2(172)/2008, Gdynia, Wydawnictwo Akademickie Akademii Marynarki Wojennej, 93-103.
- [11] C. ZIÓŁKOWSKI, J. M. KELNER, *Wpływ dynamiki ruchu odbiornika pomiarowego na dokładność lokalizacji źródeł fal radiowych*, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, KKRRiT'2007, Gdańsk, 13-15.06.2007, CD-ROM; *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej — Radiokomunikacja, Radiofonia i Telewizja*, 1, Politechnika Gdańska, 293-296.

C. ZIÓŁKOWSKI, J. M. KELNER, L. KACHEL

Accuracy assessment of Doppler location method

Abstract. In this paper, the problem location of radio signal source using Doppler effect is described. Theoretical base as analytical formulas and chosen measurement results are presented. It is assessment base of worked out location method efficacy. The mobile test-bed structure and measurement parameters selection are presented. Location error minimization of signal source emission is criterion of selection measurement parameters. Measurement road and structure of system test with space dimensions of system elements location are described. In the paper, an efficacy assessment of worked out mobile test-bed is described. Precision assessment of Doppler location method is presented on a base of the empirical results.

Keywords: mobile radio communication, Doppler effect, location of radio signal sources, Doppler location method

Universal Decimal Classification: 621.396.93

