

Jan MATUSZEWSKI

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT RADIOELEKTRONIKI WYDZIAŁU ELEKTRONIKI
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Błędy lokalizacji źródeł emisji sygnałów w systemie rozpoznania elektronicznego

Dr inż. Jan MATUSZEWSKI

Absolwent Wydziału Cybernetyki WAT. Od 1972 roku zatrudniony na stanowisku asystenta a od 1984 jako adiunkt na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Bieżące zainteresowania łączą się z badaniem specyficznych właściwości parametrów sygnałów radarowych, rozpoznawaniem i identyfikacją ich źródeł promieniowania dla potrzeb systemów rozpoznania i walki elektronicznej. Współautor kilku projektów urządzeń i systemów z dziedziny rozpoznania elektronicznego wdrożonych do produkcji.



e-mail: jmatuszewski@wat.edu.pl

Streszczenie

W artykule podano niezbędne zależności matematyczne potrzebne do obliczenia pozycji źródła emisji sygnałów (ZE) na podstawie namiarów. Przedstawiono następujące rodzaje błędów: kątowy, eliptyczny i geometryczny. Oceny dokładności określania pozycji ZE dokonano na podstawie badań symulacyjnych. Z wyników obliczeń wynika, że dokładność lokalizacji ZE jest różna w badanych punktach przestrzeni obserwacji i zależy od sposobu rozmieszczenia namierników, ich odległości do ZE oraz wzajemnego usytuowania.

Słowa kluczowe: lokalizacja źródła emisji, błędy lokalizacji, rozpoznanie elektroniczne, system ESM/ELINT.

Emitter location errors in an electronic intelligence system

Abstract

The paper presents one of the basic methods used in electronic warfare (EW) systems to locate emitters (electromagnetic sources) on the basis of bearings. There are described three types of errors (circular, elliptical and geometric) which are used in calculations of the emitter location. The appropriate mathematical formulas are presented. For two direction-finding stations the point at which these lines of bearing cross is the emitter location, for three sensors this point is within the triangle. The accuracy of emitter location is normally specified in terms of measurement errors. In the angle measuring system these errors are angular while in distance measuring systems they are linear. The main research problem was to examine in which way the accuracy of emitter location and location errors depend on the direction-finding stations and emitter location, the distances between them, the value of the root mean error of bearings measurement, the number of measurements and used direction-finding stations. A particularly important element of this study was the selection process of the suitable location of direction-finding stations to improve the accuracy of emitter location. Calculations on the basis of simulated data confirmed that the accuracy of the emitter location depends on the way in which the direction-finding stations are placed in the terrain and the distances between these stations and the emitter. The results allowed determining the factors influencing the correctness of the emitter location in the triangulation method.

Keywords: emitter location, location errors, electronic intelligence, ESM/ELINT system.

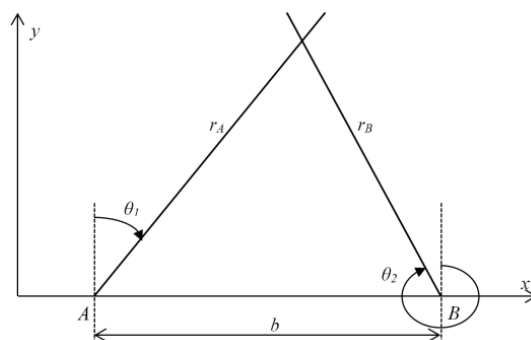
1. Wstęp

Najczęściej w systemach rozpoznania i walki elektronicznej (WE) wykorzystuje się namiary z kilku (minimum dwóch) punktów pomiarowych (namierników) w celu określenia pozycji źródła emisji elektromagnetycznej (ZE). Namiarem θ nazywa się kąt zawarty między kierunkiem północnym południka geograficznego a kierunkiem na pracujące źródło – linią namiaru, będącą linią położenia.

Północ geograficzna stanowi tu kierunek odniesienia. Namiar określany jest prawoskrętnie (zgodnie z ruchem wskazówek zegara) od kierunku odniesienia. Określenie namiaru jest pierwszym krokiem wykorzystywanym w wielu metodach pelengacyjnych i algorytmach lokalizacji ZE.

2. Określenie pozycji źródła emisji na płaszczyźnie

Metody określania pozycji ZE w systemach rozpoznania i WE są najczęściej metodami radiolokacji pasywnej, która charakteryzuje się tym, że można określać położenie tylko tych obiektów, które promieniują energię elektromagnetyczną [1, 2]. Jeżeli ZE znajduje się na płaszczyźnie, to do określenia jego pozycji (miejsca położenia) wystarczą pomiary tylko dwóch namiarów θ_1 , θ_2 z dwóch punktów odbioru, rozmieszczonych w odległości b . Pozycja ZE określona jest przez punkt przecięcia się dwóch półprostych, tzn. linii namiarów, będących liniami położenia, rys. 1.

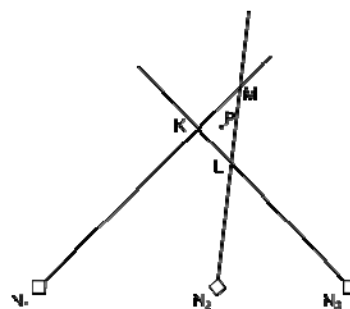


Rys. 1. Wyznaczenie pozycji źródła emisji na podstawie dwóch namiarów
Fig. 1. Calculation of the emitter location on the basis of two bearings

Odległość r_A od punktu A do ZE można obliczyć ze wzoru:

$$r_A = \frac{b}{\sin\theta_1 - \cos\theta_1 \tan\theta_2} \quad (1)$$

W przypadku dokonywania namiaru na ZE położonego w punkcie P przez trzy namierniki (rys. 2), linie namiarów tworzą trójkąt błędu, jednakże faktyczne położenie źródła nie musi się znajdować wewnątrz tego trójkąta, co jest spowodowane różnicami znaku wartości bezwzględnej błędu kąтового [2].



Rys. 2. Przecięcie się linii namiarów trzech namierników
Fig. 2. The bearing crossing from three direction-finding stations

Szczegółowa analiza wskazuje, że ZE znajduje się wewnątrz wieloboku błędu tylko z prawdopodobieństwem równym 1/3. W rzeczywistych warunkach określania miejsca położenia źródła emisji sygnału, tak jak w każdych innych pomiarach pojawia się

problem występowania błędów, z których najważniejsze to błędy będące następstwem dokładności namierników związane z pomiarami oraz błędy określania pozycji punktów pomiarowych (namierników).

Każda wyznaczana pozycja ZE jest obciążona błędem, będącym generalnie funkcją wszystkich błędów zachodzących w systemie oraz wprowadzonych przez otoczenie do systemu. Ponieważ pomiar każdego namiaru obciążony jest błędem, więc w wyniku obliczenia pozycji tego samego ZE na podstawie wielu różnych namiarów otrzymamy zbiór punktów, który utworzy na płaszczyźnie pewien obszar zwany obszarem nieokreśloności (nieoznaczoności), w którym z określonym prawdopodobieństwem znajduje się będące wykryte ZE [3, 4]. Ocenę dokładności określania pozycji źródła emisji dokonuje się tutaj na podstawie analizy statystycznej wyników pomiarów.

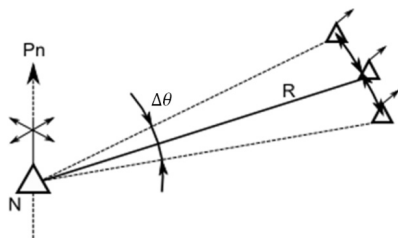
3. Analiza czynników mających wpływ na dokładność określania pozycji źródła emisji

Dokładność pomiaru namiaru (pelengu, azymutu) na ZE jest określona przez błąd kątowy namierzania, w którym rozróżnia się następujące rodzaje błędów [2]:

- błąd pojedynczego namiaru - różnica między namiarem rzeczywistym a pomierzonym, otrzymana w trakcie jednokrotnego namierzania;
- błąd maksymalny - największa wartość bezwzględna błędu pojedynczego namiaru;
- błąd średni arytmetyczny - suma wartości błędów pojedynczych namiarów (bez uwzględnienia znaków) podzielona przez liczbę namiarów;
- błąd średniokwadratowy - równoważny odchyleniu standardowemu;
- błąd średni (prawdopodobny) - charakteryzuje się tym, że połowa namiarów obciążona jest błędem kątowym mniejszym od wartości błędu średniego, natomiast pozostałe większym. Prawdopodobieństwo wystąpienia takiego błędu wynosi 0.5.

Z powodu występowania błędów kątowych przy pomiarze azymutu, kierunek wskazany przez namiernik należy rozpatrywać nie jako linię, lecz jako sektor o kącie wierzchołkowym równym wartości błędu kątowego $\Delta\theta$, rys. 3.

W celu określenia błędu liniowego Δl pojedynczego namiernika należy znać odległość R od namierzanego ZE oraz błąd kątowy namiernika $\Delta\theta$.



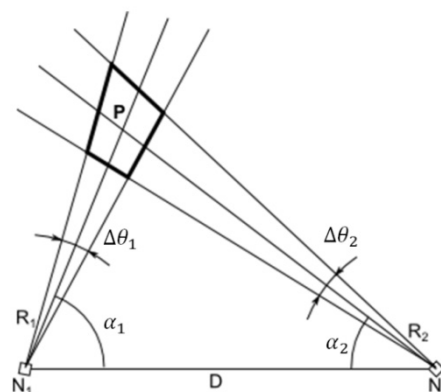
Rys. 3. Błąd liniowy pojedynczego namiaru
Fig. 3. The linear error for a single bearing

Błąd liniowy jest równy długości łuku o promieniu R i wynosi (jeśli $\Delta\theta$ jest wyrażony w mierze kątowej w stopniach) [1, 2]:

$$\Delta l = 0,0175\Delta\theta R. \quad (2)$$

Przy namierzaniu źródła promieniowania za pomocą dwóch namierników z błędami kątowymi $\Delta\theta$ prawdopodobne położenie źródła znajduje się wewnątrz czworoboku powstałego z przecięcia się dwóch sektorów, rys. 4.

Dokładność lokalizacji jest funkcją zarówno błędu kątowego pomiaru jak i mierzonej odległości do ZE.



Rys. 4. Błąd liniowy przy namierzaniu dwoma namiernikami
Fig. 4. The linear error for two direction finding stations

Błąd liniowy jest w tym przypadku równy najdłuższemu z odcinków łączących punkt P przecięcia się linii namiarów z wierzchołkami czworokąta i wynosi [2]:

$$\Delta l = 0,0175\Delta\theta \frac{\sqrt{R_1^2 + R_2^2}}{\sin\gamma} \quad (3)$$

gdzie: γ – kąt wcięcia linii namiarów (kąt pod którym przecinają się linie namiarów z obu namierników).

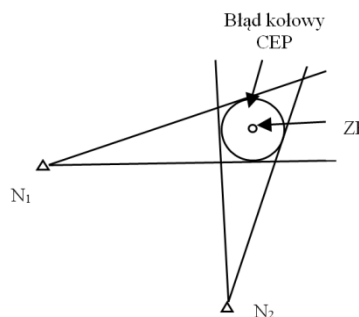
W początkowym okresie procesu namierzania nie są znane odległości R_1 i R_2 , dlatego zamiast wzoru (3) można stosować następującą równoważną zależność [2]:

$$\Delta l = 0,0175\Delta\theta \frac{D}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (4)$$

gdzie: D - baza namierzania, α_1 , α_2 – kąty między bazą namierzania a odpowiednimi liniami namiarów, rys. 4.

System odległościowy określania namiarów wymaga dużo większej dokładności kątowej, żeby osiągnąć tę samą dokładność lokalizacji, którą dużo mniej dokładny system mógłby osiągnąć na bliższej odległości.

Dokładność określenia lokalizacji źródła emisji sygnału można opisać różnymi charakterystykami, których wspólną cechą jest to, że dokładność ta na płaszczyźnie opisywana jest obszarem w postaci tzw. koła błędów o zadanym prawdopodobieństwie P_k pokrycia tego miejsca kołem (rys. 5) lub tzw. elipsy błędów (rys. 6) o zadanym prawdopodobieństwie P_e , z którym ta elipsa pokrywa miejsce położenia ZE. W praktycznych zastosowaniach do rzadkości należy opis obszaru błędów w postaci wielokąta, rys. 4.



Rys. 5. Błąd kołowy prawdopodobny określania pozycji źródła emisji
Fig. 5. The circular error probable (CEP) for emitter location calculation

Błąd kołowy prawdopodobny (ang. *circular error probable - CEP*) jest promieniem koła o środku znajdującym się w punkcie dla obliczonej pozycji ZE, w którym prawdopodobieństwo znalezienia się ZE jest równe 0,5.

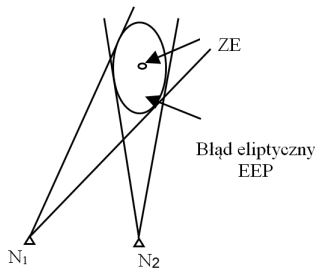
Błąd CEP oblicza się wg następującej zależności [1, 2]:

$$CEP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \sqrt{\left(1 - \frac{2/(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)(\sigma_x^4 + \sigma_y^4)}{9}\right)^3}. \quad (5)$$

gdzie: σ_x^2, σ_y^2 - wariancje błędu lokalizacji ZE na płaszczyźnie odpowiednio dla współrzędnej x i y .

Czasami używa się błędu CEP, żeby oznaczyć koło dopasowane do przestrzeni między liniami, które jest błędem kątowym średniokwadratowym dla tego ZE, jak pokazano na Rys. 5. Wielkość koła błędu lokalizacji ZE jest funkcją zarówno błędu kąto-owego jak i odległości od ZE do namierników.

Jeśli namiary przecinają się pod kątem mniejszym niż 90° , to powstanie niesymetryczny obszar między tymi liniami – elipsa błędów. W tym przypadku błąd eliptyczny prawdopodobny (ang. *elliptical error probable* - EEP) stosowany jest do opisu dokładności lokalizacji, rys. 6.



Rys. 6. Błąd eliptyczny do określania pozycji źródła emisji
Fig. 6. The elliptical error probable (EEP) for emitter location calculation

Ten sam brak symetrii pojawi się również w przypadku, jeśli namiary z namierników będą przecinały się pod kątem większym niż 90° lub jeśli jeden namiernik znajduje się znacznie bliżej ZE. Zakłada się, że dla błędu eliptycznego EEP istnieje 50% prawdopodobieństwo, że emiter znajduje się wewnątrz tej elipsy błędów.

Z kolei błąd średni geometryczny (ang. *geometric mean error* - GME), definiowany jako promień koła o powierzchni równej prawdopodobnej powierzchni elipsy błędów ($P_e=0,5$), ma następującą postać:

$$GME = 1,177 \sqrt{\sigma_x \sigma_y}. \quad (6)$$

Błąd GME charakteryzuje się tym, że w przypadku gdy jedno z odchyłeń standardowych σ_x, σ_y jest równe zero, to ta miara będzie równa zero, chociaż druga wartość odchylenia może być bardzo duża.

Właściwość opisu dokładności lokalizacji ZE przy pomocy elipsy błędów polega na tym, że charakteryzuje się on maksymalnym prawdopodobieństwem pokrycia miejsca położenia ZE spośród wszystkich możliwych rodzajów figur geometrycznych o jednakowym polu powierzchni oraz minimalnym polem powierzchni wśród wszystkich figur o ustalonym, jednakowym prawdopodobieństwie pokrycia miejsca położenia ZE.

4. Analiza matematyczna wzorów użytych do obliczeń pozycji źródła emisji

Ze względu na błędy katowe otrzymane z namiarów z różnych namierników miejsce położenia ZE nie będzie określone jako konkretna, pewna pozycja, tylko jako obszar, w którym (z określonym prawdopodobieństwem) będzie znajdować się wykryty obiekt.

Jeśli w systemie rozpoznania wykorzystuje się n namierników, ($n \geq 3$), to współrzędne (x^*, y^*) estymowanej pozycji P źródła emisji, (Rys. 2), oblicza się wg następujących wzorów [3, 4]:

$$x^* = \frac{BE-CD}{AC-B^2}, \quad (7)$$

$$y^* = \frac{BD-AE}{AC-B^2}, \quad (8)$$

gdzie poszczególne współczynniki oblicza się w następujący sposób:

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\cos^2 \theta_i}{\sigma_i^2 \rho_i^2}; \quad B = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\sin 2\theta_i}{\sigma_i^2 \rho_i^2}; \quad (9)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{\sin^2 \theta_i}{\sigma_i^2 \rho_i^2}; \quad D = -\sum_{i=1}^n \frac{x_i \cos^2 \theta_i - 0,5 y_i \sin 2\theta_i}{\sigma_i^2 \rho_i^2}; \quad (10)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{0,5 x_i \sin 2\theta_i - y_i \sin^2 \theta_i}{\sigma_i^2 \rho_i^2}. \quad (11)$$

Wzory końcowe (7) i (8) na obliczenie optymalnych współrzędnych źródła emisji (x^*, y^*) są w postaci uwikłanej, ponieważ po prawej stronie występują nieznanne wielkości w wyrażeniu na ρ_i , więc początkowe wartości ρ_i obliczane są w przybliżeniu, a następnie udokładniane w kolejnych krokach iteracji. Początkowym przybliżeniem wartości ρ_i może być odległość między i -tym namiernikiem a punktem przecięcia się (x_{ij}, y_{ij}) linii namiarów θ_i, θ_j odpowiednio z i -tego oraz j -tego namiernika.

Uwzględniając obrót układu współrzędnych Oxy o kąt α prawoskrętnie, wszystkie namiary θ_i w nowym układzie współrzędnych Ouv przyjmą wartości: $\theta_i - \alpha$, czyli otrzymamy [4]:

$$A_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\cos^2(\theta_i - \alpha)}{\sigma_i^2 \rho_i^2}; \quad B_1 = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\sin 2(\theta_i - \alpha)}{\sigma_i^2 \rho_i^2}; \quad (12)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\sin^2(\theta_i - \alpha)}{\sigma_i^2 \rho_i^2}. \quad (13)$$

Kąt orientacji α elipsy błędów, licząc prawoskrętnie względem kierunku odniesienia czyli kierunku północnego oblicza się ze wzoru:

$$\tan 2\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sin 2\theta_i}{\rho_i^2 \sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\cos 2\theta_i}{\rho_i^2 \sigma_i^2}}. \quad (14)$$

Odchylenia standardowe σ_u i σ_v elipsy błędów na kierunkach ortogonalnych, czyli odpowiednio maksymalny i minimalny błąd średniokwadratowy oblicza się z następujących zależności:

$$\sigma_u = \frac{-1}{A_1^2}; \quad \sigma_v = \frac{-1}{C_1^2}, \quad (15)$$

gdzie:

$$\sigma_x = \sigma_u \sin \alpha; \quad \sigma_y = \sigma_v \cos \alpha. \quad (16)$$

Rozwiązując następujące równanie elipsy błędów względem parametru λ :

$$\frac{u^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2} = \lambda^2, \quad (17)$$

otrzymamy wyrażenia na jej półosie a, b w postaci:

$$a = \lambda \sigma_u, \quad b = \lambda \sigma_v. \quad (18)$$

Wartość parametru $\lambda = \lambda_0$ dla zadanego prawdopodobieństwa $P(\lambda_0) = P_0$ występowania ZE w elipsie błędów (lub pokrycia ZE elipsą błędów) określa się ze wzoru:

$$\lambda_0 = \sqrt{-2 \ln(1 - P_0)}. \quad (19)$$

Dla $\lambda_0 = 1$, czyli dla tzw. standardowej (jednostkowej) elipsy błędów, czyli dla $a = \lambda \sigma_u$ i $b = \lambda \sigma_v$, wartość $P_e = 0,393$.

Rozmiary obszaru błędu lokalizacji są tym większe, im większy jest błąd pomiaru namiarów i większe są odległości od namierników do ZE.

Dla określenia współrzędnych ZE wymagana jest pewna minimalna liczba namiarów wykonanych przez namierniki na to samo źródło. Ocenę dokładności określenia pozycji emitera dokonuje się tutaj na podstawie analizy statystycznej wyników pomiarów. Na podstawie uzyskanych L namiarów z każdego namiernika oblicza się uśrednioną pozycję:

$$\bar{x} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i^*, \quad \bar{y} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L y_i^*, \quad (20)$$

gdzie wartości x_i^* , y_i^* wyznaczone są według wzorów (7) i (8).

Błędy średniokwadratowe σ_x , σ_y określenia pozycji ZE odpowiednio dla współrzędnej x oraz y oblicza się ze wzorów:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (x_i^* - \bar{x})^2}; \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (y_i^* - \bar{y})^2}. \quad (21)$$

5. Analiza otrzymanych wyników

Dokładność określenia pozycji ZE przebadano przy użyciu programu symulacyjnego, w którym zadawana była rzeczywista pozycja źródła emisji (x, y) i dla niej generowany był ciąg $L=30$ namiarów z każdego namiernika o rozkładzie normalnym $N(\theta_i^t, \sigma_{\theta_i})$, gdzie: θ_i^t – namiar teoretyczny obliczony z i -tego namiernika znajdującego się w punkcie (x_i, y_i) na zadanej pozycji źródła emisji (x, y), σ_{θ_i} – błąd średniokwadratowy pomiaru namiarów dla i -tego namiernika.

Współrzędne geometryczne położenia namierników (x_i, y_i) wyrażone w kilometrach dla 15 różnych wariantów (W) ich ustawienia oraz błędy średniokwadratowe namiarów (σ_i) w stopniach, które zostały przyjęte do obliczeń symulacyjnych, przedstawiono w tabeli 1

Tab. 1. Pozycje namierników i błędy średniokwadratowe namiarów
Tab. 1. The emitter locations and root mean errors (RMS) of bearings

W	Pozycje namierników i błędy średn.	W	Pozycje namierników i błędy średn.	W	Pozycje namierników i błędy średn.
1	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=0; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$	6	$x_1=10; y_1=10; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=0; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=10; \sigma_3=1$	11	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=3$ $x_2=25; y_2=15; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$
2	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=3$ $x_2=25; y_2=0; \sigma_2=3$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=3$	7	$x_1=10; y_1=10; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=0; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=10; \sigma_3=1$	12	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=3$ $x_2=25; y_2=15; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$
3	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=0; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$	8	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=15; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$	13	$x_1=0; y_1=15; \sigma_1=2$ $x_2=50; y_2=0; \sigma_2=2$ $x_3=95; y_3=15; \sigma_3=2$
4	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=0; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$	9	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=15; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$	14	$x_1=0; y_1=15; \sigma_1=2$ $x_2=50; y_2=0; \sigma_2=2$ $x_3=95; y_3=15; \sigma_3=2$
5	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=0; \sigma_2=1$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$	10	$x_1=10; y_1=0; \sigma_1=1$ $x_2=25; y_2=15; \sigma_2=3$ $x_3=40; y_3=0; \sigma_3=1$	15	$x_1=0; y_1=15; \sigma_1=1$ $x_2=50; y_2=0; \sigma_2=1$ $x_3=95; y_3=15; \sigma_3=1$

Otrzymane wyniki obliczeń dla tych piętnastu różnych wariantów ustawienia namierników i ZE przedstawiono w Tabeli 2. Dla ułatwienia porównania błędów w tabeli w ostatniej kolumnie podano promień koła, którego pole jest równe polu elipsy błędów.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń stwierdzono, że efektywnym rozmieszczeniem namierników charakteryzującym się najmniejszymi błędami lokalizacji jest takie, kiedy krańcowe urządzenia odbiorcze są wysunięte nieco do przodu i gdy ZE znajduje się naprzeciwko środkowego namiernika.

Znacząco na dokładność określenia miejsca położenia ZE mają wpływ odległości od namierników do źródła emisji, nawet jeśli jest ono położone naprzeciwko środkowego namiernika. W takim przypadku pole elipsy błędów może być pozornie niewielkie, jednak długości półosi a i b świadczą o jej wydłużeniu dla współrzędnej y nawet do ponad 2 km (warianty 12, 13 i 15).

Tab. 2. Wyniki obliczeń pozycji źródła emisji dla różnych wariantów ustawień namierników i źródła emisji oraz błędów pomiarowych

Tab. 2. The results of emitter location calculation for different direction-finding stations and emitter location and measurement errors

W	Dana poz. ZE km	Obliczona poz. ZE km	Błędy RMS km	Półośie elipsy błędów km	Błąd CEP km	Błąd GME km	Błąd EEP km
1	$x=25$ $y=30$	$x^*=25,07$ $y^*=30,01$	$\sigma_x=0,32$ $\sigma_y=0,97$	$a=0,32$ $b=0,84$	0,70	0,65	0,52
2	$x=25$ $y=30$	$x^*=24,90$ $y^*=29,30$	$\sigma_x=1,21$ $\sigma_y=1,82$	$a=0,93$ $b=2,45$	1,78	1,75	1,51
3	$x=15$ $y=10$	$x^*=14,98$ $y^*=10,04$	$\sigma_x=0,15$ $\sigma_y=0,25$	$a=0,17$ $b=0,22$	0,23	0,23	0,19
4	$x=5$ $y=40$	$x^*=4,84$ $y^*=39,81$	$\sigma_x=0,53$ $\sigma_y=1,45$	$a=0,43$ $b=1,40$	1,15	0,91	0,77
5	$x=50$ $y=15$	$x^*=50,19$ $y^*=15,25$	$\sigma_x=0,64$ $\sigma_y=0,67$	$a=0,24$ $b=0,97$	0,77	0,57	0,48
6	$x=25$ $y=30$	$x^*=25,07$ $y^*=29,95$	$\sigma_x=0,372$ $\sigma_y=0,43$	$a=0,287$ $b=0,48$	0,47	0,47	0,36
7	$x=5$ $y=40$	$x^*=4,74$ $y^*=40,33$	$\sigma_x=0,63$ $\sigma_y=1,18$	$a=0,39$ $b=1,31$	1,03	1,02	0,69
8	$x=25$ $y=40$	$x^*=24,95$ $y^*=40,19$	$\sigma_x=0,34$ $\sigma_y=1,75$	$a=0,32$ $b=1,39$	1,26	0,91	0,66
9	$x=5$ $y=40$	$x^*=4,99$ $y^*=40,11$	$\sigma_x=0,684$ $\sigma_y=1,259$	$a=0,374$ $b=1,413$	1,14	1,09	0,73
10	$x=5$ $y=40$	$x^*=5,19$ $y^*=39,97$	$\sigma_x=0,81$ $\sigma_y=1,47$	$a=0,51$ $b=1,51$	1,33	1,29	0,92
11	$x=5$ $y=40$	$x^*=5,00$ $y^*=40,30$	$\sigma_x=0,84$ $\sigma_y=1,56$	$a=0,51$ $b=1,72$	1,40	1,35	0,93
12	$x=50$ $y=50$	$x^*=49,59$ $y^*=49,45$	$\sigma_x=1,10$ $\sigma_y=2,04$	$a=0,52$ $b=2,43$	1,84	1,77	1,12
13	$x=50$ $y=75$	$x^*=49,70$ $y^*=75,28$	$\sigma_x=1,62$ $\sigma_y=3,35$	$a=1,67$ $b=2,76$	2,89	2,74	2,19
14	$x=25$ $y=25$	$x^*=24,68$ $y^*=24,83$	$\sigma_x=1,31$ $\sigma_y=0,58$	$a=1,31$ $b=0,75$	1,10	1,02	0,99
15	$x=25$ $y=95$	$x^*=25,03$ $y^*=95,28$	$\sigma_x=1,14$ $\sigma_y=2,77$	$a=1,00$ $b=2,35$	2,28	2,09	1,53

6. Wnioski

Dokładność określenia pozycji ZE zależy od wielu czynników i jest różna w badanych punktach przestrzeni obserwacji. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń można stwierdzić, że dokładność określenia pozycji ZE w metodzie pelengacyjnej zależy od: liczby namierników, odległości między ZE a namiernikami, ich wzajemnego rozmieszczenia w terenie, usytuowania ZE względem poszczególnych namierników, błędów średniokwadratowych namierzania poszczególnych namierników oraz od liczby wykonanych namiarów.

Najmniejsze rozmiary obszaru, w którym prawdopodobieństwo znalezienia się ZE jest równe 0,5 otrzymano dla błędu eliptycznego. Dokładność określenia miejsca położenia ZE zależy również od liczby namiarów. Im więcej zostanie wykonanych namiarów do obliczeń uśrednionej pozycji, tym dokładniejsza (zbliżona do rzeczywistej) będzie estymowana pozycja ZE i to nawet w przypadku stosunkowo dużych błędów pomiarowych poszczególnych namierników.

7. Literatura

- [1] Adamy D. L.: EW 102. A Second Course in Electronic Warfare. Artech • House. Boston London, 2004.
- [2] Adamy D. L.: Emitter Location: Reporting Location Accuracy. The Journal of Electronic Defence. July 2005.
- [3] Matuszewski J.: Ocena dokładności określenia położenia źródła emisji za pomocą namiarów. Elektronika, Nr 3/2013, s. 64-67.
- [4] Paradowski L., Szutkowski F.: Problemy rozpoznania i przeciwdziałania radioelektronicznego, WAT, Warszawa 1986.