

TURBINA WIATROWA JAKO ELEMENT SYSTEMU RADIOLOKALIZACYJNEGO

STRESZCZENIE

W referacie zaproponowano wykorzystanie turbiny wiatrowej do umieszczenia elementów systemu radiolokalizacyjnego do określania położenia obiektów latających. Zaproponowane rozwiązanie umożliwi oszacowanie położenia obiektu w przestrzeni, zwłaszcza w ruchu, za pomocą sygnałów lokalizacyjnych nadawanych jednocześnie z wybranych punktów konstrukcyjnych turbiny. Przedstawiono matematyczną analizę metody oraz algorytm Chana (CA) do rozwiązywania układu nieliniowych równań pozycyjnych. W dalszej kolejności przedstawiono analizę parametru rozmycia położenia (PDoP) dla zaproponowanej metody. Na koniec zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych dotyczących efektywności estymacji położenia obiektów dla tej metody dla wybranych parametrów systemowych.

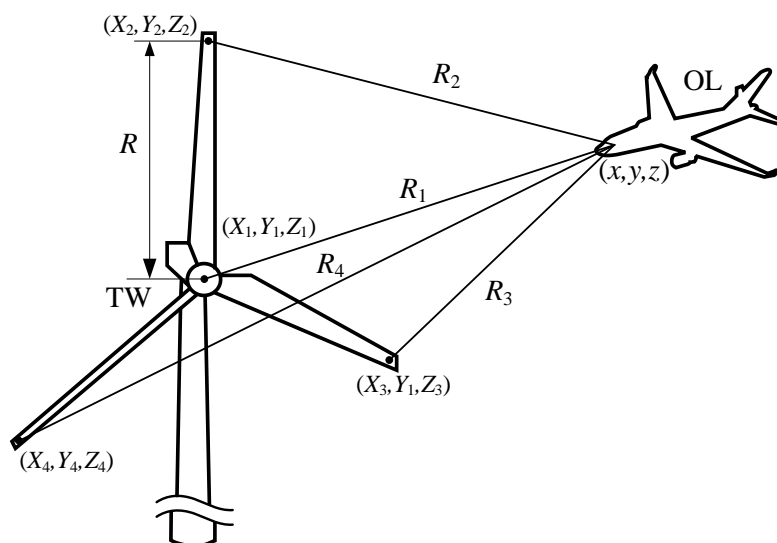
Słowa kluczowe: system radiolokalizacyjny, TDoA, turbina wiatrowa

WSTĘP

Odnawialne źródła energii rozwijają się na całym świecie znacznie szybciej niż konwencjonalne, a największe znaczenie wśród nich odgrywa energetyka wiatrowa, która opiera się na turbinach wiatrowych. Powszechnie znane są turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu [3]. Z tej grupy najbardziej rozpowszechnioną turbiną jest wirnik trzyłopatowy, stosowany w komercyjnych elektrowniach wiatrowych (farmy wiatrowe). Średnice wirników tego typu turbin wahają się od kilkunastu metrów do ponad 100 metrów, w zależności od nominalnej mocy wytwarzanej. W niniejszym artykule autorzy podjęli próbę wykorzystania działających trzyłopatowych turbin wiatrowych, wytwarzających energię elektryczną, do budowy systemu radiolokalizacyjnego dla obiektów latających. W przedstawionej koncepcji takiego systemu turbina wiatrowa stanowi radiolatarnię emitującą radiowe sygnały lokalizacyjne, na podstawie których obiekty latające mogą estymować swoje położenie.

OPIS ZAPROPONOWANEJ METODY

Rozważmy przypadek w przestrzeni trójwymiarowej, w której na trzech krańcach wirników turbiny wiatrowej (TW) o promieniu R oraz w jej centralnym punkcie umieszczono zsynchronizowane nadajniki. Nadajniki (pełniące funkcje stacji referencyjnych) znajdują się w znanych położeniach względem przyjętego układu współrzędnych i jednocześnie emitują sygnały lokalizacyjne. Sygnały te są odbierane przez obiekt latający, np. samolot (OL). Stosując unikatowe identyfikatory w każdym nadajniku, OL może odbierać te sygnały i określać różnicę odległości pomiędzy poszczególnymi antenami nadajników i estymować swoje położenie. Zaproponowany sposób lokalizowania obiektów opiera się na odbiorze sygnałów nadawanych przez pojedynczą turbinę wiatrową. Przykładowa struktura sieci radiowej, w której może być zaimplementowana ta metoda, została pokazana na rys. 1.



Rys. 1. Przykład struktury sieci radiowej, w której można zaimplementować zaproponowaną metodę

Na podstawie rys. 1 można zapisać układ równań nieliniowych postaci [1]

$$R_j^2 = (X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2 \quad \text{dla } j = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

Mając na uwadze

$$R_{i,1} = R_i - R_1 \quad \text{oraz} \quad R_i^2 = (R_{i,1} + R_1)^2 \quad \text{dla} \quad i = 2, 3, 4 \quad (2)$$

i po podstawieniu $K_i = X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2$, otrzymujemy

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 + R_1^2 = K_i - 2X_i x - 2Y_i y - 2Z_i z + x^2 + y^2 + z^2. \quad (3)$$

Następnie, w równaniu (3) obustronnie odejmujemy R_1^2 oraz podstawiamy $K_1 = X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2$, $X_{i,1} = X_i - X_1$, $Y_{i,1} = Y_i - Y_1$, $Z_{i,1} = Z_i - Z_1$, co prowadzi do wyrażenia

$$2X_{i,1}x + 2Y_{i,1}y + 2Z_{i,1}z = K_i - K_1 - R_{i,1}^2 - 2R_{i,1}R_1. \quad (4)$$

Dla kolejnych wartości parametru i korzystając z (4) można zapisać układ równań nieliniowych w postaci macierzowej, w którym niewiadomymi są współrzędne obiektu latającego (x, y, z) oraz odległość R_1 .

$$2 \cdot \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} & Z_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} & Z_{3,1} \\ X_{4,1} & Y_{4,1} & Z_{4,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_2 - K_1 - R_{2,1}^2 - 2R_{2,1}R_1 \\ K_3 - K_1 - R_{3,1}^2 - 2R_{3,1}R_1 \\ K_4 - K_1 - R_{4,1}^2 - 2R_{4,1}R_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

zatem

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} & Z_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} & Z_{3,1} \\ X_{4,1} & Y_{4,1} & Z_{4,1} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} K_2 - K_1 - R_{2,1}^2 - 2R_{2,1}R_1 \\ K_3 - K_1 - R_{3,1}^2 - 2R_{3,1}R_1 \\ K_4 - K_1 - R_{4,1}^2 - 2R_{4,1}R_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

lub

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_2 - K_1 - R_{2,1}^2 - 2R_{2,1}R_1 \\ K_3 - K_1 - R_{3,1}^2 - 2R_{3,1}R_1 \\ K_4 - K_1 - R_{4,1}^2 - 2R_{4,1}R_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

gdzie a_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ są elementami macierzy odwrotnej z równania (6). Podstawiając następnie wyrażenia na poszczególne współrzędne OL wyznaczone z (7) do równania (1), otrzymujemy równanie kwadratowe ze względu na niewiadomą R_1 o ogólnej postaci

$$W_1 R_1^2 + W_2 R_1 + W_3 = 0, \quad (8)$$



gdzie:

$$W_1 = 1 - E_1^2 - E_2^2 - E_3^2, \quad (9)$$

$$W_2 = -2(X_1E_1 + Y_1E_2 + Z_1E_3 - D_1E_1 - D_2E_2 - D_3E_3), \quad (10)$$

$$W_3 = -K_1 + 2X_1D_1 + 2Y_1D_2 + 2Z_1D_3 - D_1^2 - D_2^2 - D_3^2, \quad (11)$$

$$E_1 = a_{11}R_{2,1} + a_{12}R_{3,1} + a_{13}R_{4,1}, \quad (12)$$

$$E_2 = a_{21}R_{2,1} + a_{22}R_{3,1} + a_{23}R_{4,1}, \quad (13)$$

$$E_3 = a_{31}R_{2,1} + a_{32}R_{3,1} + a_{33}R_{4,1}, \quad (14)$$

$$D_1 = A_1 + B_1 + C_1, \quad (15)$$

$$D_2 = A_2 + B_2 + C_2, \quad (16)$$

$$D_3 = A_3 + B_3 + C_3, \quad (17)$$

$$C_1 = \frac{1}{2}a_{13}(K_4 - K_1 - R_{4,1}^2), \quad (18)$$

$$C_2 = \frac{1}{2}a_{23}(K_4 - K_1 - R_{4,1}^2), \quad (19)$$

$$C_3 = \frac{1}{2}a_{33}(K_4 - K_1 - R_{4,1}^2), \quad (20)$$

$$B_1 = \frac{1}{2}a_{12}(K_3 - K_1 - R_{3,1}^2), \quad (21)$$

$$B_2 = \frac{1}{2}a_{22}(K_3 - K_1 - R_{3,1}^2), \quad (22)$$

$$B_3 = \frac{1}{2}a_{32}(K_3 - K_1 - R_{3,1}^2), \quad (23)$$

$$A_1 = \frac{1}{2}a_{11}(K_2 - K_1 - R_{2,1}^2), \quad (24)$$

$$A_2 = \frac{1}{2}a_{21}(K_2 - K_1 - R_{2,1}^2), \quad (25)$$

$$A_3 = \frac{1}{2}a_{31}(K_2 - K_1 - R_{2,1}^2). \quad (26)$$



Na podstawie wyznaczonej wartości odległości R_1 ostatecznie wyznaczamy współrzędne OL z zależności:

$$\begin{cases} x = D_1 - R_1 E_1 \\ y = D_2 - R_1 E_2 \\ z = D_3 - R_1 E_3 \end{cases} \quad (27)$$

Na zakończenie tego punktu, warto wspomnieć, że opisany wyżej sposób wyznaczania współrzędnych OL stanowi klasyczne rozwiązanie metody TDoA (*Time Difference of Arrival*), w której w pierwszej kolejności mierzona jest przez obiekt latający różnica czasów propagacji fali elektromagnetycznej pomiędzy nadajnikiem umieszczonym w centralnym punkcie turbiny wiatrowej a nadajnikami umieszczonymi na krańcach jej łopat. Uzyskujemy w ten sposób informacje o różnicy odległości pomiędzy poszczególnymi elementami TW i OL. Na podstawie tych informacji estymujemy położenie OL.

ANALIZA PARAMETRU PDoP DLA ZAPROPONOWANEJ METODY

Jak wiadomo, dokładność estymacji położenia zależy od rozkładu geometrycznego stacji referencyjnych względem lokalizowanego obiektu, który często charakteryzowany jest parametrem PDoP (*Positional Dilution of Precision*) [2]. Im wyższa wartość tego parametru, tym niższa dokładność estymacji położenia obiektu uzyskiwana w systemie radiolokalizacyjnych pomimo utrzymania stałego poziomu dokładności pomiarów parametrów sygnałów radiowych. Współczynnik PDoP można wyznaczyć z zależności [4]

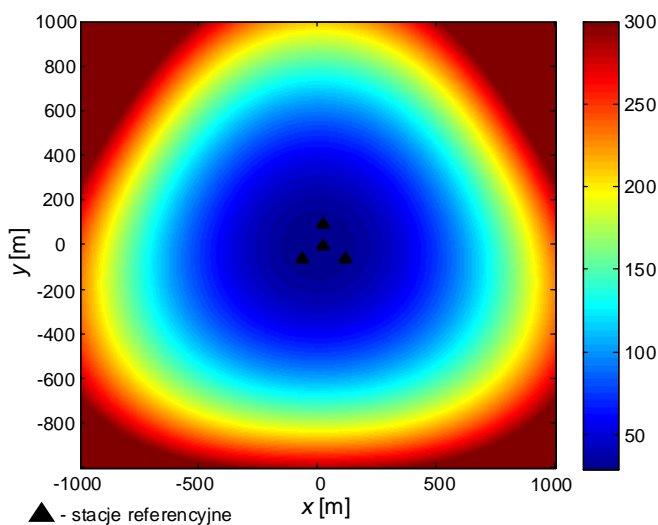
$$P_D = \sqrt{\text{tr}[(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1}]}, \quad (28)$$

gdzie \mathbf{J} reprezentuje macierz Jakobiego wyznaczoną na podstawie (2) i opisaną zależnością (29), natomiast $\text{tr}[\bullet]$ jest tzw. śladem macierzy.

$$\mathbf{J}(x, y, z) = \begin{bmatrix} \frac{x - X_2}{R_2} - \frac{x - X_1}{R_1} & \frac{y - Y_2}{R_2} - \frac{y - Y_1}{R_1} & \frac{z - Z_2}{R_2} - \frac{z - Z_1}{R_1} \\ \frac{x - X_3}{R_3} - \frac{x - X_1}{R_1} & \frac{y - Y_3}{R_3} - \frac{y - Y_1}{R_1} & \frac{z - Z_3}{R_3} - \frac{z - Z_1}{R_1} \\ \frac{x - X_4}{R_4} - \frac{x - X_1}{R_1} & \frac{y - Y_4}{R_4} - \frac{y - Y_1}{R_1} & \frac{z - Z_4}{R_4} - \frac{z - Z_1}{R_1} \end{bmatrix}. \quad (29)$$



Do analizy rozkładu wartości współczynników PDoP dla opracowanej metody przyjęto następujący model: wirniki turbiny wiatrowej z rys. 1 znajdują się na płaszczyźnie XY układu współrzędnych kartezjańskich, przy czym środek turbiny znajduje się w środku tego układu, tzn. $(X_1, Y_1, Z_1) = (0, 0, 0)$; współczynnik PDoP wyznaczano na płaszczyźnie w kształcie kwadratu o boku $20 \cdot R$ umieszczonej symetrycznie względem środka układu współrzędnych i zadanej wysokości z nad turbiną wiatrową. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych dla $R = 100$ m i $z = 500$ m przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowy rozkład wartości parametru PDoP dla $R = 100$ m i $z = 500$ m

Na części obszaru otoczonego stacjami referencyjnymi i w ich pobliżu współczynnik PDoP dla rozważanej metody zmienia się od kilku do kilkudziesięciu. Tam też możemy się spodziewać stosunkowo niewielkich błędów estymacji położenia obiektów. Znacznie wyższe wartości PDoP, dochodzące do kilkuset, obserwowane są na krańcach analizowanego obszaru.

WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Jakość estymacji położenia obiektów z zastosowaniem opracowanej metody radiolokalizacyjnej oceniono na podstawie wyników badań symulacyjnych. Podczas badań symulacyjnych przyjęto model opisany powyżej, przy czym rozpatrywany obszar, w którym losowo wybierano położenie obiektu latającego, był ograniczony



do wnętrza walca o promieniu $10 \cdot R$ i wysokości $z = 1000$ m. Narzędzie symulacyjne opracowano w uniwersalnym środowisku obliczeń matematycznych MATLAB. Podczas badań symulacyjnych uwzględniono błąd pomiaru różnicy odległości $R_{i,1}$ pomiędzy dwoma wybranymi nadajnikami umieszczonymi na TW i OL o rozkładzie normalnym (δ_a). Do modelowania tego błędu użyto funkcji *randn* w następujący sposób

$$\delta_a = \sigma \cdot \text{randn} , \quad (30)$$

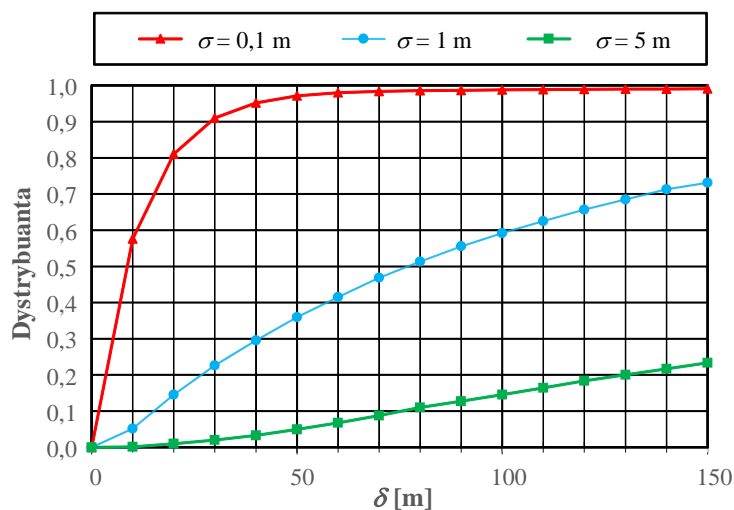
gdzie σ jest odchyleniem standardowym pomiarów różnicy odległości. Podczas badania symulacyjnego każdy przypadek powtórzono 10 000 razy.

Na podstawie wyników uzyskanych z badań symulacyjnych wykreślono dystrybuantę błędu bezwzględnego δ , opisanego zależnością (31)

$$\delta = \sqrt{(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2 + (\hat{z} - z)^2} , \quad (31)$$

gdzie $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ reprezentują estymaty współrzędnych OL, natomiast (x, y, z) to rzeczywiste współrzędne OL.

Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 3. Uzyskane wyniki są zgodne z oczekiwaniami. Przykładowo, dla $\sigma = 1$ m w 60 % przypadków błąd bezwzględny δ nie przekraczał 100 m. Najlepsze wyniki uzyskano dla $\sigma = 0,1$ m, dla którego błąd δ w 60 % przypadków nie jest gorszy niż 10 m.



Rys. 3. Dystrybuanta błędów bezwzględnego położenia obiektu δ dla trzech wartości σ pomiarów różnicy odległości



WNIOSKI

Zaproponowano unikatową metodę estymacji położenia obiektów latających wykorzystującą istniejącą infrastrukturę turbin wiatrowych, wyposażoną w zestaw zsynchronizowanych ze sobą nadajników. Wyniki z przeprowadzonych badań symulacyjnych efektywności pracy przedstawionego rozwiązania należy uznać za obiecujące.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Chan Y. T., Ho K. C., *A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location*, "IEEE Transactions on Signal Processing", 1994, 42 (8), 1905 – 1915.
- [2] Bard J. D., Ham F. M., *Time Difference of Arrival Dilution of Precision and Applications*, "IEEE Transactions on Signal Processing", 1999, 47 (2), 521-523.
- [3] Garbala K., Tokajuk A. M., Kałaur K., Cybulko P., *Klasyfikacja i charakterystyka turbin wiatrowych (silników wiatrowych)*, „Aparatura Badawcza i Dydaktyczna”, 2020, 25, 56 – 60.
- [4] Tsui J. B. Y., *Fundamentals of Global Positioning System Receivers. A Software Approach*, Wiley & Sons, New York 2000.

WIND TURBINE AS AN ELEMENT OF THE RADIOLOCALIZATION SYSTEM

ABSTRACT

The paper proposes the use of a wind turbine for deployment of elements of radiolocalization system for flying objects positioning. The proposed solution makes it possible to estimate the position of an object in space, especially in motion, using localization signals transmitted simultaneously from selected structural points of the turbine. The mathematical analysis of the method and Chan's algorithm (CA) for solving the system of nonlinear position equations are presented. Next, an analysis of the position dilution of precision (PDoP) parameter for the proposed method. Finally, results of simulation studies on the efficiency of object position estimation for this method for selected system parameters are presented.

