УДК 621.372

О.М. ШИНКАРУК, І.В. ГУРМАН, Ю.В. КУРИЦЬКА
Хмельницький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЦІЛЕЙ БАГАТОПОЗИЦІЙНИМИ ПАСИВНИМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ

Розглядається метод визначення координат цілей в пасивних радіолокаційних системах на основі методу пеленгування Сайбеля. Такий підхід дав змогу зняти обмеження на топологію трьох точок прийому, отримати аналітичні залежності однозначного визначення координат за рахунок комплексного контролю часових і амплітудних параметрів сигналу. Використання методу дозволило підвищити ефективність контролю об'єктів за рахунок забезпечення інваріантності топології точок прийому та зменшення грубих промахів контролю через неоднозначність визначення координат.

Ключові слова: однозначність визначення координат, пасивна система контролю, пеленгування

O.M. SHINKARUK, I.V. GURMAN, Y.V. KURYTSKA
Khmelnitsky National University

IMPROVE THE ACCURACY OF THE COORDINATES PURPOSE MULTIPOINT PASSIVE RADAR SYSTEMS

Abstract – This article summarizes the methods of passive radar. The reasons for the ambiguity of the coordinates in three point passive systems with arbitrary topology. The method of determination of target coordinates in passive radar systems based on the method of direction finding Saybelya. It is shown that this approach allows to remove restrictions on the topology of three receiving points. The analytical dependence unambiguous determination of the coordinates by temporal control of signal parameters. The analytical dependence of the coordinates by the amplitude control signal parameters. It is shown that the use of the method allows increasing the efficiency of the control objects in three point passive systems. This is achieved by providing invariance topology reception points and reduce Blunders control through the ambiguity of the coordinates.

Keywords: unambiguous determination of the coordinate system is passive control, direction finding.

Допустимо, що є набір фіксованих точок A, B, C, заданих своїми координатами $\langle x_A, y_A \rangle$, $\langle x_B, y_B \rangle$, $\langle y_C, y_C \rangle$ відповідно в деякій системі координат. Щодо точки D, координати якої необхідно визначити, відомо, що різниця відстаней від неї до пар точок I та J дорівнює $\Delta r_{IJ} \equiv |ID| - |JD|$ ($I, J \in \{A, B, C\}$). Описаний загальний алгоритм визначення координат припускає пошук коренів системи нелінійних рівнянь, які пов'язують початкові дані з координатами точки D. Розглядається модель системи пеленгації для визначення координат джерела випромінювання, яка складається із двох баз, що містять по 2 приймача (датчика) кожна. Розв'язок (x, y) у декартових координатах (місце розташування джерела випромінювання) при довільних і відомих координатах приймачів $x_i, y_i, i=1,..,3$ визначається за виміряними часовими затримками $T_{1,2}, T_{3,2}$ кожної з пар, і відстаней r_1, r_2, r_3 від точки випромінювання до датчиків $r_{12} = r_1 - r_2 = cT_{1,2}$, $r_{32} = r_3 - r_2 = c\,T_{3,2}$, де c – швидкість поширення хвилі. Координати цілі (x, y) описуються математичною моделлю у вигляді системи двох гіперболічних рівнянь, складених відповідно до теореми Піфагора [8]

$$\begin{aligned} r_{12} = r_1 - r_2 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2}, \\ r_{32} = r_3 - r_2 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Вимірювання часових затримок $T_{1,2}, T_{3,2}$ здійснюється на кожній базі за виявленими піками взаємнокореляційних функцій процесів з виходів приймачів. Необхідно відзначити, що одержання точних аналітичних виразів для розв'язку (1) приводить до неоднозначності у вигляді двох розв'язків [3; 5]. Для різницево-дальномірно-кутомірних способів визначення координат існують кілька видів неоднозначностей, що виникають за наступних причин:

1. При прямому розв'язку системи (1) методом піднесення до квадрату виникає кілька розв'язків, що породжують розкидані хибні точки, які суттєво віддалені від координати джерела випромінювання.

2. Через відмінність дискретного простору в полярній і декартовій системі координат. При цьому, одна пара часових затримок $t = T_{1,2}, \tau = T_{3,2}$ в (1) відповідає декільком поруч розташованим елементам розрізнення (коміркам) $t, \tau \to x_i, y_i, i = 1,.., N_{t,\tau}$ у декартовій системі координат.

Результуючі похибки визначають інтервали оцінок часу затримки, які вносять помилки при розрахунках координат. Наявність двох гілок кожної з гіпербол приводить до помилок неоднозначності. Для множини дискретно розташованих джерел випромінювання розв'язок (1) у декартовой системі координат наведено на рис. 1.

Для розрахунку неоднозначності з урахуванням геометрії розташування приймачів пропонується підхід [1,2], який заснований на застосуванні карти відповідності затримок – координатам $T_{1,2}, T_{3,2} \to x, y$, розрахованих заздалегідь по (1). Це дозволяє виключити необхідність розв'язування системи гіперболічних рівнянь, якщо обмежений розмір сітки координат цілей для всіх можливих затримок $T_{1,2}, T_{3,2}$ з урахуванням розміру комірки контрольованої зони. Уся область розбита на елементи $x = c/f$ відповідно до частоти дискретизації f.

Розглянемо конфігурації: лінії, рівносторонній трикутник, прямий кут, коли приймачі розташовані в центрі, а розміри баз в 10 раз менше розміру контрольованої зони.

При віддаленні джерела випромінювання від баз суттєво зростає неоднозначність визначення координат. Такі помилки вдається частково компенсувати шляхом збільшення числа приймачів сигналу і застосування додаткових баз із наявних приймачів (датчиків). Це приводить до збільшення розмірності системи рівнянь (1) і, як наслідок, до додаткових апаратурних і обчислювальних витрат. Для компенсації неоднозначності пропонується застосовувати комбінацію методів, засновану на вимірюванні незалежних параметрів сигналів [4].

Вирішення системи нелінійних рівнянь є складною математичною задачею, що не має загального рішення. Проведений патентний пошук НТР дозволив із відомих моделей використання різницево-дальномірного методу виділити пеленгатор Сайбеля [3], у якому усувається неоднозначність визначення координат об’єкта на лінії пеленга за рахунок рішення системи нелінійних рівнянь гіпербол математичними методами без урахування фізичної сутності задачі й можливостей використання деяких спрощень для окремих випадків. Систему рівнянь (1), що описує місцеположення обєкта, можна записати і у вигляді [3]

$$\begin{cases} a_1 x^2 + b_1 y^2 + f_1 = 0; \\ a_2 x^2 + b_2 y^2 + c_2 xy + d_2 x + e_2 y + f_2 = 0; \\ a_3 x^2 + b_3 y^2 + c_3 xy + d_3 x + e_3 y + f_3 = 0, \end{cases} \tag{2}$$

де a_n; b_n; f_n, $n = \overline{1,3}$; d_m; e_m; c_m, $m = 1,\ 2$ – змінні, які визначаються параметрами гіпербол, яка зв'язує невідомі значення координат точки D з відомими координатами точок *A, B, C* і виміряними значеннями різниць дальностей Δr_{AB}, Δr_{AC} і Δr_{BC}. Місцеположення об'єкта у [3] представлено у вигляді лінії пеленга. Система рівнянь (2) розглядається як базова модель для отримання трьох ліній пеленга при використанні чотирьох приймачів, що обумовлено необхідністю визначення координат об'єкта у просторі.

Рішенням системи рівнянь є декілька коренів, серед яких є координати точки місцеположення об’єкта на площині. Отже, для визначення координат необхідно використати три приймачі, що дозволить здійснити контроль двох параметрів об’єкта, а саме: різниць дальностей між місцеположенням об’єкта і точок прийома. Параметри визначають лінії гіпербол і лінію пеленга, які є лініями положення об’єкта. Необхідною умовою визначення координат є отримання координат точки перетину однієї з ліній гіпербол і лінії пеленга

$$y = y_0 + xtg\gamma , \tag{3}$$

де y_0 – ордината перетину лінією пеленга вісі *Oy;* γ – кут пеленга об’єкта, визначення якого подано в [3].

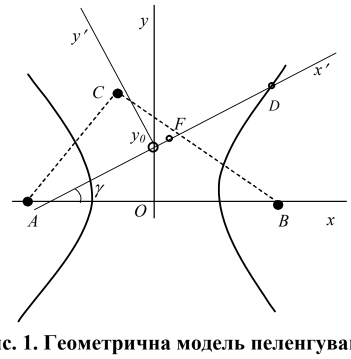

Рис. 1. Геометрична модель пеленгування

Лінія положення об’єкта, як об’єкта локації перетинає вісь *Ox* під кутом γ і проходить через точку спостереження $F(x_F, y_F)$, яка має змінні координати відносно центра системи координат [3]. Необхідно знайти координати точки, що є перетином лінії гіперболи і прямої. При одночасному перенесенні початку системи координат в точку $Y_0(0, y_0)$ і повороті координатних осей на кут γ (рис. 1.) рівняння перетворення координат мають вигляд

$$\begin{cases} x = x'\cos\gamma - y'\sin\gamma; \\ y = y_0 + x'\sin\gamma - y'\cos\gamma, \end{cases} \tag{4}$$

де x', y' – координати об’єкта (точка D) в системі координат $x'O'y'$.

Оскільки, в результаті перетворення системи координат лінія прямої (пеленга) колінеарна вісі $O'x'$, то систему рівнянь (2), з урахуванням (4) подамо в системі координат $x'O'y'$, прирівнявши значення змінної y' нулю

$$\begin{cases} a_1(x'\cos\gamma)^2 + b_1(y_0 + x'\sin\gamma)^2 + f_1 = 0; \\ a_2(x'\cos\gamma)^2 + b_2(y_0 + x'\sin\gamma)^2 + c_2(x'\cos\gamma)(y_0 + x'\sin\gamma) + d_2(x'\cos\gamma) + e_2(y_0 + x'\sin\gamma) + f_2 = 0; \\ a_3(x'\cos\gamma)^2 + b_3(y_0 + x'\sin\gamma)^2 + c_3(x'\cos\gamma)(y_0 + x'\sin\gamma) + d_3(x'\cos\gamma) + e_3(y_0 + x'\sin\gamma) + f_3 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Слід зазначити, що функціонально рівняння системи пов’язані між собою через визначені параметри γ, y_0 і різниці дальностей. Тому, у подальшому можливо застосування лише одного рівняння. У результаті перетворення першого рівнянь системи (5) отримаємо

$$x'^2(a_1\cos^2\gamma - \sin^2\gamma) - x'2y_0\sin\gamma - y_0^2 + f_1 = 0. \quad (6)$$

Вираз (6) дозволяє визначення координат у системі координат $x'O'y'$. Визначимо координати точки перетину ліній положення об’єкта при врахуванні $x' = L$. Тоді, відповідно до (6) отримаємо рівняння, які описують координати місцеположення об’єкта (табл. 1).

Таким чином, на основі різницево-дальномірного методу та з урахуванням технічного рішення щодо визначення пеленга [3] розроблено модель визначення координат об’єкта (табл. 1).

Розроблена модель дозволяє отримати точне аналітичне рішення системи гіперболічних рівнянь визначення координат об’єкта тріадою при відсутності ітераційних процедур, які унеможливлюють обробку значного потоку даних в масштабі реального часу. У порівнянні з методом точного аналітичного визначення пеленга об'єкта [3], розроблена модель дозволяє визначити додатково до пеленга і дальність до об’єкта. У порівнянні з методами точного аналітичного розрахунку координат об'єкта [2, 4, 5], у розробленій моделі знято обмеження щодо типу топології точок прийому, а також застосовано пеленг об’єкта, що однозначно визначає його місцеположення.

Використання даної моделі дозволяє знайти точки перетину лінії пеленга і лінії гіперболи, що відрізняє модель від діючих, де місцеположення розглядається як перетин двох гіперболічних ліній. При цьому зменшено до двох максимальну кількість точок імовірного місцеположення об’єкта, що у два рази менше у порівнянні із діючими методами визначення координат в різних галузях координатометрії [5]. Зазначене зменшує об'єм наступної відбраковки координат, в основу якої покладений принцип відбору хибних координат.

Таблиця 1

Модель двозначного визначення координат об’єкта

Параметр	**Математичний вираз параметра**	**Прим.**
Відстань від точки спостереження (точки перетину пеленгом осі ординат $Y_0(0, y_0)$) до об’єкта	$L_1 = \dfrac{y_0\sin\gamma + \sqrt{y_0^2\sin^2\gamma - (a_1\cos^2\gamma - \sin^2\gamma)(f_1 - y_0^2)}}{(a_1\cos^2\gamma - \sin^2\gamma)}$ $L_2 = \dfrac{y_0\sin\gamma - \sqrt{y_0^2\sin^2\gamma - (a_1\cos^2\gamma - \sin^2\gamma)(f_1 - y_0^2)}}{(a_1\cos^2\gamma - \sin^2\gamma)}$	(1)
Кут пеленга об’єкта (псевдопеленг Сайбеля)	$\gamma = arctg\left(\left(2a\Delta r_{AC} - (a + x_3)\Delta r_{AB}\right)/\left(y_3\Delta r_{AB}\right)\right)$	(2)
Ордината перетину лінією пеленга вісі y	$y_0 = y_F - x_F tg\gamma = \left(y_3{}^2 + r_{AC}r_{AB} - r_{AC}^2 - a^2\right)/2y_3$	(3)
$\begin{cases} x_F = -\left(2a\Delta r_{AC} - (a + x_3)\Delta r_{AB}\right)\left(a^2 + \Delta r_{AC}^2 - \Delta r_{AC}\Delta r_{AB} - d^2\right)\Delta r_{AB}/2Z; \\ y_F = -y_3\left(4a^2 - \Delta r_{AB}^2\right)\left(a^2 - d^2 + \Delta r_{AC}(\Delta r_{AC} - \Delta r_{AB})\right)/2Z. \end{cases}$ де $d = \sqrt{x_3{}^2 + y_3{}^2}$; $Z = 4a^2\left(y_3^2 + \Delta r_{AB}\Delta r_{AC} - \Delta r_{AC}^2\right) - \Delta r_{AB}^2\left(a^2 + d^2\right) + 2ax_3\left(2\Delta r_{AC}\Delta r_{AB} - \Delta r_{AB}^2\right)$		Координати точки спостереження F
$\Delta r_{AB} - \Delta r_{AC} = -\Delta r_{BC}$, де $\Delta r_{AB} = t_{AB}V_c$; $\Delta r_{AC} = t_{AC}V_c$; $\Delta r_{BC} = t_{BC}V_c$		Параметри
$a_1 = \left(2a/\Delta r_{AB}\right)^2 - 1$; $b_1 = -1$; $f_1 = \left(\Delta r_{AB}/2\right)^2 - a^2$, $a = \lvert AB\rvert/2$, $b = \lvert AC\rvert/2$,		

$c = \|BC\|/2$	

Примітка: t_{AB}, t_{AC}, t_{BC} – час затримки розповсюдження хвилі між точками прийому, які розміщені у точках A, B, C; V_c – середнє значення швидкості розповсюдження хвилі.

Рішенням рівняння (1) табл. 1 може бути 1 або 2 значення відстані, з яких одна істинна, рис. 9 (Неоднозначність визначення координат різницево-дальномірним методом: точки D1, D2 є неоднозначним рішенням рівнянь визначення координат об'єкта).

Отже, розроблений метод зменшення неоднозначності визначення координат трипозиційною пасивною системою радіотехнічного контролю об'єктів, новизна якого полягає у визначенні координат на основі функціонування пеленгатора Сайбеля і обробки значень потужності сигналу в точках прийому. Метод відрізняється зняттям обмеження на топологію трьох точок прийому, отриманням аналітичних залежностей однозначного визначення координат за рахунок комплексного контролю часових і амплітудних параметрів сигналу.

Література

1. Большаков В.Д. Радиогеодезические и электрооптические измерения : учебник для вузов / Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. – М. : Недра, 1985. – 303 с.
2. Антонюк В.П. Шляхи підвищення ефективності пасивних гіперболічних систем / В.П. Антонюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» / за ред. З. Г. Піхи. –Львів.: НУ «ЛП», 2009.– № 645.– С. 30–37.
3. Разностно-дальномерный способ пеленгования источника радиоизлучения и реализующее его устройство. Пат. RU № 2258242 C2, МПК G01S3/46, 11/02. Сайбель А. Г.; Опубл. 20.02.2005.
4. Ефремов А.С. Система сбора и обработки данных с пространственно разнесенных пунктов / А.С. Ефремов, А.Ю. Молотова, И.В. Рогалин // Системотехника, 2004. – № 2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.systech.miem.edu.ru.
5. George A. Mizusawa. Performance of hyperbolic position location techniques for code division multiple access. – Blacksburg, Virginia : Electrical Enginttring, 1996. – 121 p.

References

1. Bol'shakov, V. Radiogeodezicheskie i e'lektroopticheskie izmereniya: Moscow. Nedra, 1985. - 303 p.
2. Antonyuk, V.P. Shlyaxy pidvyshshennya efektyvnosti giperbolichnix system. Lviv. Vicnyk Natsional'nogo universytetu "Lvivs'ka politekhnika". 2009. № 645. p. 30–37.
3. Raznostno-dal'nomepny'j sposob pelengovaniya istochnika radioizlucheniya i realizuyushhego ego ustrojstva. Pat. RU № 2258242 C2 MPK G01S3/46, 11/02. Sajbel A.G., Opubl. 20.02.2005.
4. Efremov A.S. Sistema sbora I obrabotki danny'x s prostransvenno raznesenny'x punktov. Sistemotexnika, 2004. № 2.
5. George A. Mizusawa. Performance of hyperbolic position location techniques for code division multiple access. – Blacksburg, Virginia: Electrical Enginttring, 1996. – 121 p.

Рецензія/Peer review : 7.3.2013 р. Надрукована/Printed :7.4.2013 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Шинкарук О.М.