

УДК 004.045:621.396.96

І.В. Свид, А.І. Обод

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків*

## ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ ПОЛЬОТУ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ В ЄДИНІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

*Розглянуто можливість вимірювання висоти польоту літального апарата за вимірами похилої дальності у синхронній інформаційній мережі. Проведено математичне моделювання чутливості вимірювання висоти літального апарата до помилок синхронності формування часу приймальних пунктів синхронної мережі. Розглянута залежність чутливості вимірювання висоти від геометрії розташування приймальних пунктів.*

**Ключові слова:** синхронна мережа, похила дальність, чутливість вимірювання висоти.

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз літератури.

Обсяг пасажирських і вантажних авіаперевезень у світі неухильно зростає. Це призводить до підвищення щільності повітряного руху, завантаженості аеродромних зон і повітряних трас. Також постійно посилюються вимоги безпеки польотів. Основні елементи процедури контролю повітряного простору – аналіз повітряної обстановки й прийняття рішень. Рішення приймає особа на основі аналізу відповідним чином підготовленої інформації про стан повітряної обстановки. Правильне рішення може бути прийнято лише тоді, коли є досить повна, точна, достовірна й безперервна інформація про повітряну обстановку в зоні управління. Отже, якість прийняття рішень визначаються якістю й складом інформації, на основі якої особа приймає рішення. Підвищення надійності інформаційного забезпечення (ІЗ) користувачів системи контролю повітряного простору (ПП) неможливо без використання інформаційних технологій у процесі отримання, збору, обробки, зберігання й розповсюдження аеронавігаційних даних. Інформаційне забезпечення базується на широкому застосуванні систем спостереження (СС), навігації та зв'язку. Очевидно, що колишні системи спостереження все менш і менш задовольняють сучасним вимогам. Тому, в усьому світі ведуться розробки перспективних систем, що враховують сучасні вимоги. Однією з таких систем є система мультілатерації MLAT. Система мультілатерації MLAT являє собою незалежну кооперативну систему спостереження нового рівня. Система використовується з вже існуючим обладнанням запитальних СС і не потребує додаткової бортової апаратури. Вона не тільки гарантує високу точність визначення місця розташування і траєкторії, порівнянну з моноімпульсними запитальними СС, але і представляє такі

нові характеристики, як більш висока точність, швидкість оновлення та 3D стеження.

У роботі [1] обговорюється можливість реалізації подібної системи у вигляді єдиної інформаційної мережі (ІМ) СС. Створення такої ІМ дозволяє отримати ряд переваг у інформаційному забезпеченні споживачів [1, 2, 3]. Перехід до синхронної мережі (СМ) систем спостереження, як показано у зазначених роботах, дозволяє здійснити кооперативний прийом сигналів та розподілену обробку інформації. Одночасне вимірювання дальності до повітряного об'єкту, що спостерігається, дозволяє вимірювати висоту польоту ПО, що значно покращує інформаційне забезпечення користувачів. Однак відомо, що точність вимірювання висоти польоту ПО у цьому випадку залежатиме як від точності виміру похилої дальності, так і від точності часового забезпечення [3]. Крім того, слід зазначити, що геометрія інформаційної мережі при вимірі висоти польоту ПО, тобто геометричний фактор, має вплив у результатуючу точність виміру. Розглянемо геометричний фактор при вимірі висоти польоту ПО за даними виміру похилої дальності, на основі якого можливо розробити вимоги до потрібної точності формування шкал часу на приймальних пунктах СМ.

**Мета роботи** – розробка вимог щодо синхронності шкал часу в єдиній синхронній інформаційній мережі СС при вимірюванні висоти польоту ПО.

### Основна частина

Мультілатераційна система MLAT являє собою багатопозиційну пасивну (або пасивно-активну) СС, що складається з декількох приймальних станцій, станції обробки та контрольного відповідача. Мультілатерація або гіперболічне позиціонування – процес визначення положення, заснований на різниці в часі прибуття сигналу, випромінюваного об'єктом у напрямку трьох або більше приймачів. Використання вимірів похилої дальності до ПО декількох пунк-

тів СМ дозволяє вимірювати висоту польоту об'єкта, що дозволяє підвищити інформаційні можливості сучасних СС.

Розглянемо СМ, що складається з  $n$  пунктів. Для первинної СС це буде  $n$  наземних приймальних пунктів, один із яких випромінюючий, а для запитальної СС – це  $n-1$  наземних приймальних пунктів і один випромінюючий відповідач ПО. З вищевикладеного випливає, що обидві задачі ідентичні.

У якості корисного сигналу розглядається сигнал відповіді ЛВ. Для визначення просторового положення ПО використовуються СВ ЛВ, які містять інформацію про індивідуальний адрес ПО.

Корисний СВ ЛВ, який прийнято  $i$ -м ПрП, може бути представлено у вигляді

$$y_i(t, \vec{\lambda}) = A_i(t)g\left(t + \Delta t_i - \frac{r_{ci}(t)}{c} - t_b\right) \times \cos\left[\omega t + \left(\Delta\omega_b(t) - \frac{\omega}{c}\dot{r}_i(t)\right)t + \varphi_{0i}(t)\right],$$

де  $A_i(t)$  – амплітуда сигналу на вході  $i$ -го ПрП;  $t_b$  – час формування СВ;  $r_{ci}$  – сумарна псевдодальність;  $\omega$  – носійна частота сигналу;  $\Delta t_i$  – зсув шкали часу (ШЧ)  $i$ -го приймального пункту відносно ШЧ мережі;  $\Delta\omega_b(t)$  – зсув частоти сигналу за рахунок нестабільності частот задаючого генератора (ЗГ) ЛВ;  $(\omega/c)\dot{r}_i(t)$  – доплерівська частота СВ;  $\dot{r}_i$  – радіальна швидкість ПО відносно  $i$ -го ПрП;  $\varphi_{0i}(t)$  – випадкова початкова фаза.

Неузгодженості ШЧ  $\Delta t_i$  вимірюються і їх можна розглядати як відомі величини.

Зсув частоти  $\Delta\omega_b(t)$ , обумовлений нестабільністю ЗГ ЛВ, може бути описаний диференціальним рівнянням:

$\Delta\dot{\omega}_b(t) = -\gamma\Delta\omega_b(t) + \sqrt{2}\gamma\sigma_\omega n_\omega(t)$ ,  $\Delta\omega_b(t_0) = \Delta\omega_{b,0}$ , де  $n_\omega(t)$  – незалежний формуючий білий гаусівський шум (БГШ) з нульовим математичним сподіванням і одиничною інтенсивністю;  $\gamma$  – параметр, що характеризує ширину спектра флуктуацій частот ЗГ ЛВ;  $\sigma_\omega^2$  – дисперсія флуктуацій частоти ЗГ ЛВ.

Вектор параметрів радіосигналу, безпосередньо визначаючий радіосигнал на вході  $i$ -го ПрП, має вигляд

$$\vec{\lambda} = \|r_{ci}, \Delta\omega_i\|^T,$$

де  $\Delta\omega_i = \Delta\omega_b - (\omega/c)\dot{r}_i$ .

Огинаюча сигналу ЛВ  $g(t)$  являє собою модулюючи послідовність, сформовану на основі часового імпульсного кодування. Сумарну псевдодальність  $r_{ci}$  можна записати в такому вигляді:

$$r_{ci} = r_0 + r_i + \Delta r_b + \delta r,$$

де  $r_0$  – відстань між ЦП і ПО в момент приймання СЗ;  $r_i$  – відстань між  $i$ -м ПрП і ПО в момент приймання СВ;  $\Delta r_b$  – приріст відстані  $r_0$ , внаслідок руху ПО за час  $t_b$ ;  $\delta r$  – випадкові зміни псевдодальності, викликані нестабільністю затримки відповіді у ЛВ.

Зв'язок обмірюваних значень сумарної псевдодальності  $r_{ci}$  з координатами ПО й ПрП у декартовій системі координат описується рівнянням виду:

$$r_{ci} = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} + \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2},$$

де  $x_0, y_0, z_0, x_i, y_i, z_i, x, y, z$  – координати ЦП,  $i$ -го ПрП і ПО відповідно. У цьому виразі враховано, що величиною  $\Delta r_b$  можна знехтувати внаслідок її малості.

Припустимо, що з ПО в момент часу  $T_n(t)$  відбувається випромінювання СВ. Припустимо також, що є чотири наземні приймальні пункти. Отже, у кожному із приймальних пунктів у момент часу  $T_i(t)$  ( $i = 0, \dots, 3$ ) здійснюється приймання СВ. Вважаючи шкали часу, формовані в пунктах системи, високо стабільними можна виключити залежність часових процесів від  $t$ . Таким чином, час прибуття СВ в кожний із приймальних пунктів можна записати як

$$T_i = T_u + R_i / c.$$

Віднімаючи час прибуття в базовий пункт обробки (вважаємо його нульовим) від часу інших приймальних пунктів, можна записати

$$R_i - R_0 = c(T_i - T_0) = r_i, \quad i=1,2,3.$$

Виходячи з геометрії розташування приймальних і випромінюючого пунктів, можна записати

$$R_0^2 = x^2 + y^2 + z^2, \tag{1}$$

$$R_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2.$$

З (1) можна одержати

$$R_i^2 - R_0^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2(x_i x + y_i y + z_i z). \tag{2}$$

Використовуючи (1) і (2), можна записати

$$R_i^2 - R_0^2 = (R_i - R_0)(R_i + R_0) = (r_i + 2R_0)r_i. \tag{3}$$

Підставляючи (3) у (2) і здійснюючи перестановку, одержуємо

$$2(x_i x + y_i y + z_i z + r_i R_0) = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - r_i^2. \tag{4}$$

Потрібно оцінити вплив помилок часової синхронізації пунктів приймання на вимірювання висоти, тобто координати  $z$ . Окреме диференціювання (4), з урахуванням  $T_{i,j} = 0, 1, 2, 3$ , дозволяє записати

$$2\left(\frac{x_i dx}{dT_j} + \frac{y_i dy}{dT_j} + \frac{z_i dz}{dT_j} + r_i \frac{dR_0}{dT_j} + R_0 \frac{dr_i}{dT_j}\right) = -2r_i \frac{dr_i}{dT_j}. \tag{5}$$

Використовуючи результати диференціювання, (5) можна записати у вигляді

$$\bar{D}\bar{A} = \bar{R}, \quad (6)$$

де  $\bar{D}$  – матриця координат,  $\bar{A}$  – матриця результатів диференціювання,  $\bar{R}$  – матриця псевдодальності.

Рішення (6) є

$$\bar{A} = \bar{D}^{-1}\bar{R}. \quad (7)$$

Отже для обраного розташування приймальних пунктів СМ і позиції ПО матриці  $\bar{D}$  і  $\bar{R}$  відомі і вираз (7) можна розв'язати.

Як впливає з (7), третій ряд оціненої матриці  $\bar{A}$  являє собою чутливість вимірювання висоти ПО до помилок як вимірю похилої дальності, так і синхронності формування шкал часу приймальних пунктів. Якщо всі виміри похилої дальності та часові інтервали однаково чутливі до помилок формування СМ, то сума квадратичних помилок являє собою загальне значення геометричного фактора.

Розрахунки чутливості вимірювання висоти, нормованої на швидкість світла, наведені на рис. 1. Розрахунки проводились для випадку фіксованої висоти ПО 5 км та трикутного розташування наземних приймальних пунктів з відстанню у 100 км.

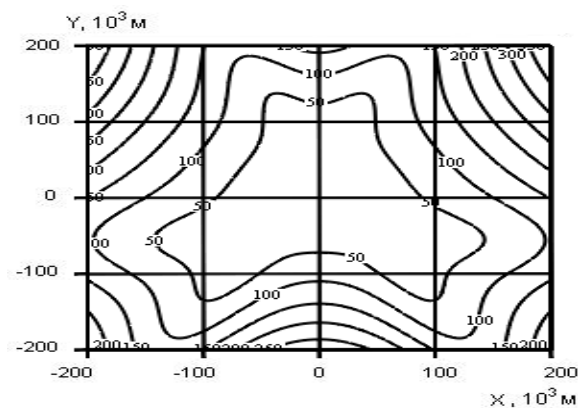


Рис. 1. Чутливість вимірювання висоти ПО

Для визначення необхідної точності синхронізації шкал часу приймальних пунктів при вимірю-

ванні висоти ПО потрібно ураховувати, що сумарна похибка вимірю похилої дальності визначається як

$$\sigma_{d\Sigma} = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_{ch}^2},$$

де  $\sigma_{ch}^2$  – дисперсія похибки синхронності формування шкал часу приймальних пунктів СМ, перерахована у дальність,  $\sigma_d^2$  – дисперсія похибки вимірю похилої дальності, котра визначається як  $\sigma_d^2 \approx \left(\frac{c\tau_c}{q}\right)^2$ , де  $\tau_c$  – тривалість сигналу, який використовується у СМ,  $q$  – відношення сигнал/шум на приймальному пункті.

Можливо показати, що при використанні рівної ваги у складовій точності вимірю дальності, а отже і у вимірі висоти польоту ПО, точність синхронності шкал часу приймальних пунктів складає десятки нС, що досягається сучасними засобами зв'язки часу.

## Висновки

Використання наведеної методики дозволяє висувати вимоги щодо синхронності шкал часу в єдиній синхронній інформаційній мережі СС при вимірюванні висоти ПО.

## Список літератури

1. Теоретичні основи побудови завадозахищених систем інформаційного моніторингу повітряного простору / В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 271 с.
2. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации: Пер. с англ. / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
3. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 415 с.

Надійшла до редколегії 13.02.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.О. Можаяев, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЕДИНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

И.В. Свид, А.И. Обод

Рассмотрена возможность измерения высоты полета летательного аппарата по измерениям наклонной дальности в синхронной информационной сети. Проведено математическое моделирование чувствительности измерения высоты летательного аппарата к ошибкам синхронности формирования времени приемных пунктов синхронной сети. Рассмотренная зависимость чувствительности измерения высоты от геометрии расположения приемных пунктов.

**Ключевые слова:** синхронная сеть, наклонная дальность, чувствительность измерения высоты.

## MEASUREMENT HEIGHT AIRCRAFT OBJECTS IN A UNIFIED INFORMATION NETWORK SURVEILLANCE SYSTEMS AIRSPACE

I.V. Svyd, A.I. Obad

The possibility of measuring the altitude of the aircraft as measured slant range in the synchronous information network. The mathematical modeling of the sensitivity of measuring the height of the aircraft to errors synchronicity formation time of collection points synchronous network. Considered dependence of the sensitivity measurement of the height of the geometry of the collection points.

**Keywords:** synchronous network, slant range, the sensitivity of the measurement height.