

УДК 681.375

О.В. Коломійцев

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

КАНАЛ АВТОМАТИЧНОГО СУПРОВОДЖЕННЯ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ЗА НАПРЯМКОМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЧЧМВ ТА ЛАЗЕРНИХ СИГНАЛІВ ІЗ ПРОСТОРОВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Запропоновано канал автоматичного супроводження літального апарату (ЛА) за напрямком (АСН) з використанням модернізованого частотно-часового методу вимірювання (МЧЧМВ) та лазерних сигналів із просторовою модуляцією поляризації. Це дозволяє забезпечити як обробку і формування зображення ЛА, так і високу стійкість каналу АСН щодо зриву автосупроводження ЛА завдяки застосування вузькосмугової фільтрації. Розкрито сутність роботи каналу АСН, що пропонується. Представлені отримані аналітичні вирази для розрахунків.

Ключові слова: канал автоматичного супроводження літальних апаратів за напрямком.

Вступ

Постановка проблеми. Існуючі канали і системи АСН, які використовують лазерне випромінювання, що знаходяться в експлуатації, не повною мірою задовольняють усе зростаючим до них вимогам. Це є наслідком того, що вони мають ряд істотних недоліків, основними з яких є невелика функціональність та недостатня стійкість автосупроводження ЛА. Тому проблема синтезу каналу АСН з МЧЧМВ із розширеними можливостями та забезпеченням стійкого кутового автосупроводження ЛА в структурі лазерної інформаційно-вимірювальної системи (ЛІВС) є актуальною [1]. **Аналіз публікацій** по існуючим зразкам лазерних систем [2] показує, що їх недоліками є неоперативність супроводження та погана боротьба з флуктуаційними і динамічними похибками. **Метою статті** є представ-

лення результатів розробки наукових і науково-технічних пропозицій щодо створення каналу АСН із розширеними можливостями та використанням вузькосмугової фільтрації і МЧЧМВ [3].

Виклад основного матеріалу

Розширити функціональність каналу АСН можливо завдяки додаткового формування сигналу, що зондує, зі складною просторово-часовою структурою. Тому, що відомі параметри сигналу, а цю інформацію можливо використовувати при розробці методів формування і обробки зображень ЛА. На передавальній частці каналу АСН за допомогою селектору подовжніх мод (СПМ) можливо сформувати лазерні сигнали із просторовою модуляцією поляризації для отримання векторного зображення з використанням модифікованої системи формування

зображення і спеціальної обробки зображення, що реєструється, це дозволить здійснювати селекцію ЛА на фоні інших об'єктів та його розпізнання.

Створення лазерного сигналу із просторовою модуляцією поляризації здійснюється шляхом розведення лазерного випромінювання на два променя з поворотом площини поляризації на кут 90^0 в одному з них. При цьому випромінювання апертури першого і другого каналів в апертурній площині $u0v$ рознесені на відстані ρ . Різниця ходу пучків до картинної площини ЛА $X0Y$ буде змінюватися вдовж осі x від крапки до крапки. Обумовлена цим різниця фаз між поляризованими компонентами, що ортогональні, поля у картинній площині також буде змінюватися від крапки до крапки. В залежності від різності фаз у картинній площині буде змінюватися вигляд поляризації сумарного поля сигналу, що зондує від лінійної через еліптичну і циркулюючу до лінійної, ортогональної к початкової і т.д. Період зміни вигляду поляризації визначається базою між випромінювачами ρ , відстанню до картинної площини R та при довжині хвилі λ дорівнює [4]

$$T = \lambda \cdot R / \rho. \quad (1)$$

Інтенсивність сигналу, що зондує за аналізатором, орієнтованим під кутом θ до площини поляризації, що формують пучки, дорівнює

$$I(\theta, x) = I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta + 2\sqrt{I_x I_y} \cos \theta \sin \theta |\mu_{zy}| \cos[v(x) - \beta_{x,y}] \quad (2)$$

де I_x, I_y – інтенсивність випромінювання поляризаційних пучків, що ортогональні; $v(x)$ – розподіл різності фаз поляризаційних пучків, що ортогональні, у картинній площині; $|\mu_{zy}|, \beta_{x,y}$ – модуль і фаза комплексного коефіцієнту когерентності пучків, що зондують.

З співвідношення (2) можливо побачити, що на характеристики сигналу, що зондує, впливає не тільки геометрія умов локації, а також співвідношення інтенсивності пучків, що формує, та їх взаємна когерентність. Обмежимося тільки простим видом поляризаційної обробки поля, що приймається, при підсвіті ЛА лазерним сигналом з просторовою модуляцією поляризації. Для ізотропних ЛА вона зводиться до виділення складових поля, що приймається, площини поляризації яких складають 45^0 з площині поляризації пучків, що зондують. Зображення ЛА, що формується з виділеної складової без урахування адитивного шуму, описується

$$I(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_0(x, y) [1 - P(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \varphi)] \times |h(x_i - x, y_i - y)|^2 dx dy + n(x, y), \quad (3)$$

де $I_0(x, y)$ – ідеальне зображення ЛА (оригінал); f_0, φ – просторова частота і фаза зміни вигляду поляризації у сигналі, що зондує; $|h|^2$ – імпульсний відклик системи, що формує зображення; $P(x, y)$ – просторовий розподіл ступеня поляризації випромінювання, що відбито $P = |\mu_{x,y}|$ при $\theta = 45^0$.

З аналізу співвідношення (3) бачимо, що розподіл інтенсивності в реєстрованому зображенні ЛА

буде промодульовано по гармонійному закону з коефіцієнтом модуляції, рівним значенню ступеня поляризації випромінювання, що відбито, в даній ділянці поверхні ЛА. По зміні контрасту модуляційної структури зображення можливо також визначити наявність різних матеріалів у складі поверхні ЛА і їх характеристики.

Підвищити стійкість (астатизм) каналу АСН відносно зриву автосупроводження ЛА можливо завдяки використанню низькочастотної фільтрації сигналів, що приймаються каналом. При наявності шумових фотонів та флуктуаційних шумів в каналі АСН актуальною є задача оптимальної фільтрації слабких сигналів. Кутове відхилення ЛА θ від рівносигнального напрямку (РСН) вимірюється МЧЧМВ, при цьому зсуваються в часі періоди огинаючих пачок імпульсів у формі частот міжмодових биттів (за один повний прохід діаграми спрямованості (ДС) лазерного випромінювання у прямому і зворотному напрямку сканування) щодо аналогічних періодів огинаючих у зустрічному напрямку. Тому необхідно оцінити точність визначення зсувів зазначених періодів при наявності фонових шумів фотодетектора (ФТД). Без обліку фонових шумів точність таких вимірів буде визначатися помилкою дискретності. Якщо, канал АСН використовувати для роботи на дальностях понад тисячі кілометрів, коли сигнал лише несуттєво перевищує фоновий шум ФТД, то дисперсія $\sigma_{\Delta T}^2$ помилки зрушення огинаючих ΔT залежить від шумів, від крутизни фронтів огинаючих, тобто від швидкості сканування k , або від відношення сигнал/шум q

$$\sigma_{\Delta T}^2 = (e / (2q)) \cdot (2\Delta\theta_x / k)^2 = 2e \cdot \Delta\theta_x^2 / (q \cdot k^2), \quad (4)$$

де $\Delta\theta_x$ – ширина ДС.

Тоді середньоквадратична похибка (СКП) кутового відхилення ЛА від РСН дорівнює

$$\sigma_{\theta}^2 = (e / 8) \cdot (\Delta\theta_x^2 / q). \quad (5)$$

Супроводження ЛА без пророкування його майбутнього положення не завжди буде високоточним (через наявність динамічних помилок). З формул (4) і (5) можливо побачити, що істотний вплив на стійкість автосупроводження ЛА, особливо на великих дальностях, робить відношення сигнал/шум та ширина ДС. Збільшити відношення сигнал/шум можливо завдяки усунення шумів ФТД. За рахунок звуження смуги пропускання ФТД та використання статистичних особливостей сигналу. Відома фільтрація випадкових процесів (сигналів) [5] пропонується на підставі рішення не інтегральних, а диференціальних рівнянь із заданими початковими умовами, тобто на основі методу Калмана-Бьюсі. Застосування МЧЧМВ дозволяє, використовуючи результати вимірювання кутової швидкості у каналі АСН, практично виключить динамічну помилку та підвищить відношення сигнал/шум [6].

Запишемо диференційне рівняння для оцінки сигналу модернізованого фільтра Калмана-Бьюсі

$$\frac{d\hat{\theta}_p(t)}{dt} = a(t)\hat{\theta}(t) + \hat{\theta}_{пв} + b(t)[(y(t) - \delta\hat{\theta}) - \hat{\theta}(t)]. \quad (6)$$

де результуюча усереднена оцінка похідної кутового сигналу $\hat{\theta}_p$

$$\hat{\theta}_p = \frac{\sigma_{К-Б}^{-2}}{\sigma_p^{-2}} \cdot \hat{\theta}_{К-Б} + \frac{\sigma_{ПВ}^{-2}}{\sigma_p^{-2}} \cdot \hat{\theta}_{ПВ}, \quad (7)$$

$\sigma_p^{-2} = \sigma_{К-Б}^{-2} + \sigma_{ПВ}^{-2}$ – результуюча точність, зворотна дисперсії помилки; $\hat{\theta}_{К-Б}$ – оцінка кутової швидкості фільтра Калмана–Бьюсі; $\hat{\theta}_{ПВ}$ – оцінка прямих вимірів кутової швидкості ЛА.

Вираз (7) для розрахунку зваженої оцінки кутової швидкості дозволяє відслідковувати динаміку зміни результуючої дисперсії помилки в залежності від сигналу та шуму. Розглянемо вплив руху ЛА на стійкість процесу кутового автосупроводження при використанні МЧЧМВ. Кутове відхилення ЛА від РСН пропорційно різниці півперіодів огинаючих руху ДС лазерного випромінювання. Ця різниця вимірюється з точністю визначення положення двох фронтів огинаючих (4). При цьому положення фронтів залежить не тільки від відхилення ЛА від РСН, але й від шумів ФТД і шумів активних елементів. Наявність загальної сумарної помилки, складеної із сумарної помилки оцінки сигналу і згладжених фонових шумів ФТД, та динамічної помилки

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_d^2 = \frac{(G'_\theta)^2}{2(b-a)} \cdot (\sigma_S^2 \cdot a + N_0 \cdot b^2) + \frac{\sigma_{\theta_x}^2}{a^2}, \quad (8)$$

може привести до зриву автосупроводження ЛА за рахунок уникнення сигналу, або за рахунок неоднозначності вимірів, якщо ця помилка перебільшить половину ДС $\Delta\theta_x/2$ лазерного випромінювання в будь-якій з ортогональних площин. При цьому σ_p^2 – сумарна помилка фільтрації сигналу та шуму, тобто сума дисперсій сигналу і згладженого шуму на вході; σ_d^2 – динамічна помилка фільтрації; G'_θ – крутість або чутливість вимірника θ МЧЧМВ; N_0 – спектральна щільність шуму на вході фільтру; $\sigma_{\theta_x}^2$ – дисперсія помилки кутової швидкості ЛА.

У реальних каналах енергетична надмірність дозволяє сигналу істотно придушити флуктуаційні помилки. Тому на перший план виходять апаратні помилки, систематичні та випадкові, зумовлені стабільністю форми ДС лазерного випромінювання, точністю закону сканування променів $\omega_{СК}$, синхронізацією

сканування, законами нечуттєвості активних електронних приладів, механічними люфтами, точністю юстировки, точністю датчиків кутових положень і тощо. Однак у каналі АСН сумарна СКП $\sigma_{\Sigma\phi}$ за рахунок зазначених чинників може бути на два-три порядки менша ніж ширина ДС

$$\sigma_{\Sigma\phi} \leq 10^{-3} \cdot \omega_{СК} = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ (град / с)}.$$

При визначених умовах, це свідчить про високу стійкість автосупроводження каналу АСН щодо зриву за умови використання інформації про кутову швидкість ЛА.

Висновки

Таким чином, запропонований канал АСН завдяки використанню лазерних сигналів із просторовою модуляцією поляризації та МЧЧМВ і вимірною інформації про кутову швидкість ЛА для вузькосмугової фільтрації забезпечить селекцію ЛА на фоні інших об'єктів і його розпізнання та високу стійкість автосупроводження.

Список літератури

1. Коломійцев О.В. Лазерна інформаційно-вимірвальна система з можливістю селекції та розпізнання ЛА / О.В. Коломійцев // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: наук.-техн. журн. – Х.: ХУ ПС. – 2009. – Вип. 2(2). – С. 91-93.
2. Полігонні лазерні та оптико-електронні вимірвальні засоби: Конспект лекцій. Частина II / С.В. Тюрін, І.С. Шостко, В.А. Романюк, В.В. Пономарьов, Р.В. Павлович. – Х.: ХВУ, 1998. – 174 с.
3. Деклараційний патент України на винахід №65099А, Україна, МПК G01 S 17/42, G01 S 17/66. Модернізований частотно-часовий метод вимірювання параметрів руху літальних апаратів / Коломійцев О.В. – № 2003054908; Заяв. 15.03.2004; Опубл. 15.03.2004; Бюл. № 3 – 4 с.
4. Лазерная космическая связь: пер. с англ. / под ред. М. Кацмана. – М.: Радио и связь, 1993. – 240 с.
5. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем: учеб. пособ. для вузов / А.А. Коростелев. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
6. Альошин Г.В., Коломійцев О.В., Рондін Ю.П. Принцип підвищення стійкості кутового автосупроводження літальних апаратів у лазерних вимірвальних системах / Г.В. Альошин, О.В. Коломійцев, Ю.П. Рондін // Збірник наукових праць. – Х.: ХВУ. – Вип. 7(37). – 2001. – С. 79-81.

Надійшла до редколегії 23.02.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

КАНАЛ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЧВМИ И ЛАЗЕРНЫХ СИГНАЛОВ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

А.В. Коломійцев

Предложен канал автоматического сопровождения летательного аппарата (ЛА) по направлению (АСН) с использованием модернизированного частотно-временного метода измерения (МЧВМИ) и лазерных сигналов с пространственной модуляцией поляризации. Это позволяет обеспечить как обработку и формирование изображения ЛА, так и высокую стойкость канала АСН, относительно срыва автосопровождения ЛА, благодаря применению узкополосной фильтрации. Раскрыта сущность работы предлагаемого канала АСН. Представлены полученные аналитические выражения для расчетов.

Ключевые слова: канал автоматического сопровождения летательных аппаратов по направлению.

CHANNEL OF AUTOMATIC ACCOMPANIMENT OF AIRCRAFT TO DIRECTION WITH THE USE OF MFTMM AND LASER SIGNALS WITH SPATIAL MODULATION OF POLARIZATION

A. V. Kolomitsev

The channel of automatic accompaniment of aircraft (A) is offered to direction (AAOD) with the use of the modernized frequency-temporal method of measuring (MFTMM) and laser signals with spatial modulation of polarization. It allows to provide both treatment and forming of image of A and high firmness of channel of AAOD, in relation to blowing off autoaccompaniment of A, due to application of by a narrow bar filtration. Essence of work of the offered channel of ASN is exposed. The got analytical expressions are presented for calculations.

Keywords: *channel of automatic accompaniment of aircrafts to direction.*