

УДК 681.375

О.В. Коломійцев¹, Д.Г. Васильєв¹, С.І. Клівець¹, О.Б. Нікітюк², Д.В. Руденко²¹Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків²Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

КАНАЛ ВИМІРЮВАННЯ ПОХИЛОЇ ДАЛЬНОСТІ ДО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З МОЖЛИВІСТЮ ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕННЯ (РОЗПІЗНАВАННЯ) ЛА

Запропоновано канал вимірювання похилої дальності до літального апарату (ЛА) для лазерної інформаційно-вимірювальної системи (ЛІВС) на основі модернізованого частотно-часового методу вимірювання (МЧЧМВ) та лазерних сигналів із просторовою модуляцією поляризації. Це дозволяє забезпечити пошук ЛА в заданій зоні із заданим законом сканування, обробку і формування його зображення (розпізнавання) та високу точність вимірювання похилої дальності. Приведено оцінка точності вимірювання радіальної швидкості.

Ключові слова: літальний апарат, лазерна інформаційно-вимірювальна система.

Вступ

Постановка проблеми. Синтез сучасної ЛІВС (нового покоління) пов'язаний з рішенням цілого ряду науково-інженерних завдань. Серед них важливе місце займає проблема пошуку ЛА, формування і обробки його зображення (розпізнавання). Це не зменшує також вимог щодо високої точності вимірювання шести параметрів руху літального апарату та інформаційному взаємозв'язку з ним [1]. Одним з перспективних напрямків розвитку методів лазерної локації є використання просторово-часової структури сигналу, що зондує. При відносно простих методах обробки такого сигналу, що приймається (відбитого від ЛА), це дозволяє підвищити ефективність ЛІВС, тому, що при формуванні сигналу, що зондує, зі складною просторово-часовою структурою відомі його параметри, які можливо використовувати при розробці методів формування і обробки зображень (розпізнавання) ЛА. Використання лазерних сигналів із просторовою модуляцією поляризації для отримання векторного зображення з використанням модифікованої системи формування зображення і спеціальної обробки зображення, що реєструється, дозволить здійснювати селекцію ЛА на фоні інших об'єктів та його розпізнавання [1]. Тому проблема синтезу каналу вимірювання похилої дальності (R) до ЛА, що додатково використовує несучі частоти (моди) одномодового багаточастотного із синхронізацією подовжніх мод випромінювання лазера для створення сигналу з просторово-часовою структурою є актуальною.

Аналіз останніх публікацій. Аналіз публікацій показує, що недоліками квантово-оптичної системи «Сажень» [2] є мала точність вимірювання похилої дальності на великій відстані до космічного апарата та кутів азимута і місця, неоперативність супроводження, неможливість вимірювання кутової та радіальної швидкостей і тощо.

Метою статті є представлення результатів розробки наукових і науково-технічних пропозицій щодо створення каналу вимірювання похилої дальності до ЛА при одночасному інформаційному взаємозв'язку з ЛА та, в разі необхідності – розпізнавання, на основі додаткового виділення мод (несучих частот) із синхронізованого одномодового багаточастотного спектра випромінювання лазера-передавача для синтезу ЛІВС з МЧЧМВ.

Виклад основного матеріалу

У каналі вимірювання похилої дальності до ЛА, принцип роботи якого заснований на використанні МЧЧМВ [3], частота проходження імпульсів лазера не може бути малою, оскільки, інакше, неможливо буде розрізнити частоти міжмодового биття. Це призводить до того, що використовувати часово-імпульсний метод на дальностях до 20000 км і більше не представляється можливим зважаючи на неоднозначність вимірювань. Дійсно, при частоті проходження імпульсів $F_{\text{пр}}=108$ Гц інтервал однозначних вимірювань похилої дальності до ЛА складає:

$$\Delta R_{\text{н}} = 2C \cdot 1/F_{\text{пр}} = 6 \text{ (м)}.$$

Для $R = 20000$ км період проходження імпульсів з погляду однозначності вимірювань ($T_{\text{пр. одн}}$)

$$T_{\text{пр. одн}} = \frac{\Delta R}{2C} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ (с)} \text{ або } F_{\text{пр}} = 15 \text{ Гц}.$$

Низька частота проходження імпульсів в спектрі випромінювання лазера в режимі активної синхронізації подовжніх мод відсутня. Тому пропонується передавати той, що зондує імпульс, методом «бланкування» випромінювання або зняттям його на малий час ($t_{\text{вл}}$ випромінювання). Зняття випромінювання на частоті міжмодового биття $\Delta \nu_{\text{м}}$ не може бути коротше, ніж на $t_{\text{пр}}=10^2 \cdot T_{\Delta \nu}=10^{-6}$ с.

Враховуючи можливе мале відношення сигнал/шум (q), погрішність вимірювання похилої да-

льності до ЛА може дорівнювати

$$\Delta R_n = 2C \cdot t_{np} = 600 \text{ м.}$$

При цьому реалізується лише груба шкала вимірювання R . Використовуючи рециркулятор при обробці пачки «фланкуючих» імпульсів, можливо досягти точності $\Delta R_n < 6 \text{ м}$ і вирішити неоднозначність вимірювань для найточнішої шкали. Погрішність визначення похилої дальності в далекомірному каналі за умовою вимірювань на частоті міжмодових биттів визначається

$$\Delta R_n = C \cdot T_{\text{МБ}} / 2 = 0,15 \text{ м,}$$

де $T_{\text{МБ}} = 10^{-8} \text{ с}$ – період частоти міжмодових биттів.

Оскільки дисперсія помилки визначення часового інтервалу дорівнює

$$\sigma_\tau^2 = \frac{T_{\text{МБ}}}{q},$$

$$\text{тоді } \sigma_R^2 = C^2 \cdot \sigma_\tau^2 = 0,14 \left(\text{м}^2 \right), \quad \sigma_R = 0,3 \text{ (м)}.$$

Створення лазерного сигналу із просторовою модуляцією поляризації здійснюється шляхом розведення лазерного випромінювання на два променя з поворотом площини поляризації на кут 90° 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 XOY буде змінюватися вдовж осі X від точки до точки. Обумовлена цією різницею фаз між поляризованими компонентами, що ортогональні, поля у картинній площині також буде змінюватися від точки до точки. 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

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

де I_x, I_y – інтенсивність випромінювання поляризаційних пучків, що ортогональні; $\nu(x)$ – 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 формують, та їх взаємна когерентність. Обмежимося тільки простим ви-

дом 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° з площиною поляризації пучків, що зондують. Зображення ЛА, що формується з виділеної складової без урахування адитивного шуму, описується

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

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 $\theta = 45^\circ$.

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.

Запропонований канал вимірювання похилої дальності до ЛА для ЛІВС з МЧЧМВ включає КЕ – керуючий елемент, БКД – блок керування дефлекторами, Лн – лазер з накачкою, МСПМ – модифікований селектор подовжніх мод, призму для частоти міжмодових биттів $\Delta\nu_m$, МБД – модифікований блок дефлекторів, П – перемикач для частот міжмодових биттів $\Delta\nu_m$ і $2\Delta\nu_m$, призму для частоти міжмодових биттів $\Delta\nu_m$, ПРДО – передаючу оптику, ПРМО – приймаючу оптику, ФТД – фотодетектори, ШП – ширококутний підсилювач, МІБ – модифікований інформаційний блок, РП – резонансні підсилювачі настроєні на відповідні частоти міжмодових биттів, ФІ – формувач імпульсів, „1”|„0” – тригер, «I» – схему „і”, Лч – лічильники, Фп – фільтр із заданою смугою пропускання, Д – детектор, ДО – диференційна оптику, Пі – підсилювач, Ф – фільтр, ДЛ – диференційний ланцюжок, Вип – випрямляч, ЕЦОМ – електронно-цифрову обчислювальну машину та БВІ – блок відображення вимірювальної інформації про похилу дальність R до ЛА (рис. 1, 2).

Робота запропонованого каналу полягає в наступному (рис. 1 – 4). Із синхронізованого однододового багаточастотного спектра випромінювання лазера (Лн) за допомогою МСПМ [5] виділяються необхідні несучі частоти та пари частот для створення:

- інформаційного каналу зв'язку, при умові використання сигналу на N несучих частотах ν_n ;

- рівносигнального напрямку (РСН) на основі формування сумарної діаграм спрямованості (ДС), завдяки частково перетинаючихся 4-х парціальних ДС, при умові використання різницевої частот міжмодових биттів

$$\Delta v_{54} = v_5 - v_4 = \Delta v_m, \quad \Delta v_{97} = v_9 - v_7 = 2\Delta v_m, \\ \Delta v_{63} = v_6 - v_3 = 3\Delta v_m, \quad \Delta v_{82} = v_8 - v_2 = 6\Delta v_m;$$

- сигналу із просторовою модуляцією поляризації на несучій частоті v_{n1} .

Сигнали на несучих частотах v_{n1} та v_n , минаючи МБД потрапляє на ПРДО, де v_n змішується з сигналом від МІБ та формує передавану інформацію для ЛА (рис. 1 – 3). Водночас сигнал частот міжмодових биттів Δv_m , $2\Delta v_m$, $3\Delta v_m$ та $6\Delta v_m$ потрапляє на МБД, який створений з 4-х дефлекторів. Парціальні ДС попарно зустрічно сканують МБД у кожній із двох ортогональних площин. Період сканування задається БКД, який разом з ЛН живляться від КЕ.

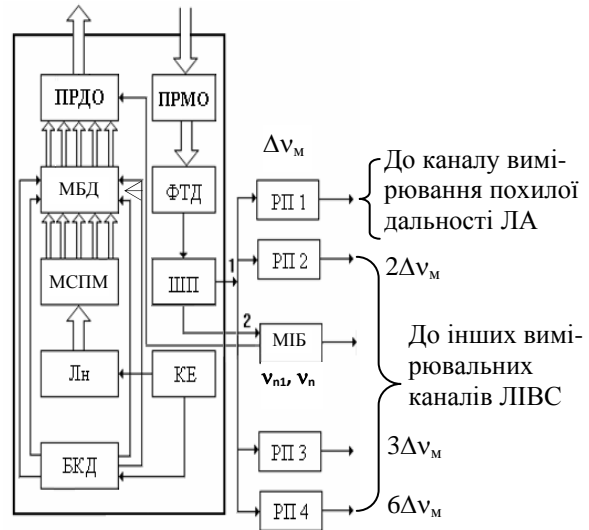


Рис. 1. Загальна схема каналу вимірювання похилої дальності в структурі ЛІВС

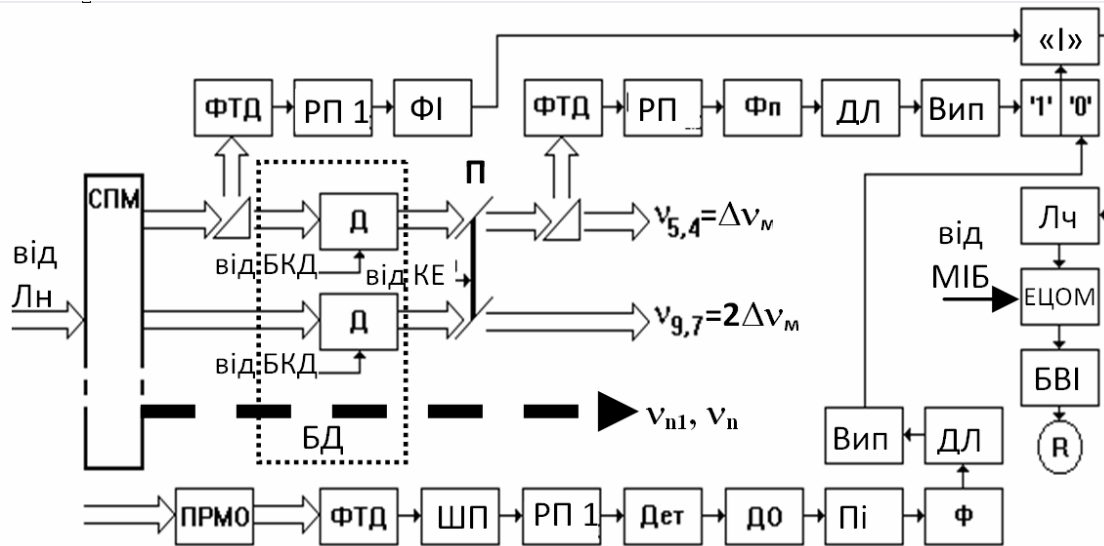


Рис. 2. Функціональна схема лазерного каналу вимірювання похилої дальності до ЛА

Проходячи через ПРДО, груповий лазерний імпульсний сигнал пар частот:

$$v_5, v_4 = \Delta v_m, \\ v_9, v_7 = 2\Delta v_m, \\ v_6, v_3 = 3\Delta v_m, \\ v_8, v_2 = 6\Delta v_m$$

фокусується в скануєми точки простору, оскільки здійснюється зустрічне сканування двома парами ДС у кожній із двох ортогональних площин α і β (або X і Y), при цьому v_n та v_{n1} – проходять вдовж РСН (рис. 3).

Принцип роботи грубої шкали каналу вимірювання похилої дальності до ЛА полягає в наступному.

Виділена МСПМ із спектру випромінювання лазера перша пара частот v_{54} розщеплюється під дією розщепителя (Р) (призми) на два оптичні сигнали:

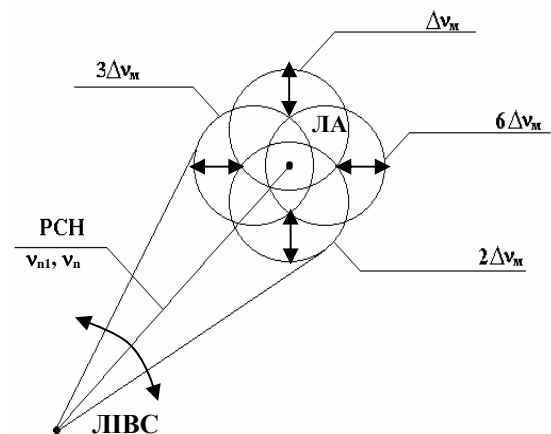


Рис. 3. Створення РСН, сканування сумарною і 4-ма парціальними ДС лазерного випромінювання, що перетинаються, та сигналу із просторовою модуляцією поляризації і N інформаційних каналів зв'язку ЛІВС з ЛА

1) основний – сканований дефлектором (Д) під певним кутом (з часом $T_{пр}$, що задається від БКД), проходить через перемикач (П) (для виділення «бланкуючого» імпульсу (бланк – нуль)) і розщепитель, де відбувається виділення додаткового сигналу (2) – поступає на ПРДО і далі на ЛА;

2) додатковий (1) – перетворюваний ФТД в електричний імпульсний сигнал різницевої частоти міжмодового биття Δv_m , підсилюється РП і поступає на формувач імпульсів ФІ, де відбувається виділення «пачок» імпульсів, що приймаються схемою «І».

Прийняті ПРМО відбиті від ЛА сигнал із просторовою модуляцією поляризації і інформаційний та в процесі сканування чотирьох ДС лазерні імпульсні сигнали і огинаючи сигнали ДС лазерного випромінювання за допомогою ФТД перетворюються в електричні імпульсні сигнали на різницевих частотах міжмодових биттів та підсилюються ШП. Вони розподіляються в МІБ v_{n1} та v_n для обробки інформації, що приймається від ЛА та по РП, побудованих на відповідні частоти міжмодових биттів: Δv_m , $2\Delta v_m$, $3\Delta v_m$, $6\Delta v_m$.

При цьому, отриманий від ФТД, перетворений додатковий оптичний сигнал частоти $v_{5,4}$ з «бланкуючими» імпульсами в сигнал Δv_m , – здобуває чіткі границі «бланкуючого» імпульсу, проходячи ДО, – підсилюється (Пі). Фільтр зі смугою пропускання $\Pi = 1/\tau_i$ (де τ_i – тривалість імпульсу) виділяє з загального сигналу «фланкуючі» імпульси – в імпульси сигнали, що, проходячи ДЛ і Вип – ($\Phi I = ДЛ + Вип$), виділяються у вигляді одного короткого імпульсу за початок «бланкуючого» імпульсу – надходять на тригер з индексом «1» – включаючи його.

На прийомному боці. Відбитий від ЛА основний сигнал частот $v_{5,4}$, у сумі з груповим, минаючи ПРМО, перетворюється ФТД в електричний імпульсний сигнал Δv_m , підсилюється ШП, виділяється в РП, як сигнал міжмодової частоти Δv_m і, проходячи через Дет, перетворюється таким же чином, як і додатковий електричний сигнал (2) частоти Δv_m , надходить тільки на тригер с индексом «0», «перекидаючи» його. Сигнал, що надходить з тригера, на схему «І», здійснює періодичне «відкриття» і «закриття» проходу для «пачок» імпульсів з ФІ, що підраховуються Лч і відпрацьовуються у вигляді числа R, через ЕЦОМ на БВІ.

Таким чином відбувається вимір похилої дальності до ЛА на грубій шкалі (рис. 4). Перехід на точну шкалу (генерація пікосекундних імпульсів) здійснюється одразу після припинення вмикання перемикача (для формування «бланкуючого» імпульсу).

Так як канал вимірювання R до ЛА пропонується ввести до складу структури ЛІВС з МЧМВ, то вмикання та вимикання перемикача (П) відбувається одночасно для 2-х (пар) частот $v_{5,4}$ і $v_{9,7}$.

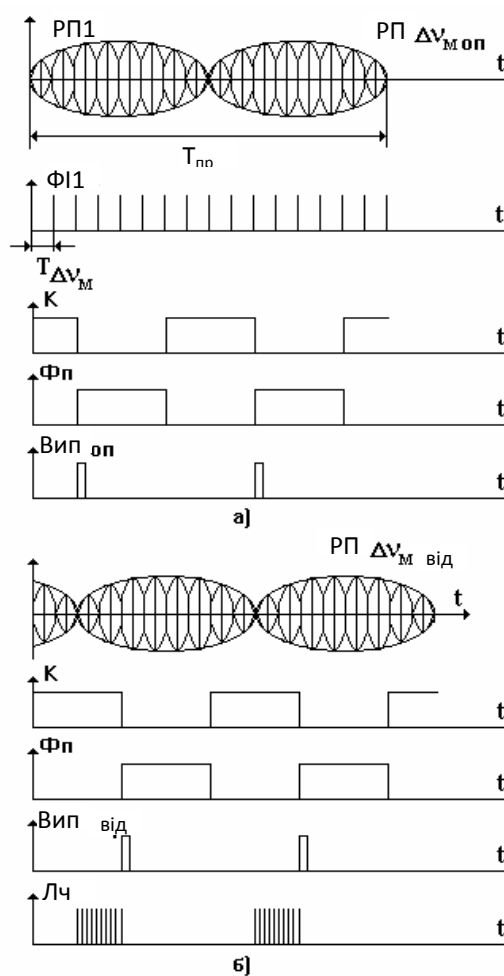


Рис. 4. Епюри напруг з виходів блоків вимірювання похилої дальності до ЛА:
 а – від блоку опорного сигналу;
 б – від блоку відбитого сигналу

Апаратні помилки вимірювання R до ЛА в каналі, що пропонується – це помилки визначення початку і кінця відліку часового інтервалу, помилки за рахунок дискретності і нестабільності частоти проходження тактових (рахункових) імпульсів.

Слід зазначити, що в даному випадку точність оцінки інтервалу визначається крутістю огинаючої при заданому граничному значенні напруги U_n . Це значить, що точність залежить від форми ДС лазерного випромінювання, що сканує і відношення сигнал/шум.

При відбитті лазерного сигналу із просторовою модуляцією поляризації, що зондує, від поверхні ЛА змінюється амплітудні і фазові співвідношення між ортогонально поляризаційними компонентами, параметри їх поляризаційні і, відповідно, комплексні коефіцієнти когерентності відбитого поля. Просторовий розподіл поляризаційних характеристик такого відбитого сигналу по зміні контрасту модуляційної структури зображення несе також інформацію про типи матеріалів у складі поверхні ЛА, їх характеристики і тощо. Тому у модифікованому інформа-

ційному блоці здійснюється також і поляризаційна обробка поля, що приймається.

Формування сумарної ДС лазерного випромінювання, створення РСН, інформаційного каналу і лазерного сигналу із просторовою модуляцією поляризації для каналу, що пропонується, пов'язано із задоволенням жорстких вимог, що пред'являються до спектру випромінювання одномодового багаточастотного єдиного лазера-передавача, тобто високоточної синхронізації подовжніх мод і стабілізації частот міжмодових биттів.

Кількість інформаційних каналів (N), що формуються, залежить від кількості мод (несучих частот ν_n), які мають необхідні вихідні характеристики для використання.

В разі необхідності виявлення ЛА у заданій точці простору, складений із частот міжмодових биттів груповий сигнал сканується у вигляді сумарної ДС лазерного випромінювання за допомогою модифікованого блоку дефлекторів, де кут та напрямок відхилення сумарної ДС задається блоком керування дефлекторів.

Випромінювання, яке знаходиться біля рівня втрат синхронізованого одномодового багаточастотного спектру лазера-передавача та є невелике за потужністю – не використовується.

Висновки

Таким чином, запропонований канал вимірювання похилої дальності до ЛА забезпечить:

– створення N інформаційних каналів взаємозв'язку з ЛА, при умові використання сигналу на ν_n несучих частотах;

– створення РСН на основі формування сумарної ДС лазерного випромінювання, завдяки частково перетинаючихся 4-ох парціальних ДС, при умові використання різницевих частот міжмодових биттів:

$$\Delta\nu_{54} = \nu_5 - \nu_4 = \Delta\nu_M, \quad \Delta\nu_{97} = \nu_9 - \nu_7 = 2\Delta\nu_M;$$

$$\Delta\nu_{63} = \nu_6 - \nu_3 = 3\Delta\nu_M, \quad \Delta\nu_{82} = \nu_8 - \nu_2 = 6\Delta\nu_M;$$

– сканування сумарною і 4-ма парціальними ДС лазерного випромінювання, що перетинаються, в заданому куті із заданим законом сканування;

– створення сигналу із просторовою модуляцією поляризації для формування та обробки зображення (розпізнавання) ЛА;

– вимірювання похилої дальності до ЛА;

– синтез частки ЛІВС з МЧЧМВ.

Список літератури

1. Коломійцев О.В. Лазерна інформаційно-вимірвальна система з можливістю селекції та розпізнавання ЛА / О.В. Коломійцев // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: ХУПС, 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, 6 МПК G01 S 17/42, G01 S 17/66. Модернізований частотно-часовий метод вимірювання параметрів руху літальних апаратів / О.В. Коломійцев. – № 2003054908; Заяв. 29.05.2003; Опубл. 15.03.2004; Бюл. № 3. – 8 с.

4. Лазерная космическая связь: пер. с англ. / Под ред. М. Кацмана. – М.: Радио и связь, 1993. – 240 с.

5. Патент України на корисну модель № 43725, Україна, МПК H04 Q 1/453. Модифікований селектор подовжніх мод / О.В. Коломійцев, Г.В. Альошин, В.В. Белімов та ін. – № u200903693; Заяв. 15.04.2009; Опубл. 25.08.2009; Бюл. № 16. – 6 с.

Надійшла до редколегії 28.04.2010

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

КАНАЛ ИЗМЕРЕНИЯ НАКЛОННОЙ ДАЛЬНОСТИ ДО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ (РАСПОЗНАВАНИЯ) ЛА

А.В. Коломийцев, Д.Г. Васильев, С.И. Клевев, О.Б. Никитюк, Д.В. Руденко

Предложен канал измерения наклонной дальности до летательного аппарата (ЛА) для лазерной информационно-измерительной системы (ЛИИС) на основе модернизируемого частотно-часового метода измерения (МЧЧМИ) и лазерных сигналов с пространственной модуляцией поляризации. Это позволяет обеспечить поиск ЛА в заданной зоне с заданным законом сканирования, обработку и формирование его изображения (распознавание) и высокую точность измерения наклонной дальности до ЛА. Приведена оценка точности измерения наклонной дальности до ЛА.

Ключевые слова: летательный аппарат, лазерная информационно-измерительная система.

CHANNEL OF MEASURING OF SLOPING DISTANCE TO AIRCRAFT FOR LASER INFORMATIVELY-MEASURING SYSTEM WITH POSSIBILITY OF FORMING AND TREATMENT OF IMAGE (RECOGNITIONS) OF AN AIRCRAFT

A.V. Kolomitsev, D.G. Vasiliev, S.I. Klivets, O.B. Nikitjuk, D.V. Rudenko

The channel of measuring of sloping distance to aircraft (A) is offered for the laser informatively-measuring system (LIMS) on the basis of the modernized frequency-sentinel method of measuring (MFSMM) and laser signals with spatial modulation of polarization. It allows to provide the search of A in the set area with the set law of scan-out, treatment and forming of his image (recognition) and high exactness of measuring of sloping distance to A. An estimation over of exactness of measuring of sloping distance to is brought.

Keywords: aircraft, laser informatively-measuring system.