

УДК 681.51

О.В. Коломійцев¹, Д.Г. Васильєв², Р.В. Воробйов¹, Д.М. Воронов¹, О.М. Ставицький¹¹Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків²Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України, Феодосія

КАНАЛ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПОЛІГОННОГО ВИПРОБУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Запропоновано канал вимірювання кутових швидкостей літальних апаратів (ЛА) для лазерної інформаційно-виміральної системи (ЛІВС) з частотно-часовим методом (ЧЧМ) пошуку, розпізнавання та вимірювання параметрів руху ЛА полігонного випробувального комплексу (ПВК). Представлені результати оцінки точностних характеристик та схематичні рішення каналу. Розкрито сутність роботи та приведені епюри напруг з виходів блоків запропонованого каналу.

Ключові слова: канал вимірювання кутових швидкостей літальних апаратів, лазерна інформаційно-вимірвальна система.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасний ПВК повинен відповідати задачам випробувань. Він значною мірою визначає як темп, так і рівень відпрацювання перспективних зразків озброєння і військової техніки. Тому створення та розвиток окремих інформаційно-вимірвальних систем зокрема, і ПВК у цілому, повинно йти з випередженням, щоб до моменту проведення випробувань нових зразків ЛА ПВК задовольняв запропонованим вимогам.

Високий рівень розвитку лазерної техніки, відкриває широкі можливості для вирішення завдань високоточного вимірювання параметрів руху (ВІР) та багатоканального лазерного зв'язку із ЛА.

Відомо, що чим вище несуча частота каналу зв'язку, тим більше його пропускна спроможність. Тому здійснюється перехід на все коротші довжини хвиль. Довжина світлової хвилі в середньому на шість порядків менше довжини хвилі радіодіапазону, тому за допомогою лазерного випромінювання можлива передача набагато більшого об'єму інформації.

На полігонних випробувальних комплексах знаходяться в експлуатації лазерні інформаційно-вимірвальні системи, які не повною мірою задовольняють усезростаючим до них вимогам, особливо для початкової ділянки траєкторії польоту ЛА. Крім того, в ЛІВС не використовується повною мірою спектр лазерного випромінювання та не враховується його багаточастотність з боку подовжніх мод. Все це є наслідком того, що ЛІВС мають ряд істотних недоліків, основними з яких є: недостатні стійкість інформаційного зв'язку з ЛА і кількість його траєкторних ВІР, здійснення автосупроводження ЛА, як правило, за програмою, або при взаємозв'язку із радіолокаційними системами. Тому задача розробки каналу вимірювання кутових швидкостей ЛА в межах рішення загальної проблеми синтезу ЛІВС з

ЧЧМ пошуку, розпізнавання та вимірювання параметрів руху ЛА полігонного випробувального комплексу із метою забезпечення багатоканального інформаційного зв'язку з ЛА, необхідної кількості і високої точності траєкторних ВІР ЛА при одночасному його стійкому кутівому автосупроводженні у широкому діапазоні дальностей є актуальною.

Аналіз останніх публікацій. Аналіз публікацій за тактико-технічними характеристиками лазерних систем даного класу показує, що недоліками квантово-оптичної системи «Сажень» [1], є мала точність вимірювання похилої дальності на великій відстані до космічного апарата (КА) та кутів азимута і місця, неоперативність супроводження та неможливість вимірювання кутових швидкостей (тангенціальної складової швидкості) і радіальної швидкості КА.

Метою статті є представлення результатів розроблених наукових і науково-технічних пропозицій щодо створення каналу вимірювання кутових швидкостей ЛІВС з ЧЧМ полігонного випробувального комплексу на основі виділення подовжніх мод і їх комбінацій із спектра синхронізованого одномодового багаточастотного випромінювання лазера.

Виклад основного матеріалу

За допомогою модифікованого селектора подовжніх мод (МСПМ) [2], модифікованого блоку дефлекторів та ЧЧМ пошуку, розпізнавання та вимірювання параметрів руху ЛА [3] в ЛІВС із ЧЧМ можливо забезпечити виділення необхідних подовжніх мод (несучих частот) і їх комбінацій з спектру одномодового багаточастотного із синхронізацією подовжніх мод лазерного випромінювання єдиного лазера-передавача, для створення чотирьох діаграм спрямованості (ДС) лазерного випромінювання, їх фокусування у визначені точки простору та роботу на N частотах.

Запропонований канал вимірювання кутових швидкостей ЛА для структури ЛІВС містить керую-

чий елемент (КЕ), блок керування дефлекторами (БКД), лазер з накачкою (Лн), модифікований селектор подовжніх мод (МСПМ), модифікований блок дефлекторів (МБД), передавальну оптику (ПРДО), приймальну оптику (ПРМО), фотодетектор (ФТД), ширококутовий підсилювач (ШП), інформаційний блок з розширеними можливостями (ІБРМ) із 6 – введенням сигналу тангенціальної складової швидкості (кутових швидкостей) ЛА, що виміряна, резонансні підсилювачі (РП), настроєні на відповідні частоти міжмодових биттів, формувачі імпульсів, тригери „1” „0”, схеми „і” («І»), реверсивні лічильники (РЛч), схеми порівняння (СП), електронну обчислювальну машину (ЕОМ) та $\Delta v_{m\text{оп}}$ – введення опорних сигналів з частотами міжмодових биттів ($\Delta v_{m\text{оп}}$, $2\Delta v_{m\text{оп}}$, $3\Delta v_{m\text{оп}}$, $6\Delta v_{m\text{оп}}$) від передавального лазера.

Робота запропонованого каналу вимірювання кутових швидкостей ЛА для ЛІВС ПВК полягає у наступному. Із синхронізованого одномодового багаточастотного спектра випромінювання лазера-передавача (Лн) за допомогою МСПМ виділяються необхідні окремі несучі частоти і їх комбінації для створення (рис. 1, 2):

- лазерного сигналу із просторовою модуляцією поляризації та багатоканального ($N v_n$) інформаційного зв'язку, за умови використання сигналу з подовжніх мод (несучих частот v_{n1} та v_{n2});

- рівносигнального напрямку (РСН) на основі формування сумарної ДС лазерного випромінювання, завдяки частково перетинаючихся 4-х парціальних діаграм спрямованості, за умови використання комбінацій подовжніх мод («підфарбованих» різницею частотами міжмодових биттів)

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

За допомогою МСПМ та ІБРМ створюється лазерний сигнал із просторовою модуляцією поляризації шляхом створення лазерного випромінювання з двох окремих несучих частот (v_{n1} та v_{n2}) у вигляді двох променів з вертикальною (v_{n1}) та горизонтальною (v_{n2}) поляризацією (рис. 3). При цьому випромінювання апертури першого і другого поляризаційних каналів в апертурній площині $V0U$ рознесе-ні на відомій відстані Δv_q . Різниця ходу пучків до картинної площині ЛА $X0Y$ змінюється вдовж осі X від точки до точки. Обумовлена цією різницею фаз (амплітуд) між поляризованими компонентами, що ортогональні, поля у картинній площині також змінюється від точки до точки. В залежності від різності фаз (амплітуд) у картинній площині змінюється 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 Δv_q та відстанню до картинної

площині R . Розподіл інтенсивності в реєстрованому зображенні ЛА промодульовано по гармонійному закону з коефіцієнтом модуляції, дорівнює значенню ступеня поляризації випромінювання, що відбито в даній ділянці поверхні ЛА.

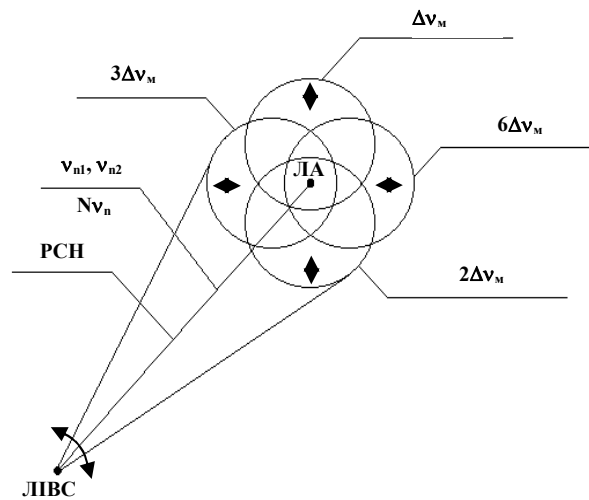


Рис. 1. Створення РСН та сканування ДС лазерного випромінювання

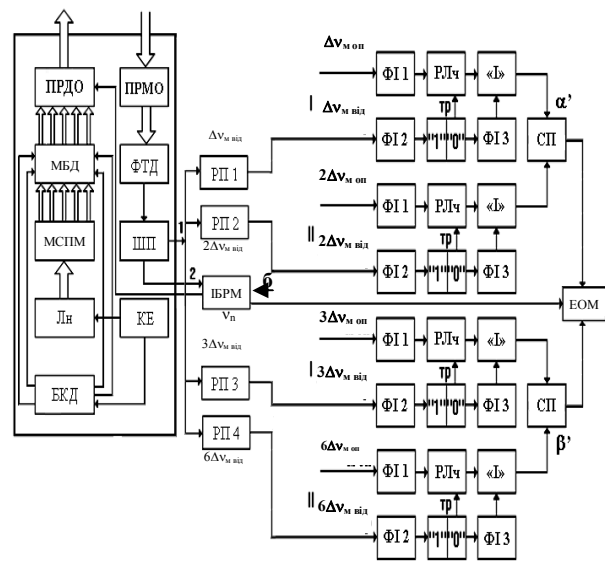


Рис. 2. Канал вимірювання кутових швидкостей ЛА

Період зміни вигляду поляризації визначається базою між випромінювачами Δv_q і відстанню до картинної площині R (ЛА) та при довжині хвилі λ [4]

$$T = \lambda \cdot R / \Delta v_q \quad (1)$$

Інтенсивність сигналу, що зондує за аналізатором, орієнтованим під кутом θ до площиней поляризації, що формують пучки, відповідно 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.

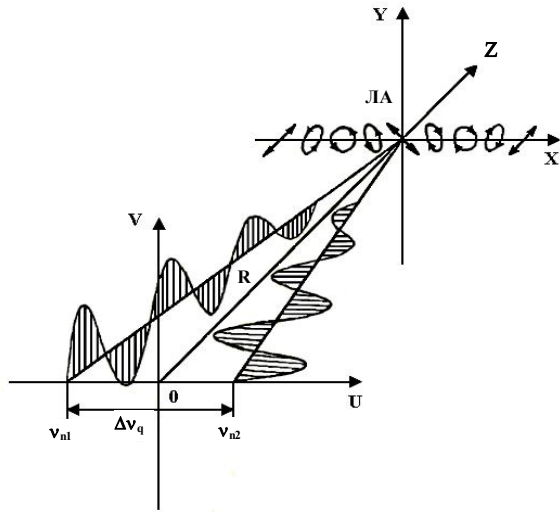


Рис. 3. Створення лазерного сигналу із просторовою модуляцією поляризації

Із (2) бачимо, що на характеристики сигналу, що зондує, впливає не тільки геометрія умов локації, а також співвідношення інтенсивності пучків, які формуються, та їх взаємна когерентність. При цьому, 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, площість поляризації яких складають 45° з площістю поляризації пучків, що зондують. Зображення ЛА, що формується з виділеної складової без урахування адитивного шуму, описується

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

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 $\theta = 45^\circ$.

Сигнал, який складений із окремо виділених МСПМ несучих частот v_n , минаючи МБД, потрапляє на ПРДО, де змішується (модулюється) з інформаційним сигналом від ІБРМ та формує багатоканальний (N) інформаційний сигнал, що передається на ЛА (рис. 1, 2). Водночас сигнал частот міжмодових биттів $\Delta v_m, 2\Delta v_m, 3\Delta v_m$ та $6\Delta v_m$ потрапляє на МБД, який створений з 4-х п'єзоелектричних дефлекторів. Парціальні ДС лазерного випромінювання попарно

зустрічно сканують МБД у кожній з двох ортогональних площин (рис. 1, 2). Період сканування задається БКД, який разом з Лн живляться від КЕ.

Груповий лазерний імпульсний сигнал пар частот $v_5, v_4 = \Delta v_m, v_9, v_7 = 2\Delta v_m, v_6, v_3 = 3\Delta v_m$ та $v_8, v_2 = 6\Delta v_m$ проходячи через ПРДО, фокусується в скануєми точки простору, оскільки здійснюється зустрічне сканування (із заданим кутом відхилення ДН від РСН) двома парами ДС лазерного випромінювання у кожній з двох ортогональних площин α і β (X і Y). При цьому інформаційні сигнали та лазерний сигнал із просторовою модуляцією поляризації на несучих частотах v_{n1} і v_{n2} проходять вдовж РСН.

Відбиті в процесі сканування чотирьох ДС від ЛА інформаційні та лазерні імпульсні сигнали і огинаючи сигнали ДС лазерного випромінювання приймаються ПРМО. За допомогою фотодетектора вони перетворюються в електричні імпульсні сигнали на несучій частоті та різницевих частотах міжмодових биттів. Підсилені ШП вони розподіляються:

- в ІБРМ для обробки інформації, що приймається від ЛА та відбитого лазерного сигналу із просторовою модуляцією поляризації, що зондує, від його поверхні;
- по РП, які настроєні на відповідні частоти міжмодових биттів Δv_m від, $2\Delta v_m$ від, $3\Delta v_m$ від, $6\Delta v_m$ від.

Імпульсні сигнали радіочастоти, що надходять з РП 1 і РП 2 (РП Δv_m від і РП $2\Delta v_m$ від) формують сигнал прискорення α' , а РП 3 і РП 4 (РП $3\Delta v_m$ від і РП $6\Delta v_m$ від) – прискорення β' .

Відбитий від поверхні ЛА лазерний сигнал із просторовою модуляцією поляризації, що зондує, несе в собі змінені амплітудні і фазові співвідношення між ортогонально поляризаційними компонентами. Параметри їх поляризаційні і, відповідно, комплексні коефіцієнти когерентності відбитого поля.

Із (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 обраній ділянці поверхні ЛА. Просторовий розподіл поляризаційних характеристик отриманого відбитого сигналу по зміні контрасту модуляційної структури зображення несе в собі також інформацію про типи матеріалів у складі поверхні ЛА, їх характеристики і тощо, що відображається у ЕОМ, тому у ІБРМ також здійснюється поляризаційна обробка поля, що приймається. Формування сигналу прискорення α' полягає у такому.

Виділені імпульси ФІ 1 першої І лінії від опорної частоти $\Delta v_{m оп}$ надходять на реверсивний лічильник (РЛч 1) (рис. 4). У цей же час відбитий від ЛА оптичний сигнал частоти міжмодових биттів, який перетворюється ФТД у радіочастоту міжмодових биттів $\Delta v_{m від}$, змінюється по закону руху ДС лазерного випромінювання, перетворюється у другій лінії

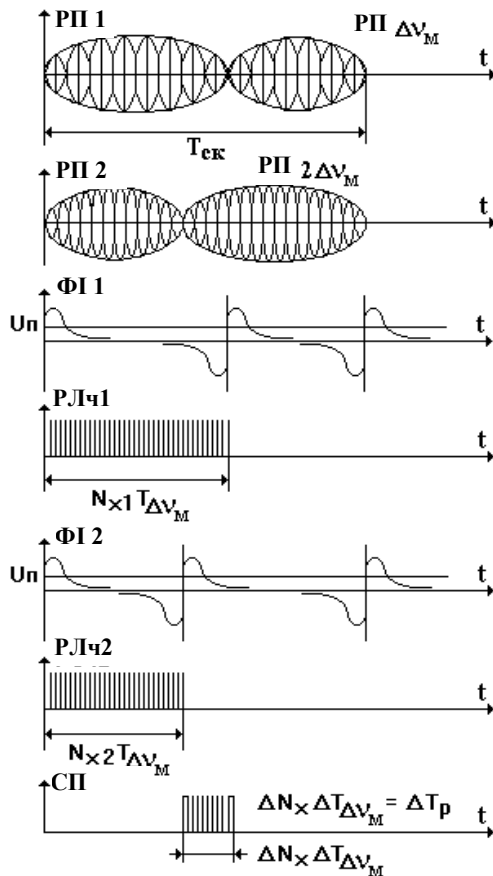


Рис. 4. Елюри напруг з виходів блоків каналу вимірювання кутових швидкостей

Після ФІ 2 у точках переходів півперіодів сканування в імпульси (один імпульс за півперіод сканування), надходить на тригер «1» та запускає його першим імпульсом. Перший імпульс, який надходить від тригера відкриває РЛч для рахування імпульсів від ФІ 1 і схему «А» для перезапису на схему порівняння. Другий імпульс від тригера надходить на реверсивний вхід того ж РЛч, який здійснює зворотній рахунок імпульсів, що надходять через нього. Третій і т.д. імпульси надходять на тригер та роблять аналогічні дії першому. Другий імпульс не надходить на схему «А», а третій імпульс надходить, як і перший, на ФІ 3, схему «Б», пропускає різниче число на схему порівняння і т.д.

Таким чином, в РЛч записується число імпульсів, порівняно різності подовженого та покороченого (руху ДС) півперіоду сканування.

Півперіод сканування подовжується тоді, коли швидкість руху ЛА співпадає зі швидкістю руху ДС лазерного випромінювання, а коли не співпадає – покорочується (рис. 4).

Формування сигналу прискорення β' відбувається таким же чином, як для прискорення α' . Отримання інформації про кутові швидкості (прискорення α' і β') з її відображенням відбувається в ЕОМ. Для збереження інформації, яка оброблена під час проведення випробувань ЛА, в пам'яті ЕОМ

використовується база даних – сукупність взаємопов'язаних даних, організованих у відповідності до схеми даних таким чином, щоб з ними міг працювати користувач.

Отримана вимірювальна інформація про тангенціальну складову швидкості (кутові швидкості) ЛА від каналу кутових швидкостей через введення б поступає у ІБРМ, де завдяки додатковій обробці елементів поляризаційної матриці розсіяння ЛА від отриманого поляризаційного поля (суми сигналів різної поляризації) забезпечується точне значення кутових швидкостей ЛА, розширюється набір ознак його розпізнавання, підвищується ефективність та скорочується час на розпізнавання ЛА, що супроводжується.

Якщо необхідно виявити ЛА у заданій точці простору, груповий сигнал, який складений із частот міжмодових биттів і несучих частот ν_n , сканується у заданій зоні із заданим законом сканування у вигляді сумарної ДС лазерного випромінювання за допомогою МБД, де кут та напрямок відхилення сумарної ДС задається БКД (рис. 2, 3).

Створення РСН на ЛА, формування сумарної ДС лазерного випромінювання, інформаційного каналу для каналу, що пропонується, пов'язано із задоволенням жорстких вимог, які пред'являються до спектру випромінювання одномодового багаточастотного єдиного лазера-передавача, тобто високоточної синхронізації подовжніх мод і стабілізації частот міжмодових биттів. При цьому, кількість інформаційних каналів (N), що формуються, залежить від кількості мод (несучих частот ν_n), які мають необхідні вихідні характеристики для використання.

Дисперсія оцінки $\sigma_{\alpha',\beta'}$ похибки прискорення (кутової швидкості) [5] для запропонованого каналу

$$\sigma_{\alpha',\beta'}^2 = \frac{e}{2} \cdot \frac{U_L^2}{q}, \quad (4)$$

де q – відношення сигнал/шум,

U_L – лінійна швидкість руху апертури ДС лазерного випромінювання на дальності R до ЛА.

Висновки

Таким чином, запропоновано канал вимірювання кутових швидкостей ЛА для синтезу ЛІВС з ЧЧМ полігонного випробувального комплексу, який забезпечить: виявлення ЛА, високоточне вимірювання кутової складової швидкості (прискорення α' і β') у широкому діапазоні дальностей, починаючи з початкового моменту його польоту, багатоканальний (N) інформаційний взаємозв'язок з ЛА на несучих частотах ν_n , збереження інформації, яка оброблена під час проведення досліджень і випробувань та розширення набору ознак розпізнавання ЛА, що отримуються, підвищення ефективності і скорочення часу на його розпізнавання.

Список літератури

1. Полігонні лазерні та оптико-електронні вимірювальні 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.
2. Патент на корисну модель № 43725 Україна, МПК G01 S 17/42, G01 S 17/66. Модифікований селектор подовжніх мод / О.В. Коломійцев, Г.В. Альошин, Д.Г. Васильєв та ін. – № u200903693; заяв. 15.04.2009; опубл. 25.08.2009; Бюл. № 16. – 6 с.
3. Патент на корисну модель № 55645, Україна, МПК G01 S 17/42, G01 S 17/66. Частотно-часовий метод пошуку, розпізнавання та вимірювання параметрів руху літального апарату / О.В. Коломійцев – № u201005225;

заяв. 29.04.2010; опубл. 27.12.2010; Бюл. № 24. – 14 с.

4. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем: учеб. пособие для вузов / А.А. Коростелев. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.

5. Канал вимірювання кутових швидкостей літальних апаратів для ЛІВС з використанням ЧЧМ та можливістю формування і обробки зображення ЛА / О.В. Коломійцев, Д.Г. Васильєв та ін. // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ. – 2011. – Вип. 1(17). – С. 84-88.

Надійшла до редколегії 03.03.2012

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

**КАНАЛ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ПОЛИГОННОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

А.В. Коломийцев, Д.Г. Васильев, Р.В. Воробьев, Д.Н. Воронов, О.Н. Ставицкий,

Предложен канал измерения угловых скоростей летательных аппаратов (ЛА) для лазерной информационно-измерительной системы (ЛИИС) с частотно-временным методом (ЧВМ) поиска, распознавания и измерения параметров движения ЛА полигонного испытательного комплекса (ПИК). Представленные результаты оценки точностных характеристик и схематические решения канала. Раскрыта суть работы и приведены эпюры напряжений с выходов блоков предложенного канала.

Ключевые слова: канал измерения угловых скоростей летательных аппаратов, лазерная информационно-измерительная система.

**CHANNEL OF MEASURING OF ANGULATORS OF AIRCRAFTS FOR LASER
INFORMATIVELY-MEASURING SYSTEM GROUND PROOF-OF-CONCEPT COMPLEX**

O.V. Kolomitsev, D.G. Vasilev, R.V. Vorobjov, D.M. Voronov, O.M. Stavitskyi

The channel of the measuring of angulators of aircrafts (A) is offered for the laser informatively-measuring system (LIMS) with the frequency-temporal method (FTM) of search, recognition and measuring of parameters of motion of A of ground proof-of-concept complex (GPCC). Presented results of estimation of exactness descriptions and schematic decisions of channel. Essence of work and the brought expires over of tensions is exposed from the exits of blocks of the offered channel.

Keywords: channel of the measuring of angulators of aircrafts, laser informatively-measuring system.