

УДК 681.51

Коломійцев О. В., Кулагін К. К., Мегельбей В. В., Нос І. А., Філіппенков О. В.
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА ОДНОПУНКТНА СИСТЕМА ЗОВНІШНЬО-ТРАЄКТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ РАКЕТ-НОСІЇВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Розроблені пропозиції щодо створення багатопараметричної однопунктної системи (БОС) зовнішньо-траєкторних вимірювань (ЗТВ) ракет-носіїв (РН) космічних апаратів (КА), що здійснюють старт з морської платформи, яка знаходиться на екваторіальній зоні. Невеликі ваго-габаритні характеристики системи та висока точність ЗТВ РН КА досягається за рахунок використання частот міжмодових биттів єдиного лазера-передавача та частотно-часового методу (ЧЧМ) вимірювання. Селекція комбінацій подовжніх мод зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією подовжніх мод лазерного випромінювання (ЛВ) та їх сканування у вигляді 4-х парціальних діаграм направленості (ДН) на приймальному боці системи за відбитими від РН КА сигналами дозволяє здійснювати одночасне вимірювання 6-ти параметрів руху (ПР) РН КА. Запропонована функціональна схема багатопараметричної системи ЗТВ РН КА та розкрита сутність її роботи. Отримані аналітичні вирази для розрахунку точності ЗТВ РН КА.

Ключові слова: багатопараметрична однопунктна система, зовнішньо-траєкторні вимірювання, ракета-носій, космічний апарат, лазерне випромінювання, діаграма спрямованості.

Вступ

Постановка проблеми. Створення і експлуатація ракетно-космічного комплексу «Морський старт» є одним з прикладів плідної міжнародної співпраці компаній і підприємств США, Росії, Норвегії і України в області ракетної техніки. Цей проект не має аналогів у світі. Він відкрив нову сторінку в ракетно-космічній техніці.

В основу проекту «Морський старт» покладені технічні напрацювання і дослідження, проведені ракетно-космічною корпорацією «Енергія» спільно з ДКБ «Південне» ім. М.К. Янгеля та іншими підприємствами ракетно-космічної техніки.

Вибір схеми та структури контролю і управління польотом РН КА за програмою «Морський старт» здійснювався за рахунок [1]:

- багаторічного досвіду розвитку ракетно-космічної галузі, що мається, за контролем і управлінням польотом розгінних блоків (РБ) при запусках РН «Протон» з космодрому Байконур з різними корисними навантаженнями, що виводяться на геостационарні, високоеліптичні і інші орбіти [2];
- специфіки підготовки РН «Зенит-3SL» у Базовому порту м. Лос-Анджелеса (США) та старт РН з стартової платформи з акваторії Тихого океану з повною відсутністю стаціонарних комунікаційних засобів в стартовому районі;
- балістичної схеми польоту РН КА;
- об'єднання технічних засобів контролю і управління польотом на складально-командному судні (СКС) комплексу у рамках автоматизованої системи управління польотом (АСУП) РБ.

Балістична схема польоту РН КА являє собою ділянки польоту, що послідовно спрягаються [3]:

- виведення РБ ДМ-SL з КА – блоком корисного вантажу (БКВ) РН «Зенит-3SL» на проміжну орбіту;
- двохімпульсний маневр РБ ДМ-SL з

виведенням БКВ на проміжну, а потім на високоеліптичну геоперехідну орбіту (ГСО);

- відділення БКВ від РБ і виведення КА на цільову орбіту (геостационарну) за допомогою власної рухової установки КА.

Однією з основних задач, що вирішується плавучим командно-вимірювальним комплексом є отримання і обробка траєкторної інформації (ЗТВ) про рух РБ (до відділення КА траєкторні дані поступають в центр керування польотом у складі телеметрії із СКС і за схемою зв'язку Sea Launch через TDRSS, а після відділення КА – у складі телеметрії із станцій стеження).

При цьому, вимірювальними параметрами руху РН КА є дальність та радіальна швидкість. Апаратні похибки вимірювання на дальності до ГСО складають – не більше 10 м за дальністю та 0,1 м/с за радіальною швидкістю.

Таким чином, збільшення кількості параметрів руху РН КА, що вимірюються, а також отримання інформації про ЗТВ з високою точністю – є актуальною науково-технічною задачею, яку необхідно вирішувати.

Аналіз літератури. Аналіз відомої літератури та довідкової інформації в мережі інтернет [1 – 13], які присвячені питанням за програмою «Морського старту» та побудові високоточних систем ЗТВ показує, що необхідне та можливе створення однопунктної системи, яка дозволить здійснювати одночасне вимірювання з високою точністю 6-ти ПР РН КА і автоматичне супроводження.

Мета статті. Розробка пропозицій щодо створення багатопараметричної однопунктної системи, яка забезпечить ЗТВ РН КА (вимірювання з високою точністю 6-ти ПР) за програмою «Морський старт».

Основний матеріал

Технологія підготовки і пуску РН «Зенит-3SL» є наступною. У базовому порту здійснюється вантаження на СКС складових частин ракети, БКН і палива. Зібрана ракета переміщається в ангар

стартової платформи, де готується до старту.

СКС з командою і екіпажем відходить на відстань 5-8 км. Системи судна та платформи забезпечують дистанційне автоматичне здійснення пуску РН КА.

Ракетно-космічний комплекс «Морський старт» складається з наступних основних частин.

Ракетний сегмент:

- комплекс ракети космічного призначення "Зенит-3SL";
- комплекс автоматизованих систем управління підготовкою і пуском;
- автоматизована система управління польотом розгінного блоку;
- вимірювальний комплекс (рис. 1).

Сегмент космічного апарату:

- блок корисного вантажу з космічним апаратом. Морський сегмент (рис. 2):
- стартова платформа "Odyssey";
- складально-командне судно "Sea Launch Commander".

Базовий порт:

- приміщення підготовки блоку корисного вантажу;
- приміщення зберігання східців ракети-носія і розгінних блоків;
- офісні і допоміжні приміщення.

Кошти, що залучаються :

- центр управління польотом розгінного блоку;
- центр управління польотом космічного апарату;
- супутники-ретранслятори, вимірювальні пункти та ін.



Рис. 1 – Зовнішній вигляд антен ВБ162 та АУ СМ391А на СКС



Рис. 2 – Морський сегмент: СКС Sea Launch Commander та стартова платформа Odyssey

Зовнішньо-траєкторні вимірювання необхідні для визначення параметрів траєкторій літальних апаратів (ЛА) (різних класів і призначення) – координат, вектору швидкості, кутового положення в просторі та ін. Для забезпечення ЗТВ використовуються радіотехнічні (радіолокатори, фазові пеленгатори, радіодалекоміри) та оптичні (кінотеодоліти, кінотелескопи, лазерні далекоміри) засоби. Оптичні засоби ЗТВ мають високу точність, але застосування їх обмежене метеоумовами. Радіотехнічні засоби, поступаючись оптичним в точності, але незалежні від метеоумов, мають безліч модифікацій та широко використовуються [6, 7].

Сучасні засоби ЗТВ характеризуються багатопараметричністю (вимірюються не лише координати, але і складові вектору швидкості, різниці координат, тощо). багатоканальністю (забезпечуються одним засобом вимірювання параметрів одночасно декілька ЛА), великою дальністю дії, високими точністю, надійністю, а також мірою автоматизації, що дозволяє обробляти дані на електронно-обчислювальній машині (ЕОМ) і отримувати параметри траєкторії ЛА в реальному масштабі часу. Розміщення радіотехнічних і оптичних засобів ЗТВ, в основному, здійснюється на землі та у різних комбінаціях в залежності від об'єкту випробування.

За результатами проведеного аналізу існуючої літератури і мережі інтернет, а також наукових досягнень за напрямком побудови високоточних систем ЗТВ КА, ЛА і тощо визначено, що провідні країни світу акцентують свою увагу на створенні комбінованих систем (КС), в яких висока точність вимірювання параметрів руху забезпечується завдяки використанню лазерного джерела випромінювання (рис. 3, 4).



Рис. 3 – КС «MARS»



Рис. 4 – КОС «Сажень-ТМ»

На приклад, мобільна однопунктна система «Сажень-ТА» призначена для проведення високоточних ЗТВ та забезпечує виявлення ЛА в денних і нічних умовах, його автоматичне супроводження, вимірювання кутових координат та похилої дальності у видимому і інфрачервоному діапазонах, а також оперативні обробку результатів вимірювання і видачу отриманих даних в канали зв'язку (рис. 5).



Рис. 5 – КОС «Сажень-ТА»

Запропонована багатопараметрична система ЗТВ РН КА, яка складається з основних елементів

(рис. 6):

- ПРМ-ПРД А – приймально-передавальній апаратури, що містить ЛМ – лазерний модуль та OEM – оптико-електронний модуль, який складається з телевізійного і інфрачервоного каналів; ЛМ і OEM одночасно розміщені на ГП – гіростабілізованій платформі (опорно-поворотному пристрої);
- вимірювального блоку, що містить: ПФК – пристрій формування каналів (вимірювальних), канал вимірювання похилої дальності R до РН КА, канал вимірювання радіальної швидкості R', канал вимірювання кутів азимута α і місця β та кутових швидкостей α' і β' (тангенціальній швидкості U_τ), ПФСП – пристрої формування сигналів похибки (по кутам азимута і місця);
- ВМ – виконавчих механізмів по кутах α і β ;
- ЕОМ – електронно-обчислювальної машини.

Оптико-електронний модуль здійснює у видимому та ІЧ діапазонах спостереження за РНКА. Отримана інформація від телевізійного і інфрачервоного каналів поступає на ЕОМ, де додатково використовується для підвищення стійкості супроводження РН КА.

Лазерний модуль виконує наступні функції:

- формує лазерні зондуючі сигнали (комбінації подовжніх мод) зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією подовжніх мод лазерного випромінювання (ЛВ) у вигляді чотирьох парціальних діаграм спрямованості (ДС);
- здійснює зустрічне сканування парами парціальних ДС ЛВ у кожній з двох ортогональних площин (рис. 7);
- отримує відбиті від РН КА лазерні сигнали та перетворює їх до радіосигналів.

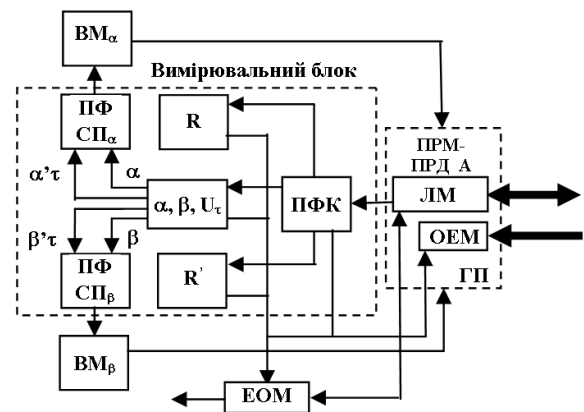


Рис. 5 – Узагальнена блок-схема БОС ЗТВ

Вимірювальний блок розподіляє радіосигнали по вимірювальним каналам, які забезпечують отримання інформації про ЗТВ РН КА (похилу дальність до РНКА, кути азимута і місця, радіальну і кутові (тангенціальну) швидкості), яка поступає на ЕОМ, а також формує сигнали похибки по кутам для їх відпрацювання.

Інформація про кутові швидкості РН КА використовується за прямим призначенням та для компенсації динамічної і флуктуаційної похибок фільтрації при автосупроводженні РН КА.

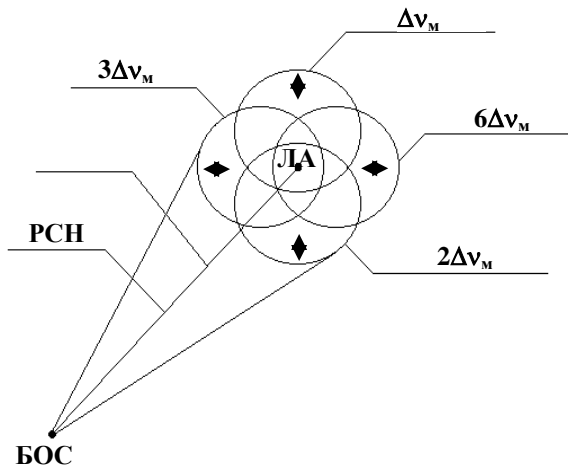


Рис. 7 – Формування 4-х парціальних ДС ЛВ, що перетинаються та створення РСН на РН КА

Виконавчі механізми (ВМ_α і ВМ_β) розвертають платформу, на якій розміщена ПРМ-ПРД А таким чином, щоб РН КА знаходився на рівносигнальному напрямку (РСН) сумарної ДС ЛВ.

Гіростабілізована платформа забезпечує дотримання просторової стабілізації платформи.

ЕОМ оброблює, відображає (за необхідністю), накопичує (зберігає) отриману інформацію про ЗТВ РН КА та передає її до споживачів. Додаткове застосування в ЕОМ алгоритмів реалізації просторової і часової надмірності, а також алгоритмів пошуку і виключення грубих похибок вимірювання параметрів руху РН КА дозволяє отримувати реальну інформацію про ЗТВ з високою швидкістю.

Завдяки використанню зустрічного сканування 4-х парціальних ДС ЛВ у кожній з двох ортогональних площин та еталонних частот міжмодових биттів здійснюється наступне [12, 13]:

– за порівнянням зрушень періодів огинаючих пачок імпульсів частот міжмодових биттів за один повний прохід ДС ЛВ у прямому і зворотному напрямках сканування відносно аналогічних періодів огинаючих у зустрічному напрямку в кожній з двох ортогональних площин – за різницею зрушень періодів огинаючих за допомогою цифрового часо-імпульсного методу вимірювання формуються сигнали похибки за двома вісями координат та визначаються з високою точністю кути азимута і місця, а також величина і знак кута відхилення РН КА від РСН (рис. 8).

Дисперсія похибки кута відхилення РН КА від РСН визначається за формулою:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2e\theta_m^2}{q} \quad (1)$$

де
$$\theta_m = \frac{k_{ск} \cdot T_{ск}}{2} \quad (2)$$

– ширина ДС ЛВ,
 $k_{ск}$ – швидкість сканування ДС ЛВ,
 $T_{ск}$ – час сканування ДС ЛВ,
 q – відношення сигнал/шум.

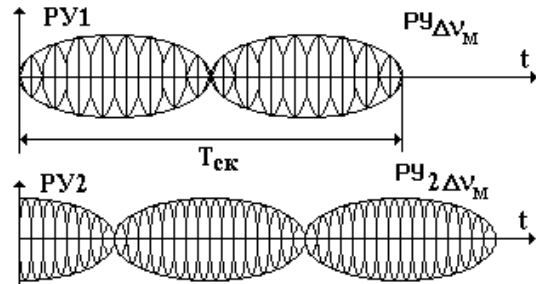


Рис. 8 – Зрушення періодів огинаючих пачок імпульсів частот міжмодових биттів за один повний прохід ДС ЛВ у прямому і зворотному напрямках сканування

За тривалістю напівперіодів огинаючих пачок імпульсів частот міжмодових биттів за один прохід ДС ЛВ у одному напрямку сканування відносно аналогічного напівперіоду огинаючої у зустрічному напрямку у кожній з двох ортогональних площин – за різницею тривалостей огинаючих за допомогою цифрового часо-імпульсного методу вимірювання з високою точністю визначаються кутові швидкості РН КА (рис. 9):

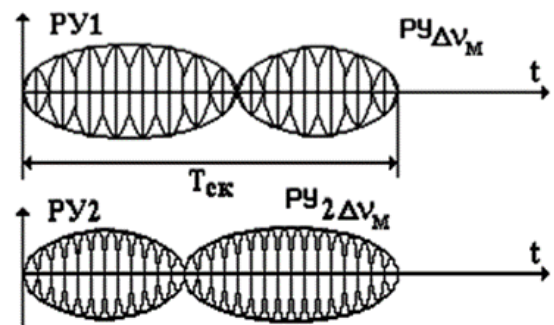


Рис. 9 – Тривалість напівперіодів огинаючих пачок імпульсів частот міжмодових биттів за один прохід ДС ЛВ у одному напрямку сканування

дисперсія похибки вимірювання тангенціальної швидкості РН КА визначається за формулою:

$$\sigma_{v_t}^2 = \frac{e}{2} \cdot \frac{V_{л}^2}{q} \quad (3)$$

де
$$V_{л} = R\omega_{ск} \quad (4)$$

– лінійна тангенціальна швидкість ДС ЛВ на

дальності R до РНКА (лінійне відхилення РН КА від РСН),

$\omega_{ск}$ – кутова швидкість сканування парціальними ДС ЛВ.

Дисперсія похибки вимірювання кутової швидкості РН КА визначається за формулою:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{e}{2} \cdot \frac{\omega_{ск}^2}{q} \quad (5)$$

При цьому напівперіод сканування ДС ЛВ подовжується тоді, коли швидкість руху РН КА співпадає зі швидкістю руху ДС ЛВ, і коли не співпадає – коротшає.

Завдяки використанню еталонних частот міжмодових биттів, генерації пікосекундних імпульсів (створення "точної" шкали), запізнювання частот міжмодових биттів та формування "бланкуючих" імпульсів (створення «грубої» шкали) – реалізується багатоскальне високоточне вимірювання похилої дальності до РН КА і усувається неоднозначність вимірювань.

Дисперсія похибки вимірювання похилої дальності до РН КА визначається за формулою:

$$\sigma_R^2 = C^2 \cdot \frac{T_{МБ}}{q} \quad (6)$$

де C – швидкість світла;

$T_{МБ}$ – період частоти міжмодових биттів.

Завдяки використанню еталонних частот міжмодових биттів і частоти підставки (фазової автопідстройки частоти) – реалізується

доплерівське високоточне вимірювання радіальної швидкості РНКА.

Дисперсія похибки вимірювання радіальної швидкості РН КА визначається за формулою:

$$\sigma_{\dot{R}} = \frac{\sigma_{\Delta v_{М допл}}}{\Delta v_{М}} C \quad (7)$$

де $\sigma_{\Delta v_{М допл}}$ – дисперсія похибки вимірювання частоти Допплера,

$\Delta v_{М}$ – частота міжмодових биттів.

Висновки

Таким чином, міжнародна програма «Морський старт» реалізує ідею використання морської платформи для здійснення комерційних космічних запусків з екваторіальної зони Тихого океану. Головною перевагою плавучого космодрому є можливість його розміщення безпосередньо на екваторі, що дозволяє максимально використати ефект обертання Землі і з меншими витратами виводити супутники на високі геостационарні орбіти.

Розроблені пропозиції щодо створення багатопараметричної однопунктної системи, яка увійде до складу вимірювального комплексу та забезпечить ЗТВ РН КА (одночасне вимірювання з високою точністю похилої дальності, кутів азимута і місця, радіальної і кутових швидкостей при стійкому кутовому автоматичному супроводженні).

Список літератури

1. Кравец В.Г. Особенности контроля и управления полетом ракеты космического назначения по программе «морской старт» / В.Г. Кравец // *Космическая техника и технологии*. – 2014. – Вып. № 2 (5). – С. 74 – 86.
2. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева. На рубеже двух веков. 1996-2001 гг. // Королев: РКК «Энергия», 2001.
3. Бродский И.Э., Кравец В.Г. Особенности связи и обмена информацией при пусках КА с «Морского старта» // *Полет*. 2000 г. № 3. Статья поступила в редакцию 20.02.2014 г.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sea-launch.info/main.htm>.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW.nsf/proectR/556E2A7EF2DC3090C3256BF8004C1C4C?OpenDocument&Lang=R>.
6. Знаменская А.М. Космические траекторные измерения. – М., 1969.
7. Стрелец В.А. Методы и средства измерения больших длин для метрологического обеспечения систем внешнетраекторных измерений. – Х., 2002.
8. Мобильная однопунктовая система для внешнетраекторных измерений ММОС «Сажень-ТА». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/dlya-poligonov/136-sagen-ta.html>.
9. 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.
10. Батраков А.С., Бутусов М.М., Гречка Г.П. и др. Лазерные измерительные системы / Д.П. Лукьянов – М.: Радио и связь. – 1981. – 456 с.
11. Kudriashov V. 'Experimental Evaluation of Opportunity to Improve the Resolution of the Acoustic Maps'. In: Kountchev R. and Nakamatsu K. (eds.), *New Approaches in Intelligent Image Analysis, Intelligent Systems Reference Library 108*, pp. 353-373. Springer International Publishing Switzerland 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-32192-9_11, SJR: 0.154.
12. Информационные технологии и системы в управлении, образовании, науке. [Коллективная монография]. [А.В. Коломийцев и др.]; под ред. В.С. Пономаренко. – Х.: Цифрова друкарня № 1. – 2013. – 278 с.
13. 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. Коломийцев – № u201005225; заяв. 29.04.2010; опубл. 27.12.2010; Бюл. № 24. – 14 с.

References:

1. Kravets VG Features of control and control of the flight of a rocket of a space purpose under the program "Sea Launch" / VG Kravets // *Space technology and technology*. - 2014. - Vip. No. 2 (5). - P. 74 - 86.
2. Rocket-space corporation "Energy" named after S.P.Korolyov. At the turn of the two centuries. 1996-2001 // Korolyov: RSC Energia, 2001.
3. Brodsky IE, Kravets VG Features of communication and information exchange at launches of spacecraft from "Marine start" // *Flight*. 2000 No. 3. The article was submitted to the editorship on 02/22/2014.
4. [Electronic resource]. - Access mode: <http://sea-launch.info/main.htm>.
5. [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW.nsf/proectR/556E2A7EF2DC3090C3256BF8004C1C4C?OpenDocument&Lang=R>.
6. Znamenskaya AM Space trajectory measurements. - M., 1969.
7. Sagittarius VA Methods and instruments for measuring long lengths for the metrological support of systems of external-dimensional measurements. - Kh., 2002.
8. A mobile one-point system for external-tracking measurements of SJEN-TA MMCOS. [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/dlya-poligonov/136-sagen-ta.html>.
9. Polygon laser and opto-electronic measuring instruments: A summary of lectures. Part II / SV Tyurin, I.S. Shostko, VA Romanyuk, VV Ponomarev, R.V. Pavlovich - X.: XBY, 1998. - 174 c.
10. Batrakov AS, Butusov MM, Grechka G.P. and others. Laser measuring systems / Д.П. Лукьянов - Moscow: Radio and communication. - 1981 - 456 pp.
11. Kudriashov V. 'Experimental Evaluation of Opportunity to Improve the Resolution of the Acoustic Maps'. In: Kountchev R. and Nakamatsu K. (eds.), *New Approaches in Intelligent Image Analysis, Intelligent Systems Reference Library 108*, pp. 353-373. Springer International Publishing Switzerland 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-32192-9_11, SJR: 0.154.
12. Information technologies and systems in management, education, science. [Collective monograph]. [AV Kolomytsev and others]; ed. VS Ponomarenko - X.: Digital printing-house No. 1. - 2013. - 278 p.
13. Patent for Utility Model No. 55645, Ukraine, IPC G01 S 17/42, G01 S 17/66. Frequency-time method of search, recognition and measurement of the parameters of the aircraft movement / O.V. Kolomiitsev - № u201005225; statements. April 29, 2010; has published 27.12.2010; Bull No. 24. - 14 p.

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОДНОПУНКТНАЯ СИСТЕМА ВНЕШНЕ-ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.В. Коломийцев, К.К. Кулагин, В.В. Мегельбей, И.А. Нос, А.В. Филиппенков

Разработаны предложения по созданию многопараметрической однопунктной системы внешне-траекторных измерений (ВТИ) ракет-носителей (РН) космических аппаратов (КА), которые осуществляют старт с морской платформы, находящейся в экваториальной зоне. Небольшие массо-габаритные характеристики системы и высокая точность ВТИ РН КА достигается за счет использования частот межмодовых биений единственного лазера-передатчика и частотно-временного метода измерения. Селекция комбинаций продольных мод из спектра одномодового многочастотного с синхронизацией продольных мод лазерного излучения и их сканирование в виде 4-х парциальных диаграмм направленности на приемной стороне системы по отраженным от РН КА сигналам позволяет осуществлять одновременное измерение 6-ти параметров движения РН КА. Предложена функциональная схема многопараметрической системы ВТИ РН КА и раскрыта сущность ее работы. Получены аналитические выражения для расчета точности ВТИ РН КА.

Ключевые слова: многопараметрическая однопунктная система, внешне-траекторные измерения, ракета-носитель, космический аппарат, лазерное излучение, диаграмма направленности

MULTIPARAMETRIC ONE-POINT EXTERNAL TRACKING SYSTEM OF SPACECRAFT LAUNCH VEHICLES

O.V. Kolomiitsev, K.K. Kulagin, V.V. Megelbey, I.A. Nos, O.V. Filippenkov

Proposals for the development of multiparametric one-point external tracking system of spacecraft launch vehicles, which start from the sea-based launch platform located in the equatorial zone, have been developed. Small mass-dimensional characteristics of the system and high accuracy of external-trajectory measurements are achieved by using the frequencies of intermode beats of a single laser-transmitter and a time-frequency measurement method. Selection of combinations of longitudinal modes from the spectrum of a single-mode multifrequency with synchronization of longitudinal modes of laser radiation and their scanning in the form of four partial directional patterns on the receiving side of the system from the signals reflected from the of spacecraft launch vehicle allows simultaneous measurement of the six parameters of the motion of the spacecraft launch vehicle.

A functional scheme of a multiparameter measurement system is proposed and the essence of her work is revealed. The analytical expressions for calculating the accuracy of the multiparametric one-point external tracking system of spacecraft launch vehicles are obtained.

Keywords: multiparameter one-point system, external-trajectory measurements, launch vehicle, spacecraft, laser radiation, directional pattern