

УДК 621.391

*Олександр Юрійович Пермяков
Сергій Валентинович Ковбасюк
Ігор Давидович Варламов*

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ДАНИХ В БАГАТОПОЗИЦІЙНОМУ РАДІОЛОКАЦІЙНОМУ КОМПЛЕКСІ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

Актуальність

З підвищенням інтенсивності освоєння людством навколосезонного простору набуває актуальності завдання контролю космічного простору. Оперативна і точна інформація про стан та зміну космічної обстановки взагалі і параметри руху космічних об'єктів (КО) зокрема необхідна для розв'язання задач в інтересах національної безпеки і оборони та розвитку зовнішньоекономічної діяльності держави.

Вирішення завдань по контролю космічного простору в Україні покладено на Систему контролю і аналізу космічної обстановки (СКАКО). Результатом роботи наземних інформаційних засобів СКАКО повинен стати каталог космічних об'єктів, основою якого є початкові умови руху КО. Знаходження початкових умов руху КО проводиться шляхом статистичної обробки траєкторних вимірювань.

Можливість організації роботи СКАКО безпосередньо залежить від точності визначення початкових умов руху КО в радіолокаційних станціях (РЛС) СКАКО, які є основними інформаційними засобами СКАКО та здійснюють контроль космічного простору цілодобово у будь-яких погодних умовах. На даний час організувати точне визначення орбітальних параметрів КО неможливо в наслідок низької точності методів траєкторної обробки в існуючих в Україні РЛС 5Н86М, що визначається їх основним призначенням – попередженням про ракетний напад, та застарілістю програмного і технологічного комплексів.

Таким чином, розробка підходів до обробки вимірювальної інформації в радіолокаційних засобах контролю космічного простору з метою точного визначення параметрів руху КО є актуальною задачею.

Постановка завдання

Алгоритми траєкторної обробки РЛС 5Н86М реалізовані зі значними спрощеннями (на базі скалярних фільтрів ковзного згладжування) і проводять обробку вимірювань координат КО не зі всього часового інтервалу знаходження КО в зоні

дії РЛС, а тільки на інтервалі супроводу, що призводить до низької (незадовільної) точності оцінювання траєкторних параметрів КО ними [1] для виконання завдань СКАКО.

Великий внесок в розвиток теорії побудови і оптимізації вимірювальних траєкторних систем внесли В. Є. Дулевич, В. С. Шебшасвич, Я. Д. Ширман, П. А. Агаджанов, С. Д. Сильвестров та ін. У цих роботах знайшли, зокрема, віддзеркалення питання оцінки потенційних можливостей систем, виявлення оптимальних структурних співвідношень, системний підхід до вимірювальних комплексів.

Результати аналізу робіт, присвячених проблемі модернізації і розробки нових методів траєкторної обробки в РЛС СКАКО, доводять, що пропонуємої підходи: або, виходячи з потреб оперативності, використовують різноманітні спрощення, що знижує точнісні характеристики отриманих оцінок; або при забезпеченні необхідних точнісних характеристик використовують кінцево-різницеві числові методи, які характеризуються високою обчислювальною складністю, що призводить до зниження оперативності проведення розрахунків. Таким чином, першим питанням є вибір методу обробки вимірювальних даних в РЛС контролю космічного простору та модернізація програмно-алгоритмічного забезпечення з метою підвищення точності визначення орбітальних параметрів спостережуваних КО.

Один з перспективних напрямів підвищення точності визначення орбітальних параметрів КО – створення багатопозиційних комплексів, що складаються з рознесених у просторі радіолокаційних станцій, спільно ведучих радіолокаційне спостереження цілей [2-4].

Підвищення точності визначення параметрів руху КО у багатопозиційному радіолокаційному комплексі (БП РЛК) залежить від кількості вимірювальних засобів, їх тактико-технічних характеристик, методів обробки і комплексування інформації в багатопозиційній системі, часу перебування КО в зоні контролю кожного

вимірювального засобу, що входить до складу комплексу, а також від їх взаємного розміщення і об'єкта спостереження – геометричного фактору [5,6]. Якщо залежність впливу кількості інформаційно-вимірювальних засобів, їх характеристик, величини бази на результуючу точність визначення параметрів руху КО достатньо досліджені [3,4,7] і свідчать про ефективність використання багатопозиційних комплексів з великими базами, то вплив геометричного фактору, а саме кутів візування об'єкта спостереження по азимуту і куту місця є недостатньо дослідженими. Крім того, з точки зору забезпечення максимальної точності визначення орбітальних параметрів при мінімальних вимогах до перепускної здатності каналів передачі даних між РЛС актуальною також є задача вибору методу комплексування вимірювальної інформації в БП РЛК.

Таким чином, метою статті є розробка моделі комплексування даних радіолокаційних вимірювань для точного визначення параметрів орбіт космічних об'єктів.

Основний матеріал

Особливість траєкторної інформації про КО в РЛС обумовлена двома причинами. Перша полягає в тому, що вимірювані параметри (наприклад, дальність D , радіальна швидкість \dot{D} , азимут A і кут місця E) нелінійно залежать від параметрів траєкторії КО, наприклад, від поточних координат геоцентричної системи координат $(X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$, де X, Y, Z – координати КО, що характеризують його положення, а $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$ – швидкості зміни відповідних координат). У свою чергу, ці координати пов'язані з шуканими параметрами – початковими умовами руху КО на момент часу $t_0 = 0$, $X(0) = \hat{X}_0 = (x_0, y_0, z_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0)$, – через системи нелінійних диференціальних рівнянь руху КО. Таким чином, не можна отримати лінійний зв'язок між вимірюваними і шуканими параметрами.

З усіх відомих підходів до проведення вдосконалення методу траєкторної обробки в РЛС спостереження КО, виходячи із основного критерію – забезпечення максимальних точнісних характеристик оцінювання траєкторних параметрів КО, зважаючи на розгляд некерованого (балістичного) руху КА при адитивних, некорельованих, незміщених похибках вимірювання, задаючись критерієм мінімуму дисперсії проведеної оцінки, необхідно обрати підхід, що формулюється наступним чином [8-10]:

Використовуючи динамічну модель руху КА (векторне диференціальне рівняння руху КА)

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = f(X) \quad (1)$$

де $X = (x_i)^T$ – вектор параметрів руху КА, $i = 1 \dots 6$;

рівняння вимірювання (функціональну відповідність між параметрами, що вимірюються – $D, E, A, \dot{D}, \dot{E}$, та поточними параметрами руху КО).

$$Z = \varphi(X) \quad (2)$$

де Z – m -мірний вектор параметрів, що вимірюються; вибірку вимірювань

$$Y = (y_1, \dots, y_{N-m}) \quad K_Y = \text{diag}(K_{Y_1}, \dots, K_{Y_{N-m}}) \quad (3)$$

$$T_N = (t_1, t_1 + T_{\text{отл}}, \dots, t_N - T_{\text{отл}}, t_N)$$

де N – кількість проведених вимірювань;

m – максимальна кількість параметрів, що вимірюються;

T_N – часова сітка, на якій проведені вимірювання,

потрібно із записаної на основі методу найменших квадратів багатоточкової крайової задачі (використовуючи проведення визначення траєкторних параметрів по повній вибірці вимірювань).

$$\hat{X}_0 = \arg \left\{ \min \left[(Y - Z(X_0))^T K_Y^{-1} (Y - Z(X_0)) \right] \right\}, \quad (4)$$

знайти методом Ньютона (6) оцінку вектора траєкторних параметрів КО \hat{X}_0 :

$$X_0 = (x_{i0})^T, \quad i = 1 \dots 6 \quad (5)$$

$$x_0^{i+1} = x_0^i - \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial X_0} \right)^T \cdot K_Y^{-1} \cdot \frac{\partial Z}{\partial X_0} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial Z}{\partial X_0}^T \cdot K_Y^{-1} \cdot (Y - Z(X_0)) \Bigg|_{x_0^i} \quad (6)$$

де $\partial Z / \partial X_0$ – матриця частинних похідних від вимірювальних параметрів за вектором ПУ руху КА.

Метод Ньютона обрано, виходячи з його квадратичної збіжності, що дасть найбільш швидкодійну обчислювальну схему [11]. У зв'язку з відміченою вище нелінійністю залежності Z від X мінімізація функціоналу здійснюється у загальному випадку ітераційно.

Кореляційна матриця похибок оцінювання орбітальних параметрів визначається наступним виразом:

$$K_{\hat{X}_0} = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_0}^T K_Y^{-1} \frac{\partial Z}{\partial X_0} \right)^{-1} \quad (7)$$

Друга причина особливості траєкторної обробки полягає в методах комплексування вимірювальної інформації з автономних РЛС в БП РЛК.

Найбільш ефективним з точки зору розв'язку задач контролю космічного простору є побудова БП РЛК з великими базами, в якому величини баз між позиціями совимірні з дальністю до КО. Перевагами побудови таких БП РЛК на базі автономних активних РЛС є: надмірність інформації, яка отримується з кожної РЛС, а саме $D_{Nm}, E_{Nm}, A_{Nm}, \dot{D}_{Nm}, \dot{E}_{Nm}$; отримання даних про ціль з суттєво рознесених просторових напрямів.

Основними методами комплексування інформації в некогерентному радіолокаційному комплексі спостереження за КО на базі РЛС типу 5Н86М можна вважати комплексування на рівні:

- одиничних вимірів координат;
- траєкторій цілей при попередньому вирішенні ряду завдань обробки одиничних вимірів в РЛС.

Перший полягає в передачі на загальний обчислювальний комплекс всіх виміряних

координат від всіх автономних вимірювачів, на якому відбувається обробка даних, наприклад, рішення багатоточкової крайової задачі, а саме вагове згладжування в просторі одночасно всіх параметрів вимірювань РЛС. Оцінка ж вектора траєкторних параметрів КО видається в геоцентричній системі координат. В цьому випадку вектор параметрів руху КО знаходиться за виразом (8), а точність його оцінювання (9).

$$X_0^{i+1} = X_0^i - \left[\sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right]^T K_{Y_j}^{-1} \frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right]^{-1} \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right]^T K_{Y_j}^{-1} (Y_j - Z_j(X_0)) \Bigg]_{X_0^i} \quad (8)$$

$$K_{\hat{X}_0} = \left(\sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial Z}{\partial X_0} \right]^T K_{Y_j}^{-1} \frac{\partial Z}{\partial X_0} \right)^{-1} \quad (9)$$

де n – кількість РЛС в БП РЛК.

Такий підхід до проведення траєкторної обробки, якщо прийняти, що в постановці завдання немає (не введено) методичних помилок, рівняння вимірювання і модель руху КО точно описують всі дійсні (реальні) процеси, дозволить отримати оцінку вектора траєкторних параметрів з потенційними точнісними характеристиками. Перевагою методу є можливість досягнення максимальної точності, недоліком – необхідність наявності високопропускних каналів для передачі всіх виміряних даних.

Результати імітаційного моделювання порівняння збільшення точності визначення вектора положення КО в БП РЛК з малими та великими базами відносно до однопозиційної РЛС наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Точність визначення положення КО у БП РЛК

Критерії якості	Кількість РЛС в БП РЛК		
	n = 2	n = 3	n = 4
$\sigma_{ r }^1 / \sigma_{ r }^n$, малі бази	1,43	1,72	2
$\sigma_{ r }^1 / \sigma_{ r }^n$, великі бази	3,2	22	30

Другий метод комплексування даних в БП РЛК полягає в обробці прийнятих даних на кожному з автономних вимірювачів і передачі на загальний обчислювальний комплекс результатів обробки – векторів положення і кореляційних матриць похибок оцінювання, де вони комплексується. В цьому випадку розгляду підлягає кількість не виміряних координат, а інтервалів обробки даних з автономних РЛС:

$$X_0^{i+1} = X_0^i - \left[\left(\sum_{j=1}^n K_{X_j}^{-1} \right)^{-1} \sum_{j=1}^n K_{X_j}^{-1} X_{0j} \right]_{X_0^i} \quad (10)$$

$$K_{\hat{X}_0} = \left(\sum_{j=1}^n K_{X_j}^{-1} \right)^{-1} \quad (11)$$

З врахуванням нелінійності процесів, що розглядаються такий варіант рішення траєкторної задачі не дає потенційно можливих результатів, оскільки отримати значення матриці частинних похідних з такою ж точністю, як при обробці всього об'єму даних, теоретично неможливо [12]. Практично ж при високій точності апріорних даних, високій точності виміру параметрів руху КО і малій кількості інтервалів обробки даних (кількості РЛС в БП РЛК) можна отримати результати, близькі до потенційних.

Враховуючи той факт, що такий метод об'єднання інформації не вимагає наявності високопропускних ліній передачі інформації, а при лінеаризації методів обробки даних (що є на практиці) і невеликій кількості вимірювальних засобів дозволить максимально наблизити точність результату до потенційної, при рішенні задачі оцінки впливу кутів візування об'єкту спостереження на точність визначення параметрів руху КО в БП РЛК візьмемо його за основу.

Під час досліджень впливу кутів візування було розглянуто двопозиційний радіолокаційний комплекс з великою базою (рис. 1), де на спільній ділянці спостереження РЛС проводиться вимірювання параметрів руху КО в радіолокаційній системі координат та кутів візування ($\alpha_1, \beta_1, \beta_2$) у різні моменти часу, де α_1 – кут між проекціями напрямку спостереження на ціль двох РЛС, $\beta_{1,2}$ – кути місця цілі, при розгляді іншої геометрії тієї ж задачі. Для з'ясування аналітичної залежності точності визначення параметрів руху КО в БП РЛК від кутів візування цілі спостереження було проведено дослідження окремого випадку, коли $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, де під точністю параметрів в загальному вигляді розглядалися точнісні параметри координат положення КО в ГСК $\zeta(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$. У результаті обробки даних вимірювань в БП РЛК функціональну залежність точнісних параметрів можна представити у вигляді:

$$\zeta = f(\alpha, \beta) \quad (12)$$

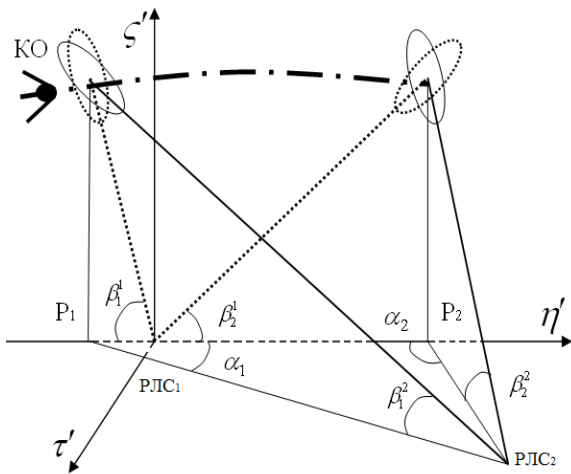


Рис. 1.

Кути α і β є функціонально залежними від географічних координат дислокації РЛС ϕ_1, λ_1 , де $1 = \overline{1..n}$ та від вектора поточного положення КО в зоні спостереження БП РЛК. Відповідно до цього вираз (12) можна записати у вигляді:

$$\zeta = f(\phi_1, \lambda_1, Y_1(t_i)) \quad (13)$$

де $Y_1(t_i)$ – вектор вимірних координат об'єкта спостереження у дискретні моменти часу t_i при $i = \overline{1..N}$, де N – кількість вимірювань, проведених РЛС.

З рис. 1 видно, що при одних і тих же вихідних даних загальна точність оцінювання орбітальних параметрів КО при комплексуванні даних з двох РЛС, що визначається виразом (11) і отримується як результат перетину двох еліпсоїдів, щільність розподілу яких розподілена за нормальним законом, а орієнтація визначається пунктовими системами координат РЛС, – буде різною для різних моментів часу. Дослідження такої залежності при комплексуванні інформації для двох РЛС представлені на рис. 2, що отримані шляхом математичного моделювання в інтегрованому середовищі символічної математики *MAPLE*. Представлена залежність визначника кореляційної матриці похибок оцінювання $\varphi(K_{\hat{x}_0})$ від кутів візування цілі доводить, що вибір часу комплексування даних в БП РЛК в межах спільної ділянки спостереження дає можливість отримати найвищу точність визначення орбітальних параметрів КО при однакових вихідних даних.

Отримані висновки дозволяють створити модель комплексування вимірювальної інформації в БП РЛК з великими базами, структурна схема якої представлена на рис. 3, для розв'язку задачі високоточного моніторингу космічного простору.

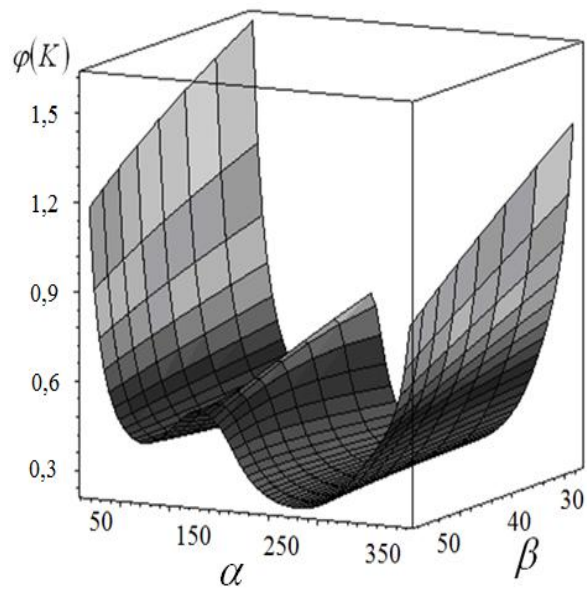


Рис. 2.

Висновки

В ході проведених досліджень проаналізовано процес статистичної обробки зовнішньотракторних вимірювань в радіолокаційних станціях спостереження космічних об'єктів, на основі чого встановлено, що реалізовані в радіолокаційних станціях супроводження космічних об'єктів метод і алгоритми траєкторної обробки за основним критерієм – вихідна точність проведення оцінювання траєкторних параметрів не задовольняють сучасним вимогам.

З метою точного визначення орбітальних параметрів КО запропоновано:

обробку даних в автономній РЛС проводити з використанням динамічної моделі руху КО, обробляти дані зі всієї ділянки спостереження, в якості методу безумовної оптимізації вимірювань використовувати метод найменших квадратів, записаний по методу Ньютон, що має найбільш швидкодійну схему обчислення;

створити багатопозиційний радіолокаційний комплекс з великими базами на базі активних РЛС з активним прийомом, перевагою якого є надлишкова інформація з суттєво рознесених просторових напрямів; у якості методу комплексування даних вибрано метод комплексування траєкторій, що дозволить використовувати низько швидкісні лінії передачі даних;

розраховувати оптимальні кути візування КО для РЛС та час комплексування даних в БП РЛК, що дозволить отримати найкращі точнісні показники при однакових вихідних даних. Запропоновані підходи можуть бути використані при вирішенні оптимізаційної задачі планування роботи вимірювальних засобів та побудови структури БП РЛК.

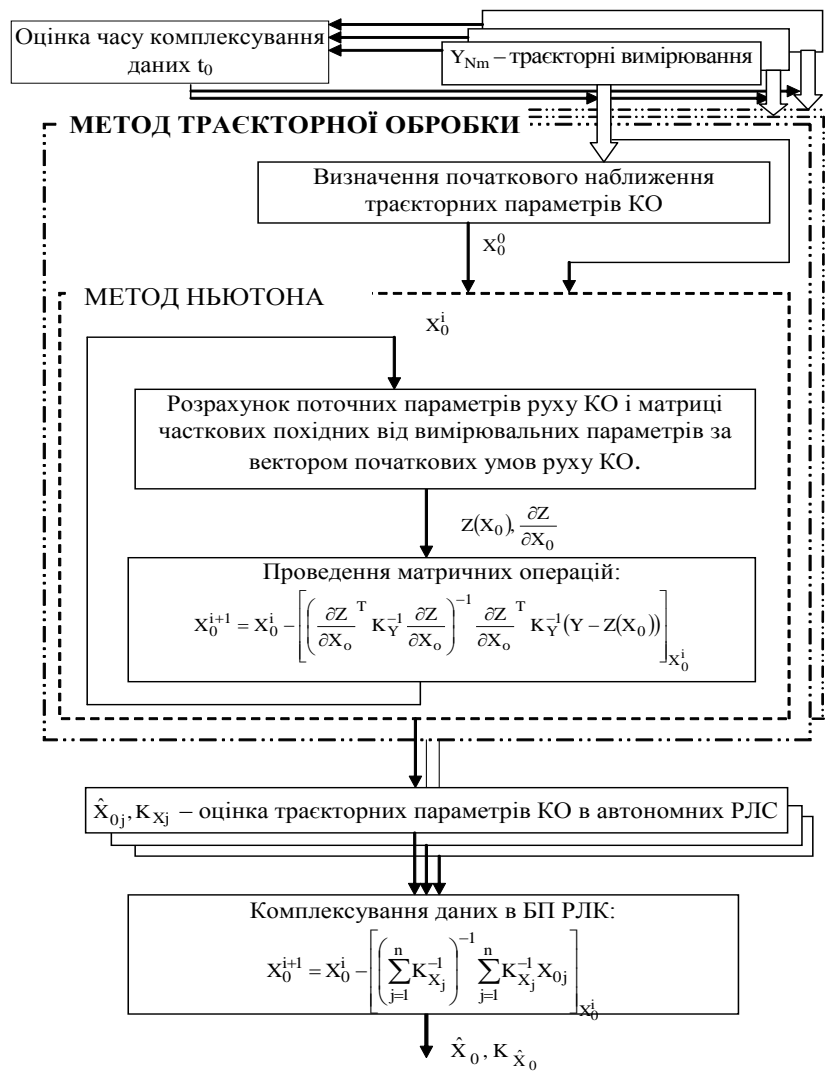


Рис. 3. Структурна схема моделі комплексування вимірювальної інформації в БП РЛС

Література

1. Изделие 5Н86. Рабочий алгоритм и программа. Техническое описание алгоритма 4П-00-00-00. Часть I, П. 1985. – 240с. 2. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 415с. 3. Мотылев К. И., Михайлов М. В., Щербов И. Л., Паслен В. В. Методы обработки данных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 8 (43). – Днепропетровск, 2006 – 149 с. 4. Андреев Ф.М. Возможности многопозиционного комплекса, созданного на базе национальных РЛС надгоризонтного обнаружения баллистических и космических объектов / Ф.М. Андреев, С.В. Ковбасюк // Космічна наука і технологія, 2009. – т. 15, № 5. – С. 74 – 81. 5. Информационные технологии в радиотехнических системах : учеб. пособ. / Е. А. Васин, И. Б. Власов, Ю. М. Егоров и др.; под ред. И. Б. Федорова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 672 с. 6. Бакулев П. А. Радиолокационные системы : учеб. для вузов / П. А. Бакулев. – М. : Радиотехника, 2004. – 320 с. 7. Cumming I. G. Digital signal processing of synthetic aperture radar data : algorithms & implementation / Ian G. CUMMING, Frank H. Wong. 2005. – 624 p. 8. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений / Б.Ф. Жданюк. – М.: Сов. радио, 1978. – 384 с. 9. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / Под. Ред. Агаджанова П.А., Дулевича В.Е., Коростелева А.А. – М.: Сов. Радио, 1969. – 504 с. 10. Основы теории полета космических аппаратов / Под. ред. Г.С. Нариманова, М.К. Тихонравова. – М.: Воениздат, 1977. – 240 с. 11. Самарский А.А. Численные методы: Учеб. пособие для вузов / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с. 12. Сильверстов С.Д., Лазарев В.М., Паншин А.И. и др. Точность измерения параметров движения космических аппаратов радиотехническими методами. – М.: Сов. радио, 1970. – 320 с.

В статье обоснованы подходы по определению орбитальных параметров космических объектов при комплексировании измерительных данных в многопозиционных радиолокационных комплексах с большими базами. Приведены результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: космические объекты, радиолокационный комплекс, космическое пространство.

In the article the approaches to the definition of the orbital parameters of space objects for measurement data complexification in multiposition radar complexes with large databases were justified. Shows the results of simulation.

Key words: space objects, radar system, outer space.