

DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.1

УДК 528.629.195

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ИЗМЕРЕНИЙ В ОДНОПОЗИЦИОННОЙ ПАССИВНОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТЫ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ

Д. Д. Габриэльян, А. Н. Горбачев, В. И. Демченко

Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи,  
344038, Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130

Статья поступила в редакцию 20 мая 2020 г.

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы выбора и проведения сравнительного анализа функционалов качества для получения оценок параметров орбиты спутника по результатам выполняемых измерений. Анализ проводится для случая однопозиционной пассивной радиотехнической системы, в которой измерения могут проводиться только для угловых координат ИСЗ и частоты принимаемого сигнала. Предлагаемые функционалы качества формируются на основе соответствующих отношений правдоподобия в приближении белого гауссовского шума. Функционал качества представляет собой квадрат разности между измеряемыми значениями углов визирования ИСЗ и частоты принимаемого сигнала со значениями указанных параметров, получаемых для предполагаемых значений Кеплеровых элементов орбиты в соответствии с принятой моделью движения ИСЗ. Оценки параметров орбиты формируются из условия минимума предложенных функционалов качества. Показано, что предлагаемые функционалы качества позволяют сформировать несмещенные оценки Кеплеровых элементов орбиты. Представлены соотношения, определяющие элементы матрицы Фишера, на основе которых могут быть получены потенциально достижимые значения дисперсий оценок элементов орбиты и корреляции значений среднеквадратических отклонений оценок различных параметров орбиты ИСЗ. Представлены результаты численного моделирования и сравнительного анализа получаемых дисперсий оценок Кеплеровых элементов орбиты при использовании предлагаемых функционалов

качества при различном составе проводимых измерений.

**Ключевые слова:** параметры орбиты, искусственный спутник Земли, однопозиционная пассивная радиотехническая система, квадратичные функционалы качества, состав измерений, дисперсия оценки.

**Abstract.** The problems of selecting and conducting a comparative analysis of quality functions for obtaining estimates of satellite orbit parameters based on the results of measurements are researched. The analysis is carried out for the case of single-position passive radio engineering system, in which measurements can be made only for the angular coordinates of the satellite and the frequency of the received signal. The proposed quality functionals are formed based on the corresponding likelihood relations in the white Gaussian noise approximation. The proposed functionals are the squared difference between the measured values of the angular coordinates of the satellite and the frequency of obtained signal and corresponding values obtained in accordance with the accepted model of the satellite motion. Estimates of the orbit parameters are formed from the minimum values of the proposed quality functionals. It is shown that the proposed quality functionals allow forming unbiased estimates of Kepler elements of the orbit. The relations defining elements of the Fischer matrix are presented, on the basis of which potentially achievable values of variances of estimates of orbit elements and correlations of values of standard deviations of estimates of various parameters of the satellite orbit can be obtained. The results of numerical modeling and comparative analysis of the obtained variances of estimates of Kepler elements of the orbit using the proposed quality functionals are presented for different composition of measurements.

**Keywords:** estimation of the satellite orbit parameters, single-position passive radio engineering system, quadratic quality functional, measurement composition, estimation variance.

## Введение

Определение параметров орбит ИСЗ является основой, позволяющей решать практически всю совокупность задач в рамках обеспечения функционирования ИСЗ систем спутниковой связи (ССС) и дистанционного

зондирования Земли (ДЗЗ). Существующие системы контроля космического пространства, пункты приема целевой и служебной информации в целом позволяют решать задачи определения параметров орбиты ИСЗ [1]. Однако постоянный рост числа ИСЗ, функционирующих в составе КС, не обеспечивает, в полной мере, постоянные измерения параметров положения и движения ИСЗ, что приводит к снижению точности определения вектора состояния ИСЗ и, как следствие, к снижению качества решения целевых задач ССС и ДЗЗ.

Одним из путей повышения объема получаемой информации о векторе состояния (ВС) ИСЗ и соответственно повышения точности определения параметров орбит является обработка попутных измерений, выполняемых однопозиционными радиотехническими системами (ОПРТС), широко используемыми в составе наземных сегментов для приема целевой и служебной информации, циркулирующей в КС.

В качестве результатов измерений, получаемых ОПРТС при приеме информации с ИСЗ в течение сеанса наблюдения, могут использоваться доплеровское смещение частоты принимаемого сигнала и угловое положение ИСЗ. В зависимости от набора получаемых данных могут быть сформированы различные функционалы качества, на основе поиска экстремумов которых могут определяться параметры орбиты ИСЗ. Расширение числа используемых результатов измерений, с одной стороны, приводит к повышению точности определения параметров орбиты. Однако, с другой стороны, такое расширение связано с усложнением используемой аппаратуры. С учетом этого, при выборе состава обрабатываемых измерений необходимо учитывать как вклад результатов измерений в повышение точности определения параметров орбиты, так и повышение сложности аппаратуры обработки измерений, выполняемых в ОПРТС.

Целью работы является сравнительный анализ функционалов качества, используемых для определения параметров орбиты ИСЗ в зависимости от состава используемых результатов измерений, выполняемых ОПРТС.

Решаемые задачи:

1. Формирование функционалов качества для определения параметров орбиты ИСЗ по результатам различного состава измерений, выполняемых ОПРТС.

2. Анализ характеристик оценок параметров орбиты, получаемых с использованием предлагаемых функционалов при различном составе выполняемых измерений.

3. Анализ практического применения предложенных функционалов качества для определения параметров орбиты ИСЗ при различном составе измерений.

### 1. Формирование функционалов качества для определения параметров орбиты ИСЗ

Одним из наиболее общих подходов к решению задачи определения параметров орбиты ИСЗ по результатам измерений, выполняемых в ОПРТС, является использование квадратичных функционалов вида [2]:

$$\Phi = \sum_{n=1}^N (\hat{\mathbf{r}}(t_n) - \mathbf{r}(t_n, \mathbf{q}_0)) (\hat{\mathbf{r}}(t_n) - \mathbf{r}(t_n, \mathbf{q}_0))^T p_n. \quad (1)$$

где  $t_n$  - моменты времени, в которые проводятся наблюдения;

$\hat{\mathbf{r}}(t_n)$  - вектор-строка, элементами которого являются значения измеряемой физической величины в момент времени  $t_n$ ;

$\mathbf{r}(t_n, \mathbf{q}_0)$  - вектор-строка, элементами которого являются расчетные значения измеряемых физических величин на момент времени  $t_n$ ;

$\mathbf{q}_0 = \{\varepsilon_0, a_0, \lambda_0, i_0, \omega_0, M_0\}$  - вектор, элементами которого являются предполагаемые значения шести определяемых параметров орбиты ( $\varepsilon$  - эксцентриситет орбиты,  $a$  - большая полуось орбиты,  $\lambda$  - долгота восходящего узла орбиты,  $i$  - наклон плоскости орбиты к экватору,  $\omega$  - аргумент перицентра,  $M$  - средняя аномалия на момент времени  $t_0$ );

$p_n$  - весовые коэффициенты, определяющие вес выполненного измерения при проведении обработки ( $n = 1, \dots, N$ );

$T$  - знак операции транспонирования.

В работах [3, 4] применительно к ИСЗ на геостационарной орбите подробно исследовался функционал качества вида (1) для случая угломерных наблюдений:

$$\Phi(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) = \sum_{n=1}^N \left[ \frac{(\hat{\theta}_n - \theta(t_n, \mathbf{q}_0))^2 + (\hat{\phi}_n - \varphi(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{\hat{\theta}_n^2 + \hat{\phi}_n^2} \right]. \quad (2)$$

В качестве измеряемых физических величин  $\mathbf{r}(t_n, \mathbf{q}_0)$  в функционале (2) используются результаты угловых измерений положения ИСЗ  $\hat{\theta}_n$  и  $\hat{\phi}_n$  в топоцентрической системе координат, а весовых коэффициентов – обратные сумме их квадратов значения. Однако указанные функционалы не исчерпывают всех возможностей по использованию попутных измерений, выполняемых ОПРТС различных КС при приеме целевой информации.

Рассмотрим ОПРТС, выполняющую прием информации ИСЗ на интервале времени  $[0, T]$ , на основании которой формируются реализации  $\theta(t_n, \mathbf{q}_{ucm})$ ,  $\varphi(t_n, \mathbf{q}_{ucm})$ ,  $f(t_n, \mathbf{q}_{ucm})$ , соответствующие измерению углов  $\hat{\theta}_n$ ,  $\hat{\phi}_n$  и частоты  $\hat{f}_n$

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t_n) &= \theta(t_n, \mathbf{q}_{ucm}) + h_\theta(t_n), \\ \hat{\phi}(t_n) &= \varphi(t_n, \mathbf{q}_{ucm}) + h_\varphi(t_n), \\ \hat{f}(t_n) &= f(t_n, \mathbf{q}_{ucm}) + h_f(t_n), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathbf{q}_{ucm}$  - вектор параметров орбиты, по которой движется ИСЗ на интервале измерений;

$h_\theta(t_n)$ ,  $h_\varphi(t_n)$  и  $h_f(t_n)$  - значения случайного процесса, соответствующего отсчетам белого гауссовского шума (БГШ) измерений углов и частоты в ОПРТС в дискретные моменты времени  $t_n$ .

Для нахождения параметров орбиты для каждой из измеряемых величин введем отношение правдоподобия следующим образом

$$\rho_{\theta}(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) = \exp \left[ - \sum_{n=1}^N \frac{(\hat{\theta}_n - \theta(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\theta, n}^2} \right], \quad (4)$$

$$\rho_{\varphi}(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) = \exp \left[ - \sum_{n=1}^N \frac{(\hat{\varphi}_n - \varphi(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\varphi, n}^2} \right], \quad (5)$$

$$\rho_f(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) = \exp \left[ - \sum_{n=1}^N \frac{(\hat{f}_n - f(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{f, n}^2} \right], \quad (6)$$

где  $\sigma_{\theta, n}^2$ ,  $\sigma_{\varphi, n}^2$  и  $\sigma_{f, n}^2$  - дисперсии измерения соответствующих величин, определяемые шумовой составляющей в соответствующем канале измерений;  $\theta(t_n, \mathbf{q}_0)$ ,  $\varphi(t_n, \mathbf{q}_0)$ ,  $f(t_n, \mathbf{q}_0)$  - соответственно углы места, азимута и частота принимаемого сигнала, которые должны наблюдаться для принятой модели движения ИСЗ по орбите с параметрами  $\mathbf{q}_0$  [5].

Переход от (4)-(6) к логарифмическим отношениям правдоподобия позволяет сформировать три функционала качества для определения параметров орбиты, соответствующие различным составам измерений в ОПРТС

$$\Phi_1(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) = \sum_{n=1}^N \left[ \frac{(\hat{\theta}_n - \theta(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\theta, n}^2} + \frac{(\hat{\varphi}_n - \varphi(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\varphi, n}^2} \right], \quad (7)$$

$$\Phi_2(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) = \sum_{n=1}^N \left[ \frac{(\hat{f}_n - f(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{f, n}^2} \right], \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Phi_3(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) &= \\ &= \sum_{n=1}^N \left[ \frac{(\hat{\theta}_n - \theta(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\theta, n}^2} + \frac{(\hat{\varphi}_n - \varphi(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\varphi, n}^2} + \frac{(\hat{f}_n - f(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{f, n}^2} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_0} \ln \left[ \rho_{\theta}(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) \cdot \rho_{\varphi}(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) \right] \right|_{\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_{\text{исм}}} = 0, \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_0} \ln [\rho_f(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M)] \right|_{\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_{уст}} = 0, \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_0} \ln [\rho_\theta(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) \cdot \rho_\varphi(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) \cdot \rho_f(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M)] \right|_{\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_{уст}} = 0. \quad (12)$$

Параметры орбиты ИСЗ определяются из условия минимума приведенных функционалов, что соответствует условиям максимумов следующих функций правдоподобия

$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_0} \ln [\rho_\theta(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) \cdot \rho_\varphi(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) \cdot \rho_f(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M)] \right|_{\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_{уст}} = 0. \quad (12)$$

Явные представления условий для нахождения параметров орбиты ИСЗ имеют вид

$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_0} \sum_{n=1}^N \left[ \frac{(\hat{\theta}_n - \theta(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\theta,n}^2} + \frac{(\hat{\varphi}_n - \varphi(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\varphi,n}^2} \right] \right|_{\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_{уст}} = 0, \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_0} \sum_{n=1}^N \left[ \frac{(\hat{f}_n - f(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{f,n}^2} \right] \right|_{\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_{уст}} = 0, \quad (14)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}_0} \sum_{n=1}^N \left[ \frac{(\hat{\theta}_n - \theta(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\theta,n}^2} + \frac{(\hat{\varphi}_n - \varphi(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\varphi,n}^2} + \frac{(\hat{f}_n - f(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{f,n}^2} \right] \right|_{\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_{уст}} = 0. \quad (15)$$

Для рассматриваемого случая шумовой составляющей измерений дисперсии измерений угловых координат и частоты сигнала из (10)-(12) в соответствии с [6] могут быть представлены с использованием следующих соотношений

$$\sigma_{\theta,n}^2 = \left[ 2\pi E_n / H_{\theta,0} (D_\theta / \lambda)^2 \right]^{-1}, \quad (16)$$

$$\sigma_{\varphi,n}^2 = \left[ 2\pi E_n / H_{\varphi,0} (D_\varphi / \lambda)^2 \right]^{-1}, \quad (17)$$

$$\sigma_{f,n}^2 = \left[ \frac{2E_n/H_{f,0} \sum_{n=1}^N (2\pi t_n)^2 S^2(t_n)}{\sum_{n=1}^N S^2(t_n)} \right]^{-1}, \quad (18)$$

где  $E_n$  - энергия принятого сигнала при измерении в момент времени  $t_n$ ;

$H_{\theta,0}$ ,  $H_{\varphi,0}$ ,  $H_{f,0}$  - дисперсия отсчетов измерений соответственно углов места, азимута и частоты принимаемого сигнала;

$D_{\theta,\varphi}$  - эффективный размер антенны в плоскости измерений углов места и азимута,  $\lambda$  - длина волны, на которой проводятся измерения.

Соотношения (16), (17) однозначно связывают дисперсию измерений углового положения ИСЗ с базой антенны. Для того, чтобы получить аналогичное представление для измерений частоты, преобразуем с учетом (18) слагаемое  $(\hat{f}_n - f(t_n, \mathbf{q}_0))^2 / (2\sigma_{f,n}^2)$  следующим образом

$$\frac{(\hat{f}_n - f(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{f,n}^2} = \frac{\sum_{n=1}^N t_n^2 \cdot (\hat{f}_n)^2 \cdot E_n \cdot S^2(t_n) \cdot (1 - f(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{\sum_{n=1}^N H_{f,0} \cdot S^2(t_n)}, \quad (19)$$

в котором  $t_n \cdot \hat{f}_n$  может рассматриваться как база сигнала при измерении в момент времени  $t_n$ .

Таким образом, предложенные функционалы качества устанавливают взаимосвязь между отклонениями измеряемых физических величин (угловое положение ИСЗ и частота принимаемого сигнала) от значений, которые должны наблюдаться для принятой модели движения ИСЗ по орбите с параметрами  $\mathbf{q}_0$ . Необходимо отметить, что в качестве весов измерений при обработке используются величины, обратные дисперсиям соответствующих измерений.

Решение уравнений (13)-(15) с учетом (16)-(19) полностью определяет все шесть параметров орбиты ИСЗ. При этом уравнение (13) позволяет определить параметры орбиты на основе результатов только угломерных измерений,

уравнение (14) – на основе результатов измерений только частоты и уравнение (15) на основе всей совокупности измерений.

## 2. Анализ характеристик оценок параметров орбиты, получаемых с использованием предлагаемых функционалов качества

Наибольший интерес в практическом приложении функционалов качества вида (7)-(9) имеют такие характеристики как несмещенность и среднеквадратическая ошибка (СКО) получаемых оценок. Все три функционала качества обеспечивают получение несмещенных оценок. Для доказательства этого подставим реализации измеряемых величин из (3) в любой из функционалов (7)-(9), например, в функционал (7)

$$\begin{aligned} \Phi_1(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M) &= \\ &= \sum_{n=1}^N \left[ \frac{(\theta(t_n, \mathbf{q}_{уст}) + h_\theta(t_n) - \theta(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\theta,n}^2} + \frac{(\varphi(t_n, \mathbf{q}_{уст}) + h_\varphi(t_n) - \varphi(t_n, \mathbf{q}_0))^2}{2\sigma_{\varphi,n}^2} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Как следует непосредственно из (20), минимальное значение  $\Phi_1(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M)$  достигается при  $\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_{уст}$ , т.е. при равенстве предполагаемых параметров орбиты соответствующим текущим значениям этих параметров. При этом значение функционала равно

$$\Phi_1(\varepsilon_{уст}, a_{уст}, \lambda_{уст}, i_{уст}, \omega_{уст}, M_{уст}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[ \frac{h_\theta(t_n)^2}{2\sigma_{\theta,n}^2} + \frac{h_\varphi(t_n)^2}{2\sigma_{\varphi,n}^2} \right]. \quad (21)$$

При  $N \rightarrow \infty$  и условии равноточных измерений каждого из углов в различные моменты времени значение  $\Phi_1(\varepsilon_{уст}, a_{уст}, \lambda_{уст}, i_{уст}, \omega_{уст}, M_{уст})$  может быть оценено на основе следующего выражения

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{N} \Phi_1(\varepsilon_{уст}, a_{уст}, \lambda_{уст}, i_{уст}, \omega_{уст}, M_{уст}) \right\} = 1. \quad (22)$$

Для определения потенциально достижимой точности оценивания параметров орбиты используем неравенство Рао-Крамера для многомерного случая

$$\mathbf{u}(\mathbf{D}_q - \mathbf{J}^{-1})\mathbf{u}^T \geq 0, \quad (23)$$

где элементы матрицы Фишера  $\mathbf{J}$  представлены в виде

$$J_{i,k}^{(l)} = -M \left[ \frac{\partial^2 \Phi_l(\varepsilon, a, \lambda, i, \omega, M)}{\partial q_i \partial q_k} \right], \quad (24)$$

$\mathbf{u}$  - вектор-строка размерности  $1 \times 6$ , один из элементов которого, соответствующий оцениваемому параметру орбиты, равен единице, а остальные – нулю;

$$l = 1, \dots, 3, \quad i = 1, \dots, 6, \quad k = 1, \dots, 6.$$

Элементы матрицы Фишера определяются соотношениями

$$J_{i,k}^{(1)} = \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\sigma_{\theta,n}^2} \frac{\partial \theta}{\partial q_i} \frac{\partial \theta}{\partial q_k} + \frac{1}{\sigma_{\varphi,n}^2} \frac{\partial \varphi}{\partial q_i} \frac{\partial \varphi}{\partial q_k} \right), \quad (25)$$

$$J_{i,k}^{(2)} = \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\sigma_{f,n}^2} \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial f}{\partial q_k} \right), \quad (26)$$

$$J_{i,k}^{(3)} = \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{\sigma_{\theta,n}^2} \frac{\partial \theta}{\partial q_i} \frac{\partial \theta}{\partial q_k} + \frac{1}{\sigma_{\varphi,n}^2} \frac{\partial \varphi}{\partial q_i} \frac{\partial \varphi}{\partial q_k} + \frac{1}{\sigma_{f,n}^2} \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial f}{\partial q_k} \right). \quad (27)$$

Соотношение (23) совместно с выражениями (25)-(27) определяют как СКО оценок параметров орбиты ИСЗ, так и корреляцию ошибок оценивания различных параметров орбиты.

### 3. Анализ практического применения предложенных функционалов качества для определения параметров орбиты ИСЗ

Исследование предложенных функционалов с учетом их сложности может быть получено только на основе итерационных алгоритмов. С учетом этого наряду с получаемыми характеристиками оценок практическая значимость предложенных функционалов качества определяется диаметром области, содержащей точку глобального минимума, выбор начального приближения в которой обеспечивает сходимость итерационного процесса по каждой из переменных к точке глобального экстремума. Последнее определяется

диаметром области монотонного возрастания рассматриваемых функционалов при удалении от точки экстремума. Расширение данной области делает более простыми условия для выбора начального приближения вектора  $\mathbf{q}_0$ .

На рис. 1-6 приведены некоторые результаты проведённого на основе математического моделирования исследований монотонности функционалов (7)-(9) для различных параметров орбиты.

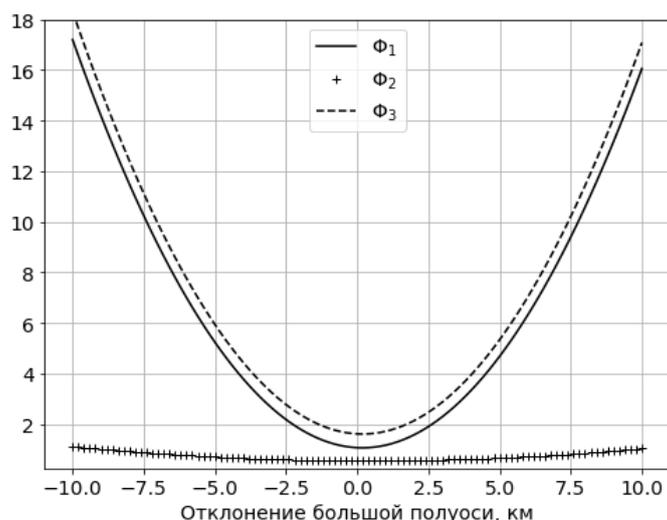


Рис. 1. Изменение функционалов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  при отклонении предполагаемого значения большой полуоси -  $a$  от истинного значения.

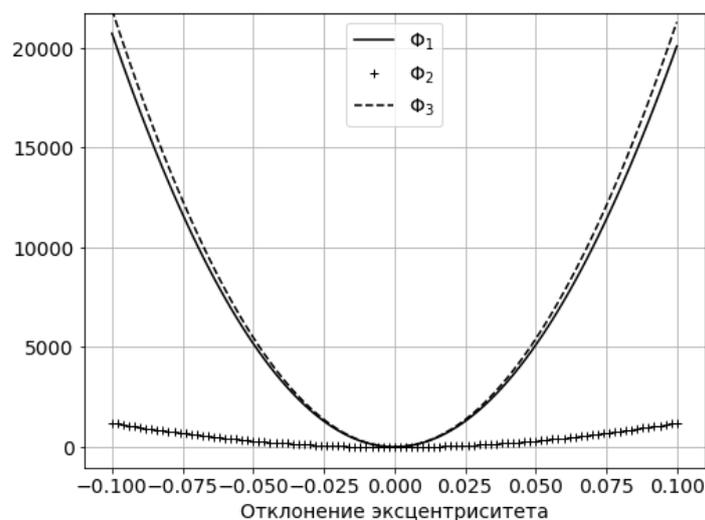


Рис. 2. Изменение функционалов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  при отклонении предполагаемого значения эксцентриситета -  $\varepsilon$  от истинного значения.

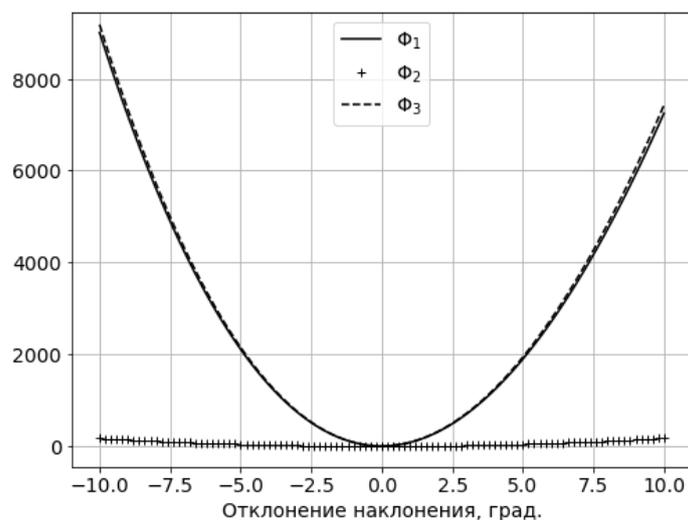


Рис. 3. Изменение функционалов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  при отклонении предполагаемого значения угла наклона орбиты -  $i$  от истинного значения.

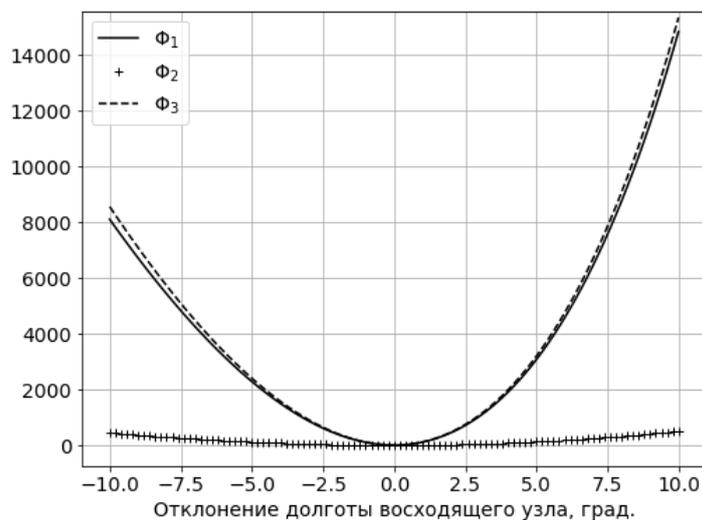


Рис. 4. Изменение функционалов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  при отклонении предполагаемого значения долготы восходящего узла  $\lambda$  от истинного значения.

На представленных графиках сплошная кривая соответствует функционалу  $\Phi_1$ , штриховая линия – функционалу  $\Phi_2$  и кривая с использованием «+» - функционалу  $\Phi_3$ . В качестве наблюдаемой траектории был выбран единичный трек ИСЗ «Jason-3» на 172 витке с параметрами орбиты  $a = 7714432$  м,  $\varepsilon = 0,000098$ ,  $i = 66,042^\circ$ ,  $\lambda = 16,3009^\circ$ ,  $\omega = 90,0^\circ$ ,  $M = 27,003$ .

Измерения проводились для случая отношения сигнал/шум, равного 10 дБ, база антенны принималась равной  $D_{\theta,\varphi}/\lambda = 120$ , база сигнала составляла  $10^\circ$ .

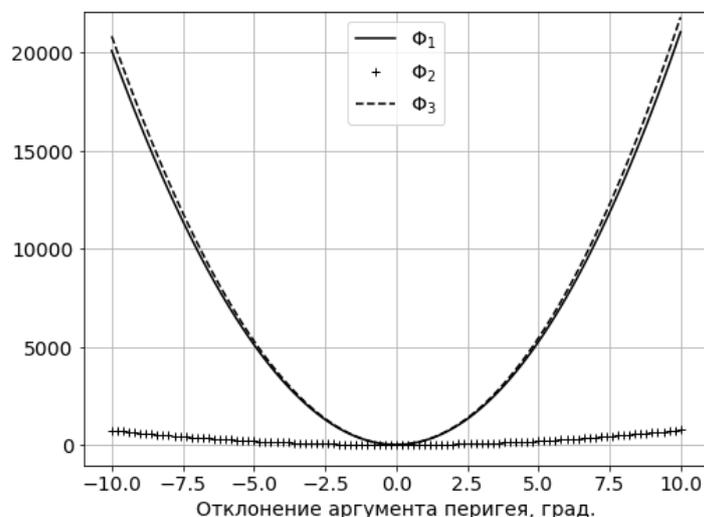


Рис. 5. Изменение функционалов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  при отклонении предполагаемого значения аргумента перигея  $\omega$  от истинного значения.

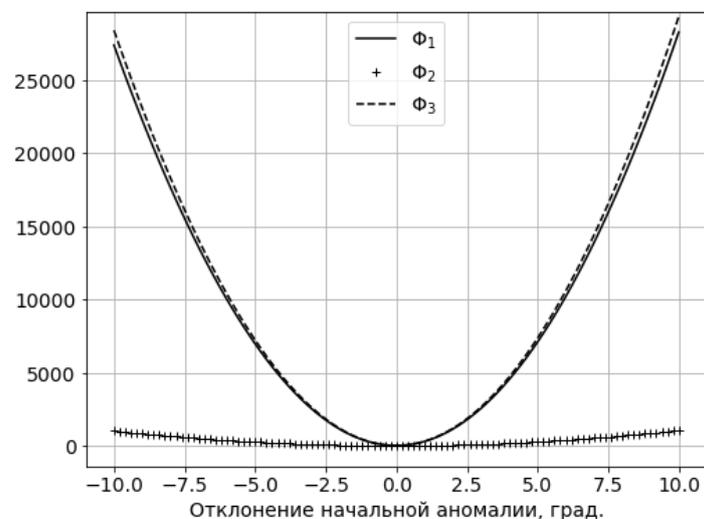


Рис. 6. Изменение функционалов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  при отклонении предполагаемого значения средней аномалии  $M$  на эпоху  $t_0$  от истинного значения.

Приведенные результаты показывают:

1. Зависимость каждого из функционалов качества, сформированных для различного состава выполняемых с использованием ОПРТС измерений, от величины отклонения предполагаемых значений параметров орбиты от

истинных значений является практически квадратичной при выборе начальных приближений, соответствующих точности доступной априорной информации о параметрах вектора состояния ИСЗ.

2. Квадратичный характер зависимости изменения функционалов при различном составе выполняемых с использованием ОПРТС измерений обеспечивает получение несмещенных оценок для каждого из шести параметров орбиты при выборе начальных приближений, соответствующих точности доступной априорной информации о параметрах вектора состояния ИСЗ.

3. Соотношение чувствительности отдельных слагаемых в составе предлагаемых функционалов при различном составе измерений к величине отклонения предполагаемого параметра орбиты от истинного значения зависит от соотношения базы антенны  $D_{\theta,\varphi}/\lambda$  и базы сигнала, определяемой формулой (19).

## Заключение

1. Использование квадратичной невязки между измеряемыми с использованием ОПРТС значениями углового положения ИСЗ и частоты принимаемого сигнала и соответствующими значениями, определяемыми для выбранного набора параметров орбиты ИСЗ, позволяет сформировать три функционала качества, обеспечивающих оценивание всех шести Кеплеровых элементов орбиты ИСЗ по результатам измерений, выполняемых ОПРТС.

2. Выполненное с использованием методов математического моделирования исследование предложенных функционалов качества показало:

- квадратичный характер зависимости изменения функционалов обеспечивает получение несмещенных оценок для каждого из шести параметров орбиты при выборе начальных приближений, соответствующих точности доступной априорной информации о параметрах вектора состояния ИСЗ;

- при увеличении числа выполняемых измерений предельное значение каждого из функционалов равно единице.

3. Анализ практического применения предложенных функционалов качества для определения параметров орбиты ИСЗ показал:

- использованием функционала качества, основанного на измерении только частоты принимаемого сигнала, обеспечивает наиболее низкую точность оценивания всех параметров орбиты;

- использование функционала качества, основанного на измерении только углового положения ИСЗ относительно ОПРТС, обеспечивает значительное (10-10000 раз) повышение точности оценивания параметров орбиты;

- расширение состава измерений, связанное с использованием результатов измерений как частоты принимаемого сигнала, так и углового положения, практически не приводит к повышению точности оценивания параметров орбиты;

- наиболее высокая точность оценивания параметров орбиты наблюдается для эксцентриситета орбиты и аргумента перигея, наиболее низкая точность – при оценивании большой полуоси орбиты.

### Литература

1. Демченко В.И., Косогор А.А., Раздоркин Д.Я., Саранов А.А., Гвоздяков Ю.А. Система высокоточных траекторных измерений в Ku-диапазоне // Труды IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». 15-17 июня 2011. – М.: Радиотехника. С.264-274.
2. Пат. 2313104. Российская Федерация, G01S3/42. Способ определения параметров орбиты геостационарного спутника / Урличич Ю.М., Балувевский Ю.Н., Ганженко В.П. и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «НПО Космического приборостроения»; заявл. 24.03.2005 г., опубл. 20.12.2007. URL <http://www.freepatent.ru/patents/2313104>
3. Габриэльян Д.Д., Горбачев А.Н., Демченко В.И. Определение параметров орбиты геостационарных и геосинхронных ИСЗ в однопозиционных пассивных РЛС // Радиотехника. 2014. № 8. С. 16-23.
4. Габриэльян Д.Д., Горбачев А.Н., Демченко В.И. Использование квадратичных функционалов для определения параметров орбиты космического аппарата в

пассивной радиолокационной системе // Материалы докладов X Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». 21-23 ноября 2016 г., г. Москва. – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2016.

5. Урмаев М.С. Орбитальные методы космической геодезии. – М.: Недра, 1981, 256 с.

6. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. – М.: Радиотехника, 2004, 320 с.

**Для цитирования:**

Габриэльян Д.Д., Горбачев А.Н., Демченко В.И. Оценка влияния состава измерений в однопозиционной пассивной радиотехнической системе на погрешность определения орбиты искусственного спутника Земли. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/1/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.1