

## Определение баллистических параметров в формате TLE в системе радиотомографии ионосферы

О.И. Барабошкин<sup>1,2</sup>, С.В. Трусов<sup>2</sup>, А.А. Романов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский физико-технический институт,  
141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9  
e-mail: barabyluk@ya.ru*

<sup>2</sup> *ОАО «Российские космические системы»  
111250, Москва, Авиамоторная, 53*

Предложен метод коррекции параметров орбит в формате TLE для низкоорбитальных искусственных спутников земли при использовании высокостабильных сигналов частотой 400 МГц. Показана схема реализации метода применительно к системе радиотомографии ионосферы. Проведена оценка точности получаемых параметров орбит и перспектив их дальнейшего использования.

**Ключевые слова:** параметры орбиты спутника, TLE, SGP4, обработка информации, расчет орбитального движения КА.

### Введение

Для решения задачи расчета положения спутников в определенный момент времени в последние годы все чаще используются баллистические данные, формируемые службой NORAD (США) и представляемые в формате TLE (Two-Line Element Set Format) для большинства космических аппаратов (КА). Популярность этого подхода определяется доступностью по сети Интернет, как самих данных, так и программного обеспечения, позволяющего рассчитать орбиту КА. В 2003 г. свободное распространение баллистической информации для пользователей, не являющихся американскими государственными учреждениями, было регламентировано специальной трехлетней пилотной программой (Pilot program..., 2003). В 2006 г. действие программы было продлено еще на три года, до 30.09.2009. В настоящее же время распространение этих данных не имеет определенного юридического статуса, что порождает риски при их использовании в различных системах, в том числе в системе радиотомографии ионосферы, постоянно требующей точного расчета положений КА.

В рассматриваемой системе радиотомографии ионосферы (Трусов и др., 2009) расчет орбитального движения космических аппаратов осуществляется при помощи модели движения SGP4 (Hoots, Roehrich, 1980), актуализация параметров которой происходит ежедневно на основе общедоступных в настоящее время эфемерид в формате TLE. Прекращение предоставления орбитальных данных может привести к нарушению целостности системы. Для устранения этой проблемы разработан и реализован алгоритм актуализации параметров движения КА (Аким, Энеев, 1963) в формате TLE на основании доплеровских кривых, получаемых с приемников системы радиотомографии ионосферы (Трусов и др., 2011) на частоте 400 МГц.

### Методика актуализации параметров движения КА в формате TLE

Основные шесть параметров, содержащиеся в файле TLE, следующие:  $\eta$  — средняя аномалия;  $a$  — аргумент перигея;  $\omega$  — аргумент восходящего узла;  $i$  — наклонение орбиты;  $e$  — эксцентриситет;  $n$  — среднее движение. Эти шесть параметров полностью определяют положение спутника в пространстве, их определение является главной задачей.

$$\vec{Q} = \{\eta, a, \omega, i, e, n\}.$$

Пусть  $\vec{Q}(t)$  — вектор параметров движения КА в момент времени  $t$ . С помощью орбитальной модели SGP4 устанавливается функциональная зависимость

$$\vec{Q}(t) = F(t, \vec{Q}_0(t_0)),$$

где  $\vec{Q}_0(t_0)$  — вектор искоемых параметров движения КА в момент времени  $t_0$ . Тогда между измеряемым параметром  $\Psi$  и вектором  $\vec{Q}_0$  существует связь

$$\Psi(t) = \varphi[F(t, \vec{Q}_0(t_0))].$$

В системе радиотомографии ионосферы используются сигналы низкоорбитальных спутников на частоте 150/400 МГц. В нашем случае используется только сигнал 400 МГц, так как он менее подвержен влиянию ионосферы. Измеряемым параметром  $\Psi$  является проекция скорости спутника на прямую, соединяющую КА и приемник, рассчитанная по доплеровскому смещению частоты сигнала.

$$v_r = \frac{\Delta f}{f} c,$$

где  $v_r$  — проекция скорости;  $\Delta f$  — доплеровское смещение частоты;  $f$  — частота сигнала КА;  $c$  — скорость света. Измерения  $\Psi_i^{\text{exp}}$  проводятся в дискретные моменты времени  $t_i (i = 1, 2, \dots, M)$  во время сеансов приема сигнала

$$\Psi_i^{\text{exp}} = \varphi[F(t_i, \vec{Q}_0(t_0))] + h_i = \Psi_i + h_i, \quad ,$$

где  $h_i$  — вектор ошибок. Для определения начального приближения  $\vec{Q}_0^{(0)}(t_0)$  используется модель SGP4 и устаревший TLE файл для данного спутника. Необходимо оптимальным образом внести поправки в вектор искоемых параметров движения КА  $\vec{Q}_0^{(0)}(t_0)$  так, чтобы минимизировать ошибки  $h_i$ .

В основе алгоритма внесения поправок лежит метод максимального правдоподобия, который предполагает минимизацию функционала

$$\Phi = \sum_{n,l=1}^M (\Psi_n - \Psi_n^{\text{exp}})(\Psi_l - \Psi_l^{\text{exp}}) = \sum_{n,l=1}^M \xi_n \xi_l.$$

Для минимизации функционала необходимо выполнить систему нелинейных относительно параметров  $Q_i$  уравнений

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_i} = 0; \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

или

$$\sum_{n,l=1}^M \xi_n \frac{\partial \xi_l}{\partial Q_i} = 0; \quad (i = 1, 2, \dots, m).$$

Система решается методом обобщенных касательных Ньютона, поправка в  $s$ -е приближение определяется нормальной системой уравнений

$$A \Delta \vec{Q}^{(s)} = -\vec{B}$$

или

$$\sum_{j=1}^m A_{ij} \Delta Q_j^{(s)} = -B_i; \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad ,$$

где элементы матрицы  $A$  и компоненты вектора  $\vec{B}$  имеют вид

$$A_{ij} = \sum_{n,l=1}^M \frac{\partial \xi_n}{\partial Q_i} \frac{\partial \xi_l}{\partial Q_j}$$

$$B_i = \sum_{n,l=1}^M \frac{\partial \xi_n}{\partial Q_i} \xi_l \quad .$$

Вычисление производных  $\frac{\partial \xi_i}{\partial Q_j} \frac{\partial \Psi_i}{\partial Q_j}$  производится численно по приближенной формуле

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial Q_j} = \frac{\partial \Psi_i}{\partial Q_j} = \frac{\varphi[F(t_i, Q_j + \Delta Q_j)] - \varphi[F(t_i, Q_j)]}{\Delta Q_j} .$$

Таким образом, при условии периодического обновления TLE-файлов и использования в дальнейших обновлениях TLE-файлов, полученных в результате предыдущих обновлений, достигается независимое обеспечение системы радиотомографии ионосферы актуальными параметрами движения КА.

### Реализация методики в системе радиотомографии ионосферы

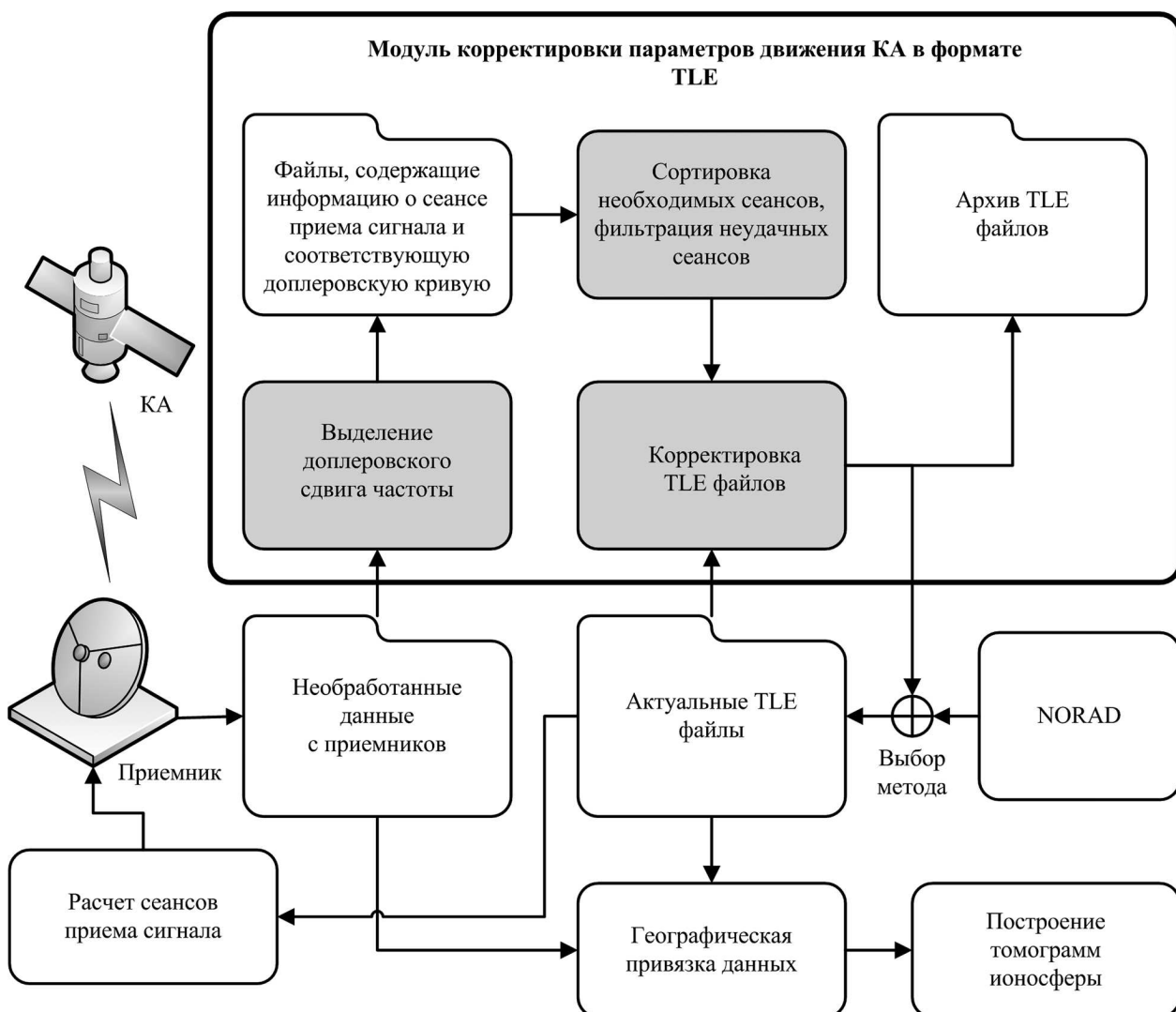
Блок схема программного обеспечения (ПО), реализующего данную методику представлена на рисунке. Для каждого сеанса приема сигнала создается файл, содержащий информацию о спутнике, координатах приемной станции, доплеровскую кривую в терминах радиальной скорости. Ежедневно, по доплеровским данным, накопленным за последние сутки, программа актуализации корректирует устаревший TLE-файл, и замещает им старый, который перемещается в архив. ПО написано на языках C++ и Perl. Модули выделения доплеровских данных размещены на приемных установках. Модуль корректировки параметров КА функционирует на центральном сервере системы радиотомографии.

Программное обеспечение установлено на трех станциях: Мильково (54,70° с.ш., 158,62° в.д.), Паратунка (52,96° с.ш., 158,25° в.д.) и Южно-Сахалинск (46,96° с.ш., 142,73° в.д.) и работает в тестовом режиме.

### Точность определения положения КА по актуализированным TLE-файлам

Для оценки результатов использовались актуальные TLE-файлы, распространяемые службой NORAD. Актуальность TLE-файла определялась по разнице между эпохой, для которой даны орбитальные элементы и временем пролета спутника над приемной станцией, не превышающей одни сутки. По модели SGP4 рассчитывалось положение спутника в момент начала сеанса приема сигнала по обновленному и актуальному TLE-файлу для спутника «Космос-2414». На первом шаге использовались файлы 30-ти дневной давности, далее файлы обновлялись ежедневно. Максимальная ошибка определения положения КА не превышает 30 км. По другим спутникам результаты аналогичны. Данный результат несколько уступает точности модели SGP4 (10 км), поэтому был проведен анализ возможных источников ошибок. Слабым местом методики является синхронизация времени приемников, которая в настоящее время осуществляется с точностью до 1 секунды. Для решения этой проблемы

на приемники предполагается установить модули GPS, что в перспективе повысит точность метода до значений погрешности сопоставимых с моделью SGP4. Также увеличению точности будет способствовать увеличение количества пунктов регистрации сигналов, за счет расширения сети ионосферных томографических измерений на территории России.



Блок схема модуля корректировки параметров движения КА в формате TLE

### Заключение

Рассмотренный метод коррекции параметров орбиты можно применить в различных системах, в которых используются баллистические данные службы NORAD в формате TLE, в частности в системе радиотомографии ионосферы, для которой он был разработан. Методика обеспечения эфемеридными данными реализована таким образом, что ее выходные данные можно использовать в существующей системе, то есть для расчета положения спутников по-прежнему используется модель SGP4. Достигнутая точность определения положения КА порядка 30 км. Для решения задач радиотомографии ионосферы данная погрешность является приемлемой, однако в дальнейшем планируется уменьшить погрешность за счет использования большего количества приемников, синхронизации времени приемников с помощью модулей GPS, а также увеличения точности определения доплеровского смещения частоты.

## Литература

1. Аким Э.Л., Энеев Т.М. Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений // Космические исследования. 1963. Т. 1. Вып. 1. С. 5–50.
2. Трусов С.В., Романов А.А., Новиков А.В., Романов А.А. Информационная технология автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 317–323.
3. Трусов С.В., Романов А.А., Аджалова А.В., Бобровский С.А., Романов А.А., Лось В.О. Сетевой программно-аппаратный комплекс двумерной томографии ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 142–148.
4. Hoots F.R., Roehrich R.L. Spacetrack report N. 3 Models for Propagation of NORAD Element Sets., 1980.
5. Pilot program for provision of space surveillance network services to non-United States Government Entities // USA Public Law 108-136-NOV.24, Sec 913, 2003.

### Determination of TLE format ballistic parameters in the system of ionosphere tomography

O.I. Baraboshkin<sup>1,2</sup>, S.V. Trusov<sup>1</sup>, A.A. Romanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
141700, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutsky per., 9  
e-mail: barabyluk@ya.ru*

<sup>2</sup> *JSC “Russian space systems”  
111250 Moscow, Aviamotornaya, 53*

The method of correction of the orbit parameters in the TLE format for low-orbit satellites using the highly stable signals at 400 MHz was developed and implemented. The scheme of realization of this method applied to a system of ionosphere tomography is shown in this article. The accuracy of satellite position determination based on the orbital parameters received by this method is enough for the ionosphere tomography system, but there are prospects for accuracy improvements. The method of obtaining ballistic data is implemented in such a way that its output can be used in the existing system without corrections.

**Keywords:** satellite orbital parameters, TLE, SGP4, information processing, calculation of spacecraft orbital motion.