

doi: 10.15407/knit2016.03.050

УДК 523.44+629.78

Ф. И. Бушуев¹, Н. А. Калюжный¹, Е. С. Сибирякова¹, А. В. Шульга¹,
С. С. Москаленко², О. А. Балагура³, В. Ф. Кулишенко⁴

¹ Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев

² Западный центр радиотехнического наблюдения, Мукачево

³ Государственное предприятие «Укркосмос», Киев

⁴ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА

Представлено описание радиотехнического комплекса для наблюдений активного телекоммуникационного геостационарного спутника радиointерферометрическим методом. Комплекс состоит из четырех станций приема цифрового спутникового телевидения. Даны технические и точностные характеристики станций, а также описывается разработанная в Научно-исследовательском институте «Николаевская астрономическая обсерватория» методика определения декартовых координат телекоммуникационного геостационарного спутника в системе координат WGS84. Приводятся результаты и точности определения координат спутника.

Ключевые слова: координаты геостационарного спутника, DVB-S, радиointерферометр.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость определения координат активных телекоммуникационных геостационарных спутников (ТК ГСС) обусловлена проблемой безопасного размещения спутников на геостационарных орбитах.

Ежегодно на геостационарную орбиту выводится порядка 20—30 новых спутников, что привело к росту населенности орбит. Согласно требованиям Международного коммуникационного союза размеры одной геостационарной позиции составляют $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. В одной геостационарной площадке могут размещаться шесть и даже более спутников. Непрерывный контроль положений ТК ГСС необходим для определения

функционального состояния космического объекта (КО).

Применение наземных оптических средств для определения положения ТК ГСС ограничено, так как зависит от погодных условий. Однако областью их применения, благодаря высокой точности, является калибровка других средств определения орбиты. Ошибка традиционных оптических наблюдений ТК ГСС находится в пределах $0.26—0.91''$ [5]. Более точными являются лазерные наблюдения ТК ГСС, однако в связи с большим расстоянием до геостационарной орбиты для проведения таких наблюдений требуются большие затраты энергии.

В отличие от оптических наблюдений радионаблюдения не зависят от погодных условий, однако в диапазоне радиоволн ошибка сопровождения ТК ГСС пассивным или активным однопозиционным радаром значительно превы-

© Ф. И. БУШУЕВ, Н. А. КАЛЮЖНЫЙ, Е. С. СИБИРЯКОВА,
А. В. ШУЛЬГА, С. С. МОСКАЛЕНКО, О. А. БАЛАГУРА,
В. Ф. КУЛИШЕНКО, 2016

шает ошибку оптических наблюдений и составляет величину порядка $10''$ [6].

В НИИ НАО для определения положений ТК ГСС был разработан радиотехнический комплекс (РК), основанный на определении разности наклонных дальностей до спутника [1] методом корреляционного анализа сигналов цифрового спутникового телевидения, принимаемых парой приемников. В этом отношении предложенный подход эквивалентен применяемому в радиоинтерферометрии, при котором также в результате корреляционного анализа определяется разность наклонных дальностей до наблюдаемого источника радиосигнала. Так, в Испании был разработан радиоинтерферометр, состоящий из двух станций, приемные антенны которых были разнесены всего на 250 м, что позволило использовать в приемниках общий гетеродин [<http://adsabs.harvard.edu/full/2003ESASP.532E..39P>, http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin119/bul119_chap8.pdf]. Для уменьшения фазовых искажений радиосигналы с выходов антенн на входы смесителей передавались по охлаждаемым оптоволоконным линиям. Фаза сигнала на выходе приемников определялась с помощью дискретного преобразования Фурье, а полученное значение разности фаз использовалось для уточнения азимута ТК ГСС. Ошибка определения разности фаз составила 5 % длины волны, или 1,2 мм для сигнала на частоте 13 ГГц. Интерферометр используется для определения координат ТК ГСС совместно со станцией дистанционирования (ranging).

В случае измерения разности наклонных дальностей, для определения координат источника радиосигнала необходимо иметь три линейно независимые разности, которые можно получить, имея сеть минимум из четырех разнесенных станций приема этого сигнала. В работе [4] китайская сеть РСДБ из четырех станций была применена для калибровки системы слежения за геостационарными спутниками, входящими в навигационную систему COMPASS. Минимальная база РСДБ равна 1114 км, а максимальная — 3249 км. Маяком для РСДБ был сигнал, излучаемый геостационарными спутниками на частоте 2.2 ГГц с шириной спектра порядка 2 МГц. При

этом точность измерений радиоинтерферометрами задержки составила 3.6 нс, а ошибка определения координат спутника равнялась 10 м.

В статье представлен модернизированный вариант радиотехнического комплекса, предложенного в работе [1]. В состав комплекса входят четыре разнесенные в пространстве станции приема цифрового спутникового телевидения, что позволяет определять координаты контролируемого ТК ГСС.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ БАЗИСНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ

На сегодня комплекс состоит из четырех идентичных станций приема цифрового спутникового телевидения, установленных в «Укркосмос» (г. Киев), ЗЦРН (г. Мукачево), НИИ НАО (г. Николаев), Радиоастрономический институт (г. Харьков). Максимальное расстояние между станциями составляет 1000 км по долготе и 400 км по широте (рис. 1).

В состав каждой станции входит:

- 1) стандартная антенно-фидерная система приема сигналов цифрового спутникового телевидения, диаметры антенн 0.9 м в Киеве, Мукачево и Харькове и 1.9 м в Николаеве;
- 2) приемник цифрового спутникового телевидения SkyStar1 или SkyStar2, выполненный в виде РСІ-плат и доработанный в части вывода синфазного (In) и квадратурного сигналов (Qu) до цифровой обработки их микропроцессором приемника;

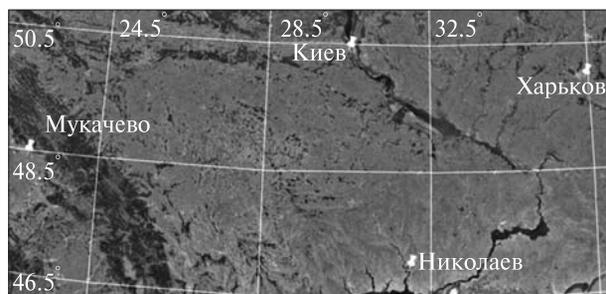


Рис. 1. Расположение станций РК для базисных наблюдений телекоммуникационного геостационарного спутника



«Укркосмос» (г. Киев)



ЗЦРН (г. Мукачево)



НИИ НАО (г. Николаев)



Радиоастрономический институт (г. Харьков)

Рис. 2. Приемные антенны РК

3) одночастотный GPS-приемник Trimble ThunderBolt-E;

4) цифровой USB-осциллограф DSO5200A с полосой пропускания 200 МГц и с 9-битным ADC (Analog Digital Converter);

5) персональный компьютер с портами USB и RS-232 под управлением операционной системы Windows XP (тактовая частота процессора 1 ГГц, оперативная память 1 Гб, жесткий диск 100 Гб);

6) линия интернет со скоростью передачи данных не менее 80 кБ/с.

Приемные антенны РК показаны на рис. 2, а блок-схема станции — на рис. 3. В соответствии с блок-схемой станции сигнал цифрового спутникового телевидения с антенны поступает

в блок LNB (Low Noise Block). В этом блоке происходит усиление сигнала и первое понижение частоты до величины порядка 1 ГГц. В радиочастотном блоке «РЧ-блок» приемника цифрового спутникового телевидения «Приемник DTV-S» (Digital Television-Satellite) производится усиление сигнала и второе понижение частоты — квадратурное детектирование. Прямой (In) и квадратурный (Qu) сигналы с выхода детектора поступают в блок «Демодулятор и декодер», где прежде всего производится их оцифровка и демодуляция: преобразование значений фазы и амплитуды в символы цифрового информационного потока. Вид модуляции зависит от используемого стандарта передачи информации: DVB-S



Рис. 3. Блок-схема станции приема цифрового спутникового телевидения (см. текст)

или DVB-S2 (Digital Video Broadcast-Satellite). В блоке «Демодулятор и декодер» также формируется сигнал обратной связи, который поступает в радиочастотный блок для подстройки фазы гетеродина таким образом, чтобы фаза сигнала на выходе квадратурного детектора максимально соответствовала известной информационной структуре транспортного потока, т. е. реализуется синхронизация символов.

Прямой и квадратурный сигналы через эмиттерные повторители (ЭП) одновременно подаются на блок «Демодулятор и декодер», а также на первый (CH1) и второй (CH2) каналы цифрового USB-осциллографа. Для подачи сигналов на каналы USB-осциллографа в НИИ НАО проведена специальная доработка приемника.

Для считывания во внутреннюю память осциллографа выборок сигналов In и Qu заданной длительности T_s используется сигнал PPS (Pulse-Per-Second), поступающий от GPS-приемника на разъем внешнего запуска осциллографа (EXT). В персональный компьютер от GPS-приемника через порт RS-232 синхронно с сигналом PPS поступает пакет данных GPS с текущими значениями даты, времени, координат и другой информацией. По прочтению этого пакета

программа формирует специальное системное сообщение о начале считывания временных реализаций (IQ) сигналов In и Qu из внутренней памяти осциллографа и сохранении их на жестком диске ПК.

Обычно по умолчанию передний фронт сигнала PPS совпадает с началом секунды. В приемнике может предусматриваться задание необходимой задержки сигнала PPS относительно начала секунды ($\tau_{PPS} \neq 0$). В этом случае для изменения задержки используется соответствующая команда протокола обмена между GPS-приемником и ПК. На блок-схеме GPS-приемника, приведенной на рис. 3, функция формирования сигнала PPS для наглядности выделена в отдельный блок («Блок PPS»). На этой схеме блок «CPU» соответствует микропроцессору GPS-приемника (включая аналого-цифровое преобразование принимаемых сигналов), а блоки «РЧ-блок» и «Генератор» являются, соответственно, радиочастотным блоком и опорным генератором приемника. В радиочастотном блоке производится усиление и гетеродинирование принятых сигналов GPS.

Возможность задания $\tau_{PPS} \neq 0$ позволяет значительно повысить технические характеристики

РК по сравнению с комплексом, представленным в работе [1], для которого $\tau_{PPS} = 0$. Пусть $\Delta\tau_x$ — разность задержек сигналов DTV-S, принятых двумя станциями. Тогда $\Delta\tau_x$ можно представить как сумму двух слагаемых:

$$\Delta\tau_x = \overline{\Delta\tau_x} + \hat{\tau},$$

где $\overline{\Delta\tau_x}$ — средняя задержка, а $\hat{\tau}$ — вариации задержки относительно $\overline{\Delta\tau_x}$. Средняя задержка $\overline{\Delta\tau_x}$ может составлять несколько миллисекунд, так как зависит от длины базовой линии, соединяющей станции и от взаимного положения контролируемого спутника и базовой линии. Вариации задержки $\hat{\tau}$ зависят от смещений спутника в пределах геостационарной ячейки и не могут превышать 20 мкс. В работе [1] показано, что при приеме сигнала DTV-S с шириной спектра порядка 30 МГц допустимые значения T_s лежат в пределах от 100 до 400 мкс, которые соответствуют частотам дискретизации от 102.4 до 25.6 МГц. Указанное обстоятельство обусловлено тем, что объем N_s выборки USB-осциллографа DSO5200A является константой, равной 10240, а следовательно, изменение T_s приводит к изменению номинальной частоты дискретизации f_n , так как

$$f_n = \frac{N_s}{T_s}.$$

Отсюда следует, что длина базовой линии в случае, когда $\tau_{PPS} = 0$, не может быть больше величины порядка $T_s \cdot c = 120$ км, где c — скорость света в вакууме, а $T_s = 400$ мкс.

Использование ненулевых значений τ_{PPS} позволяет размещать станции РК практически на произвольном расстоянии друг от друга, обеспечивая тем самым максимальную точность определения координат контролируемого спутника. Так, при наличии нескольких пар станций для одной (избранной) станции можно задать $\tau_{PPS} = 0$, а для остальных станций установить τ_{PPS} равным среднему значению $\overline{\Delta\tau_x}$ относительно избранной станции. Для оценки $\overline{\Delta\tau_x}$ можно воспользоваться численным моделированием с использованием параметров орбиты ТК ГСС, представленных на сайте www.space-track.org.

Схема станции с регулируемой задержкой секундного синхроимпульса была внедрена в

результате доработок программы чтения пакета данных GPS в части управления задержкой сигнала PPS, формируемого GPS-приемниками производства фирмы Trimble.

Обозначим через I количество станций, входящих в состав РК. Регистрируемые станциями выборки комплексного сигнала IQ архивируются, и по скоростному интернет-каналу передаются в пункт корреляционной обработки выборок для оценки разности наклонных дальностей $\Delta r_i, i = 1, \dots, I-1$ и определения декартовых координат x, y, z контролируемого спутника, где i — порядковый номер пары, а $I-1$ — количество пар станций, используемых для определения линейно независимого набора относительных задержек.

В пункте обработки для заданной пары станций осуществляется [1]:

- преобразование комплексных выборок в действительные с учетом структуры сигнала DVB-S;
- расчет корреляционной функции этих действительных выборок;
- определение относительной задержки сигналов DVB-S, принятых рассматриваемой парой станций.

Время наблюдения и соответствующая относительная задержка используются в дальнейшем для расчета координат спутника и представления результатов наблюдений.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТ ПО РАЗНОСТЯМ НАКЛОННЫХ ДАЛЬНОСТЕЙ

Пусть x, y, z — искомые координаты спутника, x_i, y_i, z_i — известные координаты i -й станции, а $R_i = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{1/2}$ — расстояние между спутником и i -й станцией. Координаты спутника можно определить гиперболическим или разностно-дальностным методом [3] из следующей системы нелинейных уравнений:

$$R_0 + \Delta r_i - R_i = 0, \quad i = 1, \dots, I-1, \quad (1)$$

где Δr_i — измеренное значение разности наклонных дальностей для i -й и 0-й станций, I — количество разнесенных в пространстве станций.

Применив метод Ньютона для решения нелинейной системы уравнений (1), получим следующую систему линейных уравнений для n -й

итерации относительно неизвестных приращений искомых координат Δx , Δy и Δz :

$$\alpha_{xi}\Delta x + \alpha_{yi}\Delta y + \alpha_{zi}\Delta z = (R_0 + \Delta r_i) - R_i,$$

для $i = 1, \dots, I - 1$

$$\Delta x = x^n - x^{n-1},$$

$$\Delta y = y^n - y^{n-1},$$

$$\Delta z = z^n - z^{n-1},$$

$$\alpha_{xi} = \frac{(x - x_i)}{R_i} - \frac{(x - x_0)}{R_0},$$

$$\alpha_{yi} = \frac{(y - y_i)}{R_i} - \frac{(y - y_0)}{R_0},$$

$$\alpha_{zi} = \frac{(z - z_i)}{R_i} - \frac{(z - z_0)}{R_0}.$$

При этом в уравнения подставляются значения параметров α_{xi} , α_{yi} , α_{zi} и R_i , вычисленные для координат x^{n-1} , y^{n-1} , z^{n-1} , полученных на предыдущем $(n - 1)$ -м шаге итерации. Итерации прекращаются, когда ошибки Δx , Δy , Δz становятся малыми по избранному критерию. Если количество станций РК больше трех, то возможно однозначное решение системы уравнений без привлечения дополнительной информации о движении спутника, т. е., возможно определение возмущенной орбиты спутника. В случае, когда $I < 4$, координаты ТК ГСС можно определить, если учесть небесно-механические законы движения спутника в гравитационном поле, т. е. возможно определение невозмущенной орбиты спутника.

Для решения системы уравнений (1) численным методом необходимо задать нулевое приближение x^0 , y^0 , z^0 для координат спутника в той же системе координат, что и координаты станций. Координаты станций удобно задавать в системе координат WGS84 (World Geodetic System образца 1984 г.), которая является опорной системой координат GPS. В этом случае координаты станций можно взять прямо из данных измерений GPS-приемников, используемых для синхронизации станций. Пусть ϕ_i , λ_i и h_i — широта, долгота и высота i -й станции в системе координат WGS84, a , f и e — большая полуось, параметр сжатия и эксцентриситет эллипсоида

WGS84. Тогда декартовы координаты станции в геоцентрической системе координат с неподвижной Землей (Earth Centered Earth Fixed) можно определить из соотношений [2, 8]:

$$x_i = (\rho_i + h_i) \cos \phi_i \cdot \cos \lambda_i,$$

$$y_i = (\rho_i + h_i) \cos \phi_i \cdot \sin \lambda_i, \quad (2)$$

$$z_i = ((1 - f)^2 \rho_i + h_i) \sin \phi_i,$$

где $\rho_i = a \cdot [1 - f(2 - f) \sin^2 \phi_i]^{-1/2}$ — радиус кривизны главного нормального сечения эллипсоида.

Нулевое приближение для координат спутника x^0 , y^0 , z^0 можно также вычислить по формулам (2), в которые вместо координат станции подставляются приближенные координаты спутника: $\phi_i = \phi_{GSS}$, $\lambda_i = 0$ и $h_i = 36000$ км. Здесь ϕ_{GSS} — долгота геостационарной позиции контролируемого спутника, а $h_i = 36000$ км — приближенная высота спутника над поверхностью эллипсоида. Приведенный способ приближенной оценки x^0 , y^0 , z^0 позволяет получить решения системы уравнений (1) всего за несколько итераций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ДАЛЬНОСТИ ДО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА

Экспериментальный радиотехнический комплекс, предназначенный для базисных наблюдений ТК ГСС, начал наблюдения спутника «Eutelsat 13B» 22 октября 2014 г. Спутник «Eutelsat 13B» находится в точке стояния 13° в. д. В этой же геостационарной позиции находятся еще два спутника «Eutelsat 13C» и «Eutelsat 13D». Станции комплекса принимают сигнал DVB-S транспондера на частоте 11541 МГц, имеющий вертикальную поляризацию и символную частоту 22000 кГц. Ширина спектра этого сигнала составляет порядка 30 МГц.

Все четыре станции комплекса работают по схеме с регулируемой задержкой сигнала PPS. Длительность выборки сигналов квадратурного детектора, регистрируемых USB-осциллографом, задана равной 200 мкс, что соответствует частоте дискретизации $f_n = 51.2$ МГц, которая близка к частоте Найквиста для принимаемого

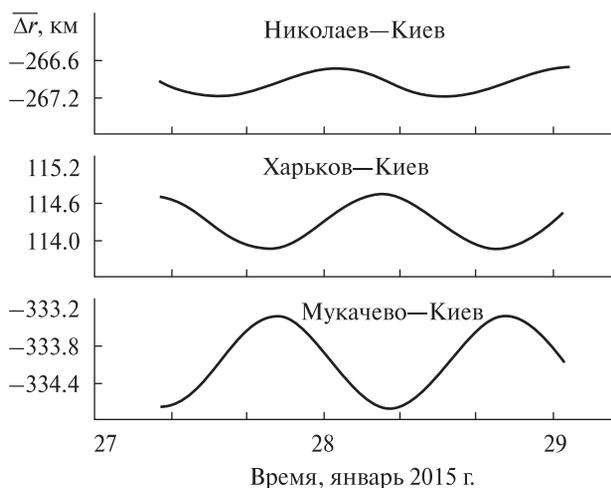


Рис. 4. Разности наклонных дальностей для пар станций Николаев — Киев, Харьков — Киев и Мукачево — Киев. Время наблюдений с 27 по 29 января 2015 г.

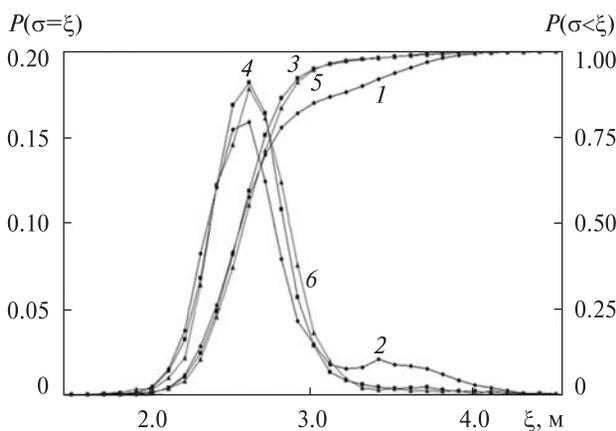


Рис. 5. Интегральные (1, 3 и 5) и дифференциальные (2, 4 и 6) выборочные законы распределения стандартного отклонения σ относительной задержки для трех пар станций: Николаев — Киев (1 и 2), Харьков — Киев (3 и 4) и Мукачево — Киев (5 и 6). Время наблюдений — с 27 по 29 января 2015 г.

го сигнала. Задержки сигнала PPS для станций в Киеве, Харькове и Мукачево выбраны таким образом, чтобы сохранить нулевую задержку для станции в Николаеве, и равны соответственно 888, 1270 и -215 мкс.

До 3 декабря 2014 г. станция в Николаеве была укомплектована одночастотным GPS-приемником «Resolution-T», в отличие от трех других

станций, имеющих в своем составе более совершенные GPS-приемники «ThunderBolt-E», формирующие секундный синхроимпульс с меньшей ошибкой. С 3 декабря 2014 г. станция в Николаеве работает с GPS-приемником «ThunderBolt-E», однако в связи с неисправностью станций в Киеве и Мукачево получить одновременные наблюдения контролируемого спутника всеми четырьмя станциями удалось только в период с 27 по 29 января 2015 г.

На рис. 4 представлены графики изменений разностей наклонных дальностей для трех пар станций: Николаев — Киев, Харьков — Киев и Мукачево — Киев. Для всех трех пар станций в результате корреляционного анализа определялись задержки сигналов, принятых в Николаеве, Харькове и Мукачево, относительно задержки сигнала, принятого в Киеве. На графиках по оси ординат отложены значения Δr , полученные усреднением секундных отсчетов Δr на интервале времени продолжительностью 60 с. По оси абсцисс отложено время UTC с 27 по 29 января 2015 г.

На рис. 5 приводятся выборочные законы распределения (интегральные $P(\sigma < \xi)$ и дифференциальные $P(\sigma = \xi)$) значения среднего квадратичного отклонения (СКО или σ), полученные на 60-с интервалах времени по каждой из выборок, представленных на рис. 4. Из данных, представленных на рис. 5, следует, что медианное значение СКО Δr составляет 2.6 м для всех трех пар станций. Следует отметить, что полученные законы распределения σ несимметричны относительно медианного значения. Все три графика $P(\sigma = \xi)$ более медленно спадают в интервале значений $\xi > 3.0$, чем в интервале $\xi < 2.2$. При этом график 2, полученный для пары станций Николаев — Киев, имеет в интервале $\xi > 3.0$) явно выраженный локальный максимум.

Оценим ошибку ϵ_a определения угловой координаты контролируемого спутника. Так как в нашем случае отношение минимального расстояния B между станциями РК к расстоянию L до спутника существенно меньше единицы (порядка 0.01), то ϵ_a можно оценить по методике, изложенной в работе [http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin119/bul119_chap8.pdf]. В

этой работе ε_a полагается равной отношению ошибки определения Δr к базе интерферометра: $\varepsilon_a = \sigma / B$. Полагая $\sigma = 2.6$ м, а $B = 400$ км, получим $\varepsilon_a \approx 0.0004^\circ$. Полученная оценка ε_a практически совпадает с оценкой, приведенной в цитируемой работе (0.0003° для $\sigma = 1.2$ мм и $B = 250$ м).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА

Используя относительные задержки сигнала ТК ГСС «Eutelsat 13В», измеренные сетью из четырех наземных станций приема цифрового спутникового телевидения в период времени с 27 по 29 января 2015 г., гиперболическим методом были рассчитаны ежесекундные значения декартовых координат спутника X , Y и Z в геоцентрической экваториальной системе координат с неподвижной Землей. Соответствующие графики средних значений \bar{X} , \bar{Y} и \bar{Z} на 60-с интервалах времени приводятся на рис. 6.

По данным, представленным на рис. 6, было построено 3-мерное изображение положений контролируемого спутника, которое приводится на рис. 7. При построении графиков, представленных на рис. 7, использовалась следующая процедура отбраковки грубых ошибок. Средние значения \bar{X} , \bar{Y} и \bar{Z} отбраковывались, если отбрасывались соответствующие значения Δr хотя бы для одной из пар станций. Значения Δr отбрасывались, если объем выборки усреднения был меньше 10 или величина СКО Δr превышала 3.0 м.

На рис. 8 приводятся распределения (интегральные и дифференциальные) значений среднего квадратичного отклонения X , Y и Z (σ_X , σ_Y и σ_Z соответственно), полученные на 60-с интервалах времени по каждой из выборок, представленных на рис. 6. Видно, что максимальную ошибку имеет координата X ; медианные значения СКО равны 3200, 640 и 400 м для каждой из координат X , Y и Z соответственно.

Отметим, что ошибки определения координат уменьшились примерно на порядок после замены в составе станции, расположенной в Николаеве, GPS-приемника «Resolution-T» на более

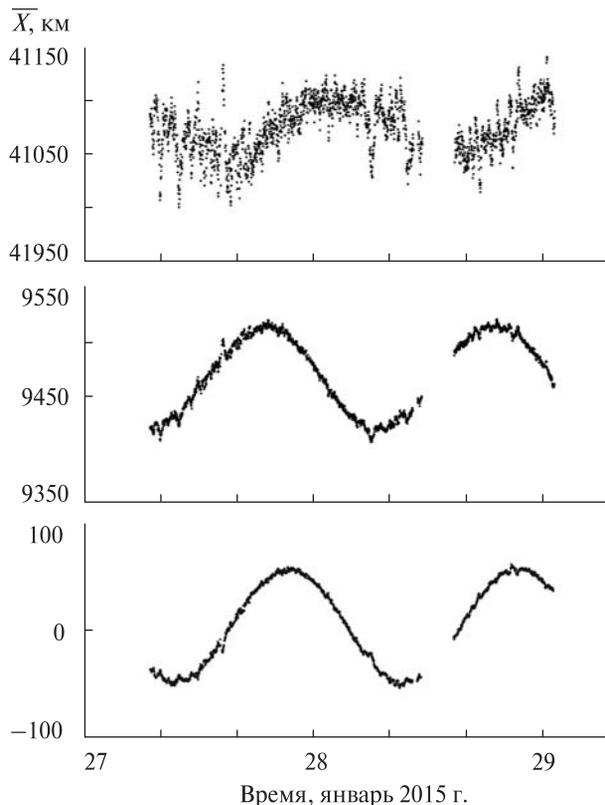


Рис. 6. Декартовы координаты телекоммуникационного геостационарного спутника «Eutelsat 13В» в геоцентрической экваториальной системе координат с неподвижной Землей

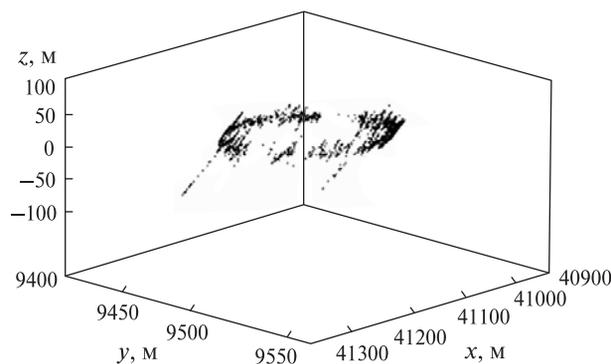


Рис. 7. Пространственные положения контролируемого спутника «Eutelsat-13В» в период времени с 27 по 29 января 2015 г.

совершенный приемник «ThunderBolt-E», тогда как ошибка определения Δr уменьшилась всего в 1.7 раза (с 4.5 до 2.6 м).

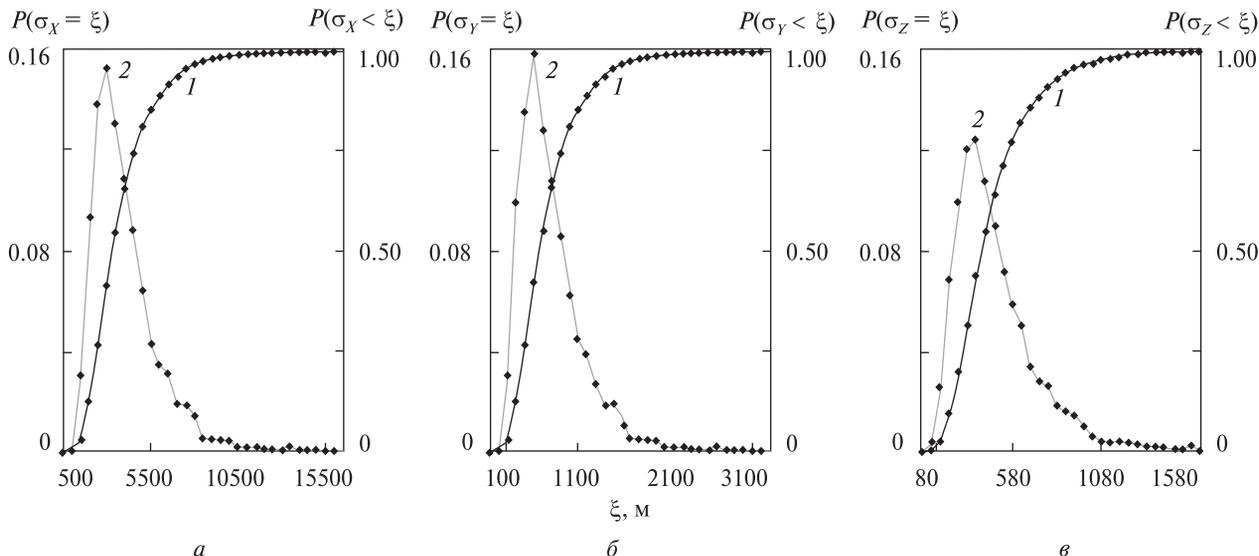


Рис. 8. Интегральные (1) и дифференциальные (2) выборочные законы распределения СКО декартовых координат телекоммуникационного геостационарного спутника «Eutelsat 13В» в геоцентрической экваториальной системе координат с неподвижной Землей: $a - X$, $b - Y$, $v - Z$

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Разработан и внедрен метод определения декартовых координат ТК ГСС в геоцентрической экваториальной системе координат по данным базисных наблюдений излучаемого спутником сигнала DTV-S.

Развернут радиотехнический комплекс из четырех идентичных разнесенных станций приема цифрового спутникового телевидения, установленных в «Укркосмос» (г. Киев), ЗЦРН (г. Мукачеве), НИИ НАО (г. Николаев), Радиоастрономический институт (г. Харьков). Максимальное расстояние между станциями составляет 1000 км по долготе и 400 км по широте.

С октября 2014 г. по январь 2015 г. комплексом проводились непрерывные наблюдения геостационарного телекоммуникационного спутника «Eutelsat-13В». По данным наблюдений гиперболическим методом были рассчитаны ежесекундные значения декартовых координат спутника X , Y и Z в геоцентрической экваториальной системе координат с неподвижной Землей. Для каждой из координат X , Y и Z медианные значения СКО единичного измерения составили 3200, 640 и 400 м соответственно.

Для уменьшения ошибки измерений координат предлагается увеличить базовое расстояние между станциями комплекса по широте до 1000 км. При этом ошибка измерений X может уменьшиться до величины порядка одного километра.

1. Бушуев Ф. И., Калюжный Н. А., Сливинский А. П., Шульга А. В. Определение дальности до телекоммуникационных геостационарных спутников с использованием сигналов спутникового телевидения // Радиофизика и радиоастрономия. — 2012. — 17, № 3. — С. 282–290.
2. Гофманн-Велленгоф Б., Лихтенеггер Г., Коллинз Д. Глобальная система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика / Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — Київ, 1995. — 380 с.
3. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. — М.: Радио и связь. 1993. — 416 с.
4. Huang Yong, Hu XiaoGong, Zhang XiuZhong, et al. Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking // Chinese Sci. Bull. — 2011. — 56, N 26. — P. 2765–2772.
5. Kara I. V., Kozryyev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects // Bull. Crimean Astrophys. Observatory. — 2011. — 107. — P. 98–102.
6. Montenbruck O., Gill E. Satellite orbits: models, methods, and applications. — Berlin: Springer, 2005. — 380 p.

Стаття надійшла до редакції 19.06.15

REFERENCES

1. *Bushuev F. I., Kalyuzhny N. A., Slivinsky A. P., Shulga A. V.* Determination of the Range to Telecommunications Geostationary Satellites Using the Signals of Satellite Television. *Radiofizika i Radioastronomia*, **17** (3), 282—290 (2012) [in Russian].
2. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Collins J.* Global Positioning System. Theory and Practice: Transl. from Eng., 380 p. (Nauk.dumka, Kyiv, 1995) [in Ukrainian].
3. *Chernjak V. S.* The multi radiolocation [Многопозиционная радиолокация], 416 p. (Radio i svjaz', Moscow, 1993) [in Russian].
4. *Huang Yong, Hu XiaoGong, Zhang XiuZhong, Jiang DongRong, Guo Rui, Wang Hong, Shi ShanBin.* Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking. *Chinese Sci. Bull.*, **56** (26), 2765—2772 (2011).
5. *Kara I. V., Kozryuev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V.* NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects. *Bull. Crimean Astrophys. Observatory*, **107**, 98—102 (2011).
6. *Montenbruck O., Gill E.* Satellite orbits: models, methods, and applications, 380 p. (Springer, Berlin, 2005).

*Ф. І. Бушув¹, М. П. Калюжний¹, Є. С. Сибірякова¹,
О. В. Шульга¹, С. С. Москаленко², О. А. Балагура³,
В. Ф. Кулішенко⁴*

¹ Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

² Західний центр радіотехнічного спостереження, Мукачево

³ Державне підприємство «Укркосмос», Київ

⁴ Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

РАДІОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО
ГЕОСТАЦІОНАРНОГО СУПУТНИКА

Представлено радіотехнічний комплекс для спостережень активного телекомунікаційного геостационарного супутника радіоінтерферометричним методом. До складу комплексу входять чотири станції прийому цифрового супутникового телебачення. Дано технічні та точнісні характеристики станцій, а також описується розроблена у Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» методика обчислення декартових координат телекомунікаційного геостационарного супутника у системі координат WGS84. Приводяться результати та похибки визначення координат супутника.

Ключові слова: координати геостационарного супутника, DVB-S, радіоінтерферометр.

*F. I. Bushuev¹, M. P. Kalyuzhnyi¹, Ye. S. Sybiryakova¹,
O. V. Shulga¹, S. S. Moskalenko², O. A. Balagura³,
V. F. Kulishenko⁴*

¹ Research Institute «Mykolayiv Astronomical Observatory», Mykolayiv

² Western Center of Radio Engineering Surveillance, Mukachevo

³ State Enterprise “Ukrkosmos”, Kyiv

⁴ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

THE RADIO-ENGINEERING COMPLEX
FOR DETERMINING COORDINATES
OF A GEOSTATIONARY
TELECOMMUNICATION SATELLITE

We present the radio-engineering complex for observation of an active geostationary telecommunication satellite (GSTS) using the radio-interferometry method. The complex consists of four receiving stations of digital satellite TV. Technical and precision characteristics of the stations are given in the article. A technique of Cartesian coordinates' calculation of the GSTS in the WGS84 coordinate system, which is developed in the Mykolaiv Astronomical Observatory, is also described. Results and accuracy of obtained coordinates of the GSTS are shown.

Key words: coordinates of a geostationary satellite, DVB-S, radio interferometer.