

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ, СВЯЗИ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 523.44+629.78

Ф. И. БУШУЕВ¹, Н. А. КАЛЮЖНЫЙ¹, А. П. СЛИВИНСКИЙ²,
А. В. ШУЛЬГА¹

¹Научно-исследовательский институт “Николаевская астрономическая обсерватория”,
ул. Обсерваторная, 1, г. Николаев, 54030, Украина

²Украинский радиотехнический институт,
ул. Кирова, 238, г. Николаев, 54031, Украина
E-mail: nikolkaph@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Разработан и испытан экспериментальный радиотехнический аппаратно-программный комплекс (РТАПК) для определения разности наклонных дальностей до телекоммуникационных геостационарных спутников (ТК ГСС) по корреляции сигналов спутникового телевидения. Избранная обработка сигнальной информации учитывает структуру этих сигналов и не зависит от состава передаваемой с их помощью информации. Погрешность оценки разности наклонных дальностей равна 5,6 м и определяется точностью синхронизации комплекса с помощью одночастотных GPS приемников Resolution-T. При условии усовершенствования системы синхронизации на основе высокостабильного атомного стандарта частоты и оптимального разнесения нескольких РТАПК на расстояния около 1000 км ошибка совместного определения орбиты ТК ГСС может составить приблизительно 18 м, или 0,1". Рассмотренный радиотехнический комплекс может быть прототипом экономически выгодной всепогодной региональной сети, предназначенной для определения орбиты ТК ГСС и долговременного мониторинга ее характеристик.

Ключевые слова: сигнал DVB-S, корреляционная функция, радиоинтерферометр, контроль космического пространства

1. Введение

Актуальность задачи постоянного контроля параметров орбиты телекоммуникационных геостационарных спутников (ТК ГСС) с максимально возможной точностью обусловлена рядом причин. Во-первых, существует практическая проблема безопасного размещения спутников на геостационарных орбитах в условиях постоянного роста населенности таких орбит, в том числе за счет расширения области задач, решаемых с помощью ГСС. Так, например, многие страны размещают или планируют разместить на геостационарных орбитах элементы региональных спутниковых систем дифференциальной коррекции (Space-Based Augmenta-

tion Systems), предназначенных для повышения точности глобальных систем позиционирования (включая точность частотно-временной синхронизации), таких как GPS (Global Positioning System) и других. Для увеличения населенности используется стратегия, предполагающая размещение нескольких спутников в одной геостационарной позиции, размеры площадки которой, согласно требованиям Международного союза электросвязи, составляют $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. В настоящее время в одной геостационарной площадке могут размещаться шесть и более спутников. Большой интерес вызывает изучение гравитационного поля Земли, когда ГСС рассматривается как “пробная частица”, находящаяся в гравитационном поле системы тел. Не менее важным является вопрос исследования влияния космической погоды на орбиту ГСС.

© Ф. И. Бушуев, Н. А. Калюжный, А. П. Сливинский,
А. В. Шульга, 2012

В настоящее время положение спутников вообще и ГСС в частности определяется с применением разнообразных технических средств. Наземные оптические средства не могут использоваться для постоянного сопровождения объектов космического пространства, так как возможность проведения таких наблюдений зависит от погодных условий. Однако благодаря высокой точности областью их применения является калибровка других средств определения орбиты. Системы спутниковой лазерной локации (Satellite Laser Ranging (SLR)) являются, согласно [1], наиболее точными. Ошибка определения расстояния между лазерной установкой и отражателем в настоящее время составляет $2 \div 3$ мм [2]. В работах [3, 4] сообщается о тестировании с помощью SLR сети региональных станций высокоточного определения орбит ГСС. Эта сеть является частью спутниковой навигационной системы Compass, разворачиваемой Китаем. Традиционные наземные оптические средства широко используются в системах контроля космического пространства, в том числе и на геостационарных орбитах. В 2011 г. международной сетью ISON (International Scientific Optical Network) с помощью 14 телескопов с апертурой 0.22 и 0.25 м проведено 560994 измерения положений геостационарных объектов [5]. Погрешность определения угловых координат находилась в интервале от $1.49''$ до $6.50''$. В работе канадских исследователей [6, 7] сообщается о разработке и тестировании (в том числе по наблюдению объектов, расположенных на геостационарных орбитах) малого оптического сенсора (диаметр телескопа 0.36 м) – базового элемента будущей распределенной автоматизированной системы наблюдения космического пространства как наземного, так и космического базирования. Погрешность сенсора была определена по наблюдениям спутников GPS и составила $1''$. В рамках выполнения проекта PASAGE (Astrometric Positioning of Geostationary Satellites) проводилось наблюдение геостационарных объектов с помощью телескопов диаметром 0.33 и 2 м, а также была разработана методика, которая позволила определять угловые координаты таких объектов с ошибкой в несколько десятых угловой секунды [8, 9]. Эта методика не требует использования больших телескопов или специальных мест для наблюдения с благоприятным астроклиматом. В работе [10] сообщается о наблюдениях геостационарных объектов с ошиб-

кой в пределах $0.30'' \div 0.47''$. Наблюдения проводились на 2-метровом телескопе Цейсс-2000 астрономического комплекса, расположенного на горе Терскол (высота 3150 м). В Научно-исследовательском институте “Николаевская астрономическая обсерватория” (НИИ НАО) также наблюдались геосинхронные объекты с помощью телескопа скоростного астрономического комплекса, оснащенного объективом системы Макусутова (диаметр 0.3 м). В течение 2008–2010 гг. был получен каталог 31883 положений 67 геосинхронных космических объектов $10 \div 16$ звездной величины. Среднеквадратическое отклонение (СКО) положений космических объектов находилось в пределах от $0.26''$ до $0.91''$ [11].

В отличие от оптических наблюдений радионаблюдения не зависят от погодных условий, однако в диапазоне радиоволн точность измерений угловых координат пассивным или активным однопозиционным радаром значительно уступает оптическим наблюдениям. Так, на частоте 14 ГГц с помощью антенны диаметром 10 м, которая широко используется для контроля геостационарных коммуникационных спутников, ошибка в сопровождении может достигать $10''$ [1].

Существенно более высокую точность имеют дистанционные измерения. В классическом случае двусторонней радиолокации наземная станция определяет время распространения, которое пропорционально удвоенному расстоянию между станцией и спутником. Различают системы с тоновым и кодовым дистанционированием. Типичная погрешность тоновой системы дистанционирования составляет 15 м [1], что для геостационарных высот эквивалентно угловой ошибке порядка $0.1''$. Системы с кодовым дистанционированием используют псевдослучайный код для модуляции несущей. Время распространения сигнала определяется по корреляции принятого и излученного сигналов. Упомянутая выше навигационная система Compass в своем составе имеет несколько наземных станций слежения, использующих кодовое дистанционирование и работающих в диапазоне $4 \div 8$ ГГц. Погрешность дистанционирования ГСС, оборудованных соответствующими транспондерами, составляет несколько сантиметров [12].

В конфигурации совмещенных приемопередающих позиций близкую точность дистанционирования имеет система DARTS (Digital Advanced Ran-

ging with Transport-stream Signals) [13]. Ошибка дистанционирования DARTS составляет 0.05 м. Особенностью системы является использование передающей станции контролируемого ТК ГСС для передачи специальных пакетов дистанционирования. Такие пакеты вставляются в транспортный поток DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite), излучаются одновременно с полезной нагрузкой и принимаются всеми приемниками системы. Момент приема пакета определяется по свертке принятого и излученного сигналов, прошедших квадратурное детектирование. При этом каждый приемник реконструирует излученный сигнал с учетом результатов декодировки принятого пакета. Момент излучения пакета также определяется по свертке двух сигналов: реконструированного и поступившего по специальному ответвлению с антенного тракта передатчика. Если система работает в конфигурации, когда только один приемник совмещен с передатчиком, то необходимая синхронизация приемников обеспечивается с помощью GPS.

Предлагаемый нами подход к решению задачи определения положения ТК ГСС основывается, как и в случае системы DARTS, на использовании транспортного потока DVB-S. Однако имеются два важных отличия. Первое – для определения положения ТК ГСС предлагается использовать непосредственно полезную нагрузку транспортного потока DVB-S. Второе – предлагается вместо дальности (дистанционирования) определять разность наклонных дальностей до ТК ГСС. В этом отношении предлагаемый подход эквивалентен применяемому в радиоинтерферометрии, при котором также определяется разность наклонных дальностей до спутника. В работе [12] сеть радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ) была применена для калибровки системы слежения за ГСС, входящими в навигационную систему Compass. Китайская сеть РСДБ

(КСР) состоит из четырех станций; минимальная база РСДБ равна 1114 км, а максимальная – 3249 км. Маяком для КСР был сигнал, излучаемый ГСС на частоте 2.2 ГГц с шириной спектра порядка 2 МГц. При этом погрешность измерений радиоинтерферометрами задержки составила 3.6 нс. В работе [12] отмечается, что сравнительно невысокая точность измерений задержки обусловлена узостью спектра сигнала маяка.

2. Аппаратно-программный комплекс определения разности наклонных дальностей до телекоммуникационных ГСС

Разработанный в НИИ НАО радиотехнический аппаратно-программный комплекс (РТ АПК) состоит из двух идентичных разнесенных пунктов приема спутникового телевидения и пункта обработки принятой информации. В состав приемного пункта входит: 1) стандартная антенно-фидерная система приема сигналов спутникового телевидения (TV-S), диаметры антенн 0.9 и 1.9 м; 2) телевизионный (TV) тюнер SkyStar1, доработанный в части вывода синфазного (In) и квадратурного (Qu) сигналов до цифровой обработки их микропроцессором TV-тюнера; 3) одночастотный GPS-приемник Resolution-T; 4) цифровой USB-осциллограф DSO5200A или DSO2090 с полосой пропускания 200 или 40 МГц и с 9- или 8-битным ADC (Analog Digital Converter) соответственно; 5) персональный компьютер (ПК) с USB и RS-232 под управлением операционной системы Windows XP (тактовая частота процессора 1 ГГц, объем оперативной памяти 1 Гб, емкостью жесткого диска 500 Гб). Блок-схема приемного пункта представлена на рис. 1. В соответствии с блок-схемой сигналы с выхода квадратурного детектора TV-тюнера подаются на два канала цифрового USB-осциллографа. Запись во внутреннюю память осциллографа временных реализаций этих сигналов (IQ)

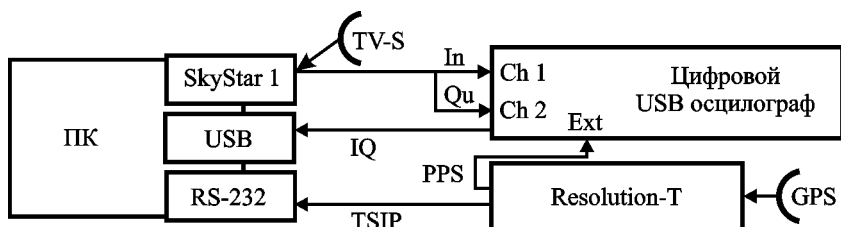


Рис. 1. Блок-схема приемного пункта: Ext, Ch1, Ch2 – клеммы осциллографа (внешний запуск, первый и второй каналы соответственно)

выполняется в момент прихода сигнала PPS (pulse-per-second) от GPS-приемника Resolution-T.

Чтение данных IQ из внутренней памяти осциллографа производится через порт USB программой DSO5200A-SYN или DSO2090-SYN (в зависимости от используемого типа осциллографа) сразу после поступления от GPS-приемника пакета данных с информацией о текущем времени. Информация о текущем времени в формате протокола TSIP (Trimble Standard Interface Protocol) выдается Resolution-T раз в секунду в порт RS-232 компьютера. Момент начала выдачи информации привязан к моменту выдачи сигнала PPS и отстает от него примерно на 100 мс. Чтение пакета данных GPS производится программой TSIP_SYN. Отметим, что, кроме текущего времени, пакет содержит координаты приемного пункта, количество обнаруженных GPS-спутников и другие данные. Сразу после приема пакета программа TSIP_SYN выдает специальное системное сообщение, которое принимается программой DSO5200A-SYN или DSO2090-SYN и является сигналом для начала чтения данных IQ из внутренней памяти осциллографа. Программы TSIP_SYN, DSO5200A-SYN и DSO2090-SYN являются модифицированными вариантами открытых демонстрационных версий, предоставляемых разработчиками GPS-приемника и цифровых USB-осциллографов (на сайтах <<http://www.trimble.com>> и <<http://www.hantek.com.cn>> соответственно).

Таким образом двумя приемными пунктами производится синхронная запись временных выборок комплексного сигнала DVB-S с темпом один раз в секунду или реже на жесткие диски ПК. Эти выборки поступают в пункт обработки для определения разности наклонных дальностей от приемных пунктов до ГСС. Пусть A_i и φ_i – выборочные значения амплитуды и фазы комплексного сигнала в дискретный момент времени t_i , а i – его порядковый номер. В пункте обработки программа CorrelationDFT прежде всего вычисляет значения действительной функции $f(t_i) = A_i \sin(\varphi_i - \varphi_{i-1})$ от исходных комплексных сигналов, а затем, вычисляя свертку временных реализаций $f(t_i)$, полученных для двух приемников, определяет их корреляционную функцию. Применение преобразования $f(t_i)$ обусловлено необходимостью учитывать структуру сигнала DVB-S и увеличивать тем самым отношение сигнал/шум на выходе коррелятора. Известно, что для передачи цифровой информации в сигнале

DVB-S используется QPSK-модуляция [14], т. е. абсолютное значение фазы сигнала несет информацию о передаваемом числе (символе). Для определения фазы в приемниках спутникового телевидения используется синхронизация символов, когда фаза гетеродина изменяется таким образом, чтобы обеспечить максимальное соответствие выходной последовательности символов известной информационной структуре транспортного потока [15]. Преобразование аналогового комплексного сигнала DVB-S в цифровой вне петли автоподстройки фазы, как это имеет место в рассмотренной выше блок-схеме (рис. 1), приводит к тому, что значения φ_i содержат дополнительный фазовый сдвиг, который обусловлен, прежде всего, индивидуальными фазовыми характеристиками приемника. Однако, учитывая вид модуляции сигнала DVB-S, можно ожидать, что разность двух соседних отсчетов фазы $(\varphi_i - \varphi_{i-1})$, вычисленная в один и тот же момент времени t_i , будет величиной одинаковой или близкой для двух приемников. Соответственно, будут одинаковыми или близкими значения функции $f(t_i)$. Применение преобразования $f(t_i)$ позволило получить на частоте дискретизации Найквиста свертку сигналов с отношением сигнал/шум на выходе коррелятора порядка $5 \div 10$, при том что исходные сигналы IQ не сворачиваются.

При вычислении программой CorrelationDFT корреляционной функции выборка, полученная одним из приемников, используется полностью (первая выборка), а выборка, полученная вторым приемником, используется частично, т. е. лишь средняя часть заданной длины, смещенная на время $\tau_2 \geq 0$ от ее начала, (вторая выборка). Отметим, что объем выборки осциллографов DSO5200A и DSO2090 не может быть произвольным и для используемого программного обеспечения он фиксирован, равен 10240 отсчетам, и не зависит от заданной шкалы прибора, определяющей частоту дискретизации. Следовательно, объем первой выборки всегда равен 10240 отсчетам, а объем второй выборки всегда меньше 10240 отсчетов. Пусть τ_1 – временной сдвиг, отсчитываемый от начала первой выборки, а τ_x – значение τ_1 , соответствующее максимуму корреляционной функции. Тогда, с учетом синхронности записи выборок двумя приемниками, разность наклонных дальностей Δr до телекоммуникационного ГСС будет пропорциональна разности $\Delta \tau_x = (\tau_x - \tau_2)$: $\Delta r = c \Delta \tau_x$, где c – скорость

света в вакууме, а $\Delta\tau_x$ – задержка сигнала, принятого первым приемником, относительно сигнала, принятого вторым приемником. Для уточнения положения максимума τ_x и, соответственно, для увеличения точности определения Δr в программе CorrelationDFT используется преобразование Гильберта корреляционной функции [16].

3. Испытания комплекса

3.1. Совмещенные приемные пункты

Испытания комплекса проводились в условиях совмещенных пунктов приема и использования одного и того же сигнала PPS для синхронизации записи выборок во внутреннюю память осциллографов. При этом расстояние между антеннами TV-S было порядка 10 м. Целью испытаний было определение дополнительной задержки TV-сигнала, вызванной включением в один из приемных трактов коаксиального кабеля длиной 6.94 м. Во время испытаний принимался транспортный поток DVB-S со спутника, размещенного в позиции 13° в. д. Символьная частота потока составляла 27.5 мегасимволов в секунду при максимальной частоте спектра порядка 30 МГц [14]. Измерения дополнительной задержки проводились с использованием двух частот дискретизации, одна из которых была выше (102.4 МГц), а вторая ниже (25.6 МГц) частоты дискретизации Найквиста, равной удвоенному значению максимальной частоты спектра сигнала. Вычислялось также отношение физической длины кабеля к измеренной длине, которая полагалась равной произведению скорости света в вакууме на полученную величину дополнительной задержки. Результаты испытаний приводятся в табл. 1.

Значения отношения физической длины кабеля к измеренной для обеих частот дискретизации находятся в хорошем соответствии со значением коэффициента укорочения, равным отношению скорости света в вакууме к скорости распространения сигнала в кабеле. С учетом условий испытаний значения СКО задержки $\Delta\tau_x$ (7 нс) и отно-

шения сигнал/шум (11), полученные для частоты дискретизации 102.4 МГц, являются предельно возможными для РТ АПК. Использование частоты дискретизации 25.6 МГц и минимального объема выборки для вычисления свертки (1192 отсчетов) приводит к увеличению ошибки измерений и уменьшению отношения сигнал/шум. Однако эти измерения дают устойчивый результат, а ошибка близка к точности сигнала PPS Resolution-T [17]. Следовательно, данный набор параметров можно использовать при проведении измерений разнесенными в пространстве пунктами приема TV-S.

3.2. Разнесенные в пространстве приемные пункты

Целью испытаний в случае разнесенных приемных пунктов являлась оценка суточных вариаций разности наклонных дальностей от пунктов приема до телекоммуникационного ГСС. Для проведения испытаний один из пунктов был размещен в НИИ НАО (г. Николаев), а второй в филиале НИИ “Одесская астрономическая обсерватория” (п. Маяки Одесской области). Расстояние между пунктами составляло порядка 150 км. Как и в случае совмещенных приемных пунктов во время испытаний принимался транспортный поток DVB-S с символьной частотой 27.5 мегасимволов в секунду со спутника, размещенного в позиции 13° в. д. Для обеспечения максимально возможного диапазона анализа по задержке измерения проводились с использованием частоты дискретизации 25.6 МГц и при объеме второй выборки 1192 отсчета. Длина интервала анализируемых задержек при этом была равна примерно 353 мкс, что соответствует 106 км. Испытания проводились в период с 25.08.2011 г. по 27.08.2011 г. с максимальным темпом записи выборок – один раз в секунду.

При определении корреляционной функции в качестве первой бралась выборка, записанная в Николаеве. Соответственно второй была выборка, полученная в Маяках. На рис. 2 приводится

Таблица 1. Результаты испытаний РТ АПК в условиях совмещенных приемных пунктов

Частота дискретизации, МГц	Объем 2-й выборки, к-во отсчетов	Отношение сигнал/шум	Отношение 6.94/измеренная длина кабеля	Дополнительная задержка, нс	СКО $\Delta\tau_x$, нс
102.4	8192	11	0.92	25	7
25.6	1192	5	0.96	24	19

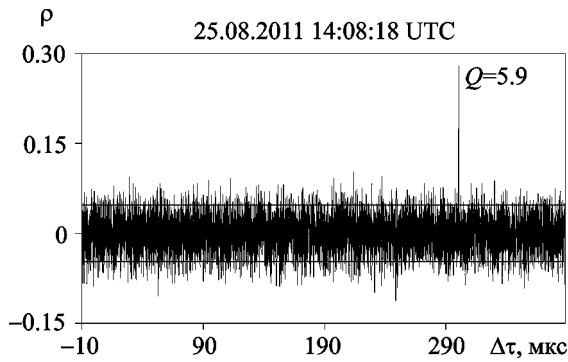


Рис. 2. Пример корреляционной функции ρ , полученной в результате свертки сигналов DVB-S, одновременно принятых в Николаеве и в Маяках

пример корреляционной функции, вычисленной по данным, полученным 25.08.2011 г. в 14:08:18 UTC (всемирного координированного времени). На рисунке по оси абсцисс отложены значения разности задержек $\Delta\tau = (\tau_1 - \tau_2)$, а по оси ординат – значения корреляционной функции ρ . Сплошными линиями показан уровень шумов, который полагался равным значению СКО ρ , умноженному на коэффициент 1.6, а рядом с пиком корреляционной функции приводится соответствующее ему значение отношения сигнал/шум Q .

На рис. 3 показано интегральное распределение величины Q , полученное по всему массиву наблюдательных данных, т. е. значение $P(Q < x)$ на рисунке равно оценке вероятности того, что величина Q не превышает x . Стрелкой на рисунке отмечено пороговое значение отношения сигнал/шум $Q_{\min} = 3.8$, которое использовалось при построении суточных вариаций разности наклонных дальностей от пунктов приема до ТК ГСС. В работе [13] для определения точности системы DARTS измеренные значения наклонной дальности линейно интерполировались на интервале времени продолжительностью 10 с. В нашем случае разность максимального и минимального значений Δr на полусуточном интервале наблюдений составляла примерно 200 м. Следовательно, изменения разности наклонных дальностей на десятисекундном интервале времени имеют значение порядка 0.05 м, которое более чем на порядок меньше предельной точности РТ АПК (см. табл. 1). По этой причине для оценки точности единичных измерений использовалось усреднение Δr на десятисекундных интервалах времени. Пусть $\bar{\Delta r}$ – среднее значение, а σ – СКО Δr на десятисекундном

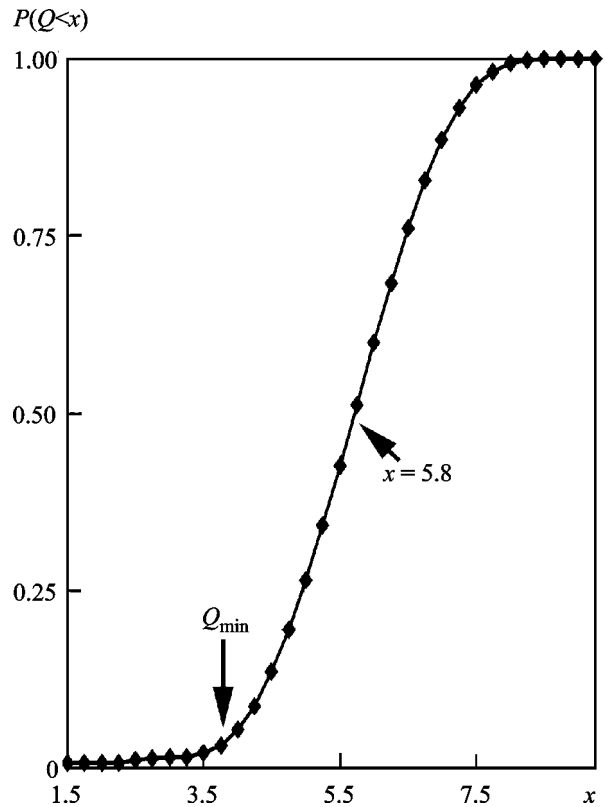


Рис. 3. Интегральное распределение отношения сигнал/шум $P(Q < x)$. Здесь $x = 5.8$ – медианное значение Q

интервале времени. Если отношение сигнал/шум в максимуме корреляционной функции было меньше порогового Q_{\min} , то соответствующее измерение Δr из выборки для определения $\bar{\Delta r}$ и σ выбрасывалось. Если объем выборки был меньшим 5, то оценка $\bar{\Delta r}$ и σ не проводилась. В результате указанной обработки было получено более 17000 оценок Δr и σ . Изменения Δr на интервале наблюдений представлены на рис. 4. Анализ полученных значений σ показал, что основным фактором, влияющим на точность измерений Δr , являются ошибки синхронизации измерений с помощью GPS-приемника Resolution-T и что в качестве оценки погрешности единичных измерений правомерно взять, как более устойчивое, медианное значение σ , равное 7.3 м, или 24 нс.

Известно, что при условии свободного движения ТК ГСС в поле сил тяготения основной гармонической составляющей изменений разности наклонных дальностей является гармоника с периодом, равным звездным суткам. Экспериментальное подтверждение данному факту можно найти в работе [18], где приводятся результаты регис-

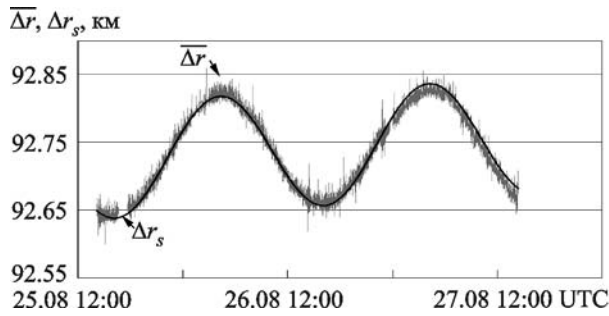


Рис. 4. Вариации разности наклонных дальностей $\overline{\Delta r}$ по данным наблюдения ТК ГСС двумя пунктами приема TV-S, расположенными в Николаеве и Маяках, а также сглаженные значения Δr_s

трации с помощью радиоинтерферометра разности фаз сигнала, излучаемого ТК ГСС. Следует также отметить, что по данным сайта <<https://www.space-track.org>> период обращения спутника HotBird 9 (номер орбиты 33459), сигнал которого регистрировался во время испытаний РТ АПК, с точностью до шести десятичных знаков совпадает с длительностью звездных суток. Поэтому для оценки точности РТ АПК временная реализация $\overline{\Delta r}$ сглаживалась методом наименьших квадратов с учетом наличия линейного тренда и одной гармонической составляющей с периодом, равным звездным суткам. Параметры сглаживания определялись по части массива наблюдательных данных, соответствующей временному интервалу плавного изменения $\overline{\Delta r}$ с 17:40:20 UTC 25.08.2011 г. до 22:23:10 UTC 26.08.2011 г. Окончательная оценка параметров сглаживания проводилась после отбрасывания измерений, невязки которых превышали три СКО. Таким способом были получены оценка СКО сглаживания, равная 5.6 м, и сглаживающая зависимость Δr_s , представленная на рис. 4 сплошной линией.

4. Обсуждение результатов

Проведенные испытания показали, что среднеквадратичная погрешность оценки разности наклонных дальностей ТК ГСС равна 5.6 м, а основным фактором, влияющим на точность, являются ошибки синхронизации измерений с помощью GPS-приемника Resolution-T.

Выше отмечалось, что использованный при создании РТ АПК подход – измерение разности наклонных дальностей до ТК ГСС – эквивалентен применяемому в радиоинтерферометрии и соответствует измерению угла. Рассмотрим плоскость,

образованную спутником и базовой линией. Пусть α – угол в этой плоскости между нормалью к базовой линии и направлением на спутник из данного пункта радиоинтерферометра. Пренебрегая отличием углов α для двух пунктов интерферометра, получим

$$\alpha \approx \frac{\Delta r}{B},$$

где B – база интерферометра, а Δr – измеренное значение разности наклонных дальностей. Пусть ϵ_d – ошибка измерений Δr , тогда ошибка измерения поперечной координаты спутника составляет

$$\epsilon_{\perp} \approx \epsilon_d \frac{L}{B},$$

где L – расстояние от радиоинтерферометра до спутника. Ошибка измерения радиальной координаты спутника $\epsilon_R \approx 2\epsilon_d \left(\frac{L}{B}\right)^2$ [12] значительно превышает ϵ_{\perp} , так как для региональной сети наземных станций $L \gg B$. Этот недостаток может быть компенсирован в сети радиоинтерферометров, базовые линии которых ориентированы оптимальным образом. Так, погрешность совместного определения орбиты ГСС радиоинтерферометрами КСР составила 10 м [12], тогда как оценки ϵ_{\perp} и ϵ_R равны соответственно 11 и 246 м. Приведенные оценки были получены для максимальной базовой линии $B = 3249$ км в предположении, что $L = 36000$ км, и с учетом того, что для радиоинтерферометров КСР $\epsilon_d \approx 1$ м.

Рассматриваемый радиотехнический комплекс может быть прототипом региональной сети, предназначенной для определения орбиты ТК ГСС. Пусть ϵ_e – искомое значение погрешности измерений такой сети, базовые линии которой оптимально ориентированы и имеют длину порядка 1000 км. Воспользуемся изложенной выше методикой для оценки ϵ_e , полагая значение ϵ_e равным ϵ_{\perp} . Тогда для $L = 36000$ км, $\epsilon_d \approx 5.6$ м и $B = 1000$ км получим $\epsilon_e \approx \epsilon_{\perp} = 202$ м. В работе [12] указывается, что при определении орбиты ГСС синхронизация радиоинтерферометров КСР осуществлялась с помощью водородных стандартов и GPS как источников точного времени. К примеру, применяя в РТ АПК значительно более дешевые, чем водородные, рубидиевые стандарты, относительная погрешность частоты которых не хуже 10^{-10} , точ-

ность выдачи сигналов PPS можно существенно улучшить по сравнению с точностью сигналов PPS GPS-приемников, имеющих погрешность порядка 10 нс. В то же время дрейф “шкалы времени” рубидиевого стандарта (сутки и более) может быть с высокой точностью учтен по GPS данным, имеющим превосходящую долговременную стабильность. В этом случае ошибка измерений задержки определяется свойствами используемых в РТ АПК цифровых осциллографов и не может быть меньше 7 нс (см. табл. 1), что обуславливает значения ϵ_d и ϵ_e , равные соответственно 2.1 и 76 м. Однако в системе DARTS ошибка определения положения пика корреляционной функции в несколько раз меньше, чем в РТ АПК, и составляет величину порядка 1.67 нс, хотя в обоих случаях ширина спектра анализируемых сигналов одинакова и равна 30 МГц [13]. Такая точность обусловлена использованием высокостабильной частоты 10 МГц приемника GPS как для формирования излучаемых сигналов DVB-S, так и для оцифровки принятых сигналов IQ. Следовательно, при усовершенствовании блока аналогово-цифрового преобразования РТ АПК погрешность единичных измерений разности наклонных дальностей, равная $\epsilon_d = 1.67$ нс (или 0.5 м), может быть вполне достижимой. Для этого, прежде всего, необходимо, чтобы при оцифровке принятых сигналов IQ использовалась высокостабильная опорная частота атомного стандарта или приемника GPS. Таким образом, после усовершенствования системы синхронизации, включая этап аналогово-цифрового преобразования, достижимым значением погрешности измерений с помощью региональной сети РТ АПК может быть $\epsilon_e \approx 18$ м, или $\epsilon_e \approx 0.1''$.

5. Выводы

Разработан экспериментальный РТ АПК для определения разности наклонных дальностей ТК ГСС с применением свертки сигналов спутникового телевидения. РТ АПК состоит из двух разнесенных пунктов приема спутникового телевидения и пункта обработки наблюдений. В результате двухсуточных испытаний получена погрешность оценки разности наклонных дальностей ТК ГСС, равная 5.6 м, обусловленная точностью синхронизации комплекса с помощью одночастотных GPS-приемников Resolution-T. При условии модернизации системы синхронизации РТ АПК на основе высокостабильного атомного стандарта час-

тоты, включая этап аналогово-цифрового преобразования, ошибка измерений разности наклонных дальностей может не превышать значения 0.5 м.

Рассмотренный радиотехнический комплекс является прототипом весьма экономичной всепогодной региональной сети, предназначенной для определения орбиты ТК ГСС и ее долговременного мониторинга. Погрешность определения параметров орбиты с помощью такой сети, базовые линии которой оптимально ориентированы и примерно равны 1000 км, составит значение, приблизительно равное 18 м, или $0.1''$, при условии модернизации систем синхронизации РТ АПК, входящих в сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Montenbruck O. and Gill E. Satellite orbits: models, methods, and applications. – Berlin: Springer, 2005. – 380 p.
2. Application note SLR. Austrian Academy of Science, Space Research Institute, SLR station Graz. <<http://www.highqus.com/>>.
3. Guo Rui, Hu XiaoGong, Liu Li, Wu XiaoLi, Huang Yong, and He Feng. Orbit determination for geostationary satellites with the combination of transfer ranging and pseudorange data // Sci. China Phys. Mech. Astron. – 2010. – Vol. 53, No. 9. – P. 1746–1754.
4. Zhou Shanshi, Hu Xiaogong, Wu Bin, Liu Li, Qu Weijing, Guo Rui, He Feng, Cao Yueling, Wu Xiaoli, Zhu Lingfeng, Shi Xin, and Tan Hongli. Orbit determination and time synchronization for a GEO/IGSO satellite navigation constellation with regional tracking network // Sci. China Phys. Mech. Astron. – 2011. – Vol. 54, No. 6. – P. 1089–1097.
5. Молотов И. Современное состояние сети обсерваторий ISON // Астрономия и телескопостроение. <<http://astronomer.ru/ru/>>.
6. Wallace B., Scott R. (Lauchie), and Spaans A. The DRDC Ottawa Space Surveillance Observatory // AMOS Technical Conference 2007. – Maui (Hawaii). – 2007. – P. 1–9.
7. Scott R. (Lauchie) and Wallace B. Small Aperture Telescope Observations of Co-located Geostationary Satellites // Proc. AMOS Technologies Conference, September 1-4. – Maui (Hawaii). – 2009. – P. E88.
8. Moratalla T. L., Abad C., Belizon F., Coma J. C., Montojo F. J., Muinos J. L., Palacio J., and Vallejo M. The PASAGE Project Astrometric Positioning Of Geostationary Satellite // 14th International Laser Ranging Workshop, 1–11 June 2004. – San Fernando, Cadiz (Spain). – 2004. <http://cdsis.gsfc.nasa.gov/lw14/docs/posters/sci4p_tmo.pdf>.
9. Montojo F. J., Moratalla T. L., and Abad C. Astrometric positioning and orbit determination of geostationary satellites // Adv. Space Res. – 2011. – Vol. 47, Is. 6. – P. 1043–1053.
10. Сергеев А. В., Тарадий В. К., Бахтигараев Н. С., Андреев Н. В., Карпов Н. В. Новые возможности Терскольской обсерватории для исследований “космического мусора” в околоземном пространстве // Сб. трудов конференции “Околоземная астрономия 2009. Казань, 22-26 августа 2009”. – М.: ГЕОС. – 2010. – С. 105–109.

11. Kara I. V., Kozyrev Y. S., Sybiryakova Y. S., and Shulga O. V. NAO Catalog of Geocentric State Vectors of Geosynchronous Space Objects // Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory. – 2011. – Vol. 107. – P. 98–102.
12. Huang Yong, Hu XiaoGong, Zhang XiuZhong, Jiang Dong-Rong, Guo Rui, Wang Hong, and Shi ShanBin. Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking // Chinese Sci. Bull. – 2011. – Vol. 56, No. 26. – P. 2765–2772.
13. Harles G., Siebert P., Eberlein E., Nowotne H-J., Fritzsche B., Haiduk F., Knüchel U., and Lindig M. A novel ranging method using DVB-S transport stream packets // Proc. Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications (DSP 2001). – Sesimbra (Portugal). – 2001. <<http://esamultimedia.esa.int/conferences/01C14/papers/P2.2.pdf>>.
14. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services. European Standard (Telecommunications series). EN 300 421 V1.1.2 (1997-08). European Telecommunications Standards Institute. – 1997. – 24 p.
15. Fischer W. Digital Video and Audio Broadcasting Technology. A Practical Engineering Guide. Second Edition. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. – 2008. – 580 p.
16. Cabot R. A Note on the Application of the Hilbert Transform to Time Delay Estimation // IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Process. – 1981. – Vol. 29, No. 3. – P. 607–609.
17. Resolution T. System Designer Reference Manual. Copyright 2005 Trimble Navigation, Inc. 2005. – 138 p. <www.trimble.com>.
18. Pedersen F. H. Interferometer for High Precision Orbit Determination // Proc. of DASIA 2003 (ESA SP-532), 2-6 June 2003, Prague, Czech Republic. Editor: R. A. Harris. Published on CDROM. – P. 39.1–39.10. <<http://adsabs.harvard.edu/full/2003ESASP.532E..39P>>.

Ф. І. Бушуев¹, М. П. Калюжний¹, О. П. Сливинський²,
О. В. Шульга¹

¹Науково-дослідницький інститут “Миколаївська астрономічна обсерваторія”,
вул. Обсерваторна, 1, м. Миколаїв, 54030, Україна

²Український радіотехнічний інститут,
вул. Кірова, 238, м. Миколаїв, 54031, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ СУПУТНИКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СИГНАЛІВ СУПУТНИКОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ

Розроблено та випробувано експериментальний радіотехнічний апаратно-програмний комплекс (РТ АПК) для визначення різниці похилих дальностей до телекомуніка-

ційних геостационарних супутників (ТК ГСС) за кореляцією сигналів супутникового телебачення. Обрана обробка сигнальної інформації враховує структуру цих сигналів та не залежить від складу інформації, що передається з їх допомогою. Похибка оцінки різниці похилих дальностей становить 5.6 м і визначається точністю синхронізації комплексу за допомогою одночастотних GPS-приймачів Resolution-T. За умови удосконалення системи синхронізації на основі високостабільного атомного стандарту частоти і оптимального рознесення декількох РТ АПК на відстані близько 1000 км похибка сумісного визначення орбіти ТК ГСС може становити приблизно 18 м, або 0.1". Розглянутий радіотехнічний комплекс може бути прототипом економічно вигідної всепогодної регіональної мережі, призначеної для визначення орбіти ТК ГСС та довготермінового моніторингу її характеристик.

F. I. Bushuev¹, N. A. Kalyuzhny¹, A. P. Slivinsky²,
and A. V. Shulga¹

¹“Mykolayiv Astronomical Observatory” Research Institute,
1, Observatorna St., Mykolayiv, 54030, Ukraine

²Ukrainian Institute of Radio Engineering,
238, Kirov St., Mykolayiv, 54031, Ukraine

DETERMINATION OF THE RANGE TO TELECOMMUNICATIONS GEOSTATIONARY SATELLITES USING THE SIGNALS OF SATELLITE TELEVISION

An experimental radio-engineering hardware and software complex (RE HSC) has been developed and tested to determine the slant range difference of telecommunications geostationary satellites (TC GSS) by using correlation of the satellite television signals. The processing of signal information accounts for the structure of these signals and does not depend on their payload composition. Accuracy estimation of the slant range difference is equal 5.6 m and determined by the synchronization accuracy of the complex by using single-frequency GPS receivers Resolution-T. Subject to the improvement of the synchronization system based on a highly stable atomic frequency standard and optimal separation of several RE HSCs at the range of about 1000 km, the joint orbit determination error of TC GSS could be equal to about 18 m or 0.1 arcsec. Considered radio-engineering complex may be a prototype of cost-effective all-weather regional network for orbit determination of TC GSS and long-term monitoring of its characteristics.

Стаття постуила в редакцію 05.06.2012