

# РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ, СВЯЗИ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 52344+629.78

Ф. И. БУШУЕВ<sup>1</sup>, Н. А. КАЛЮЖНЫЙ<sup>1</sup>, Е. С. СИБИРЯКОВА<sup>1</sup>,  
А. В. ШУЛЬГА<sup>1</sup>, Ю. М. ГОРБАНЁВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт “Николаевская астрономическая обсерватория”,  
ул. Обсерваторная, 1, г. Николаев, 54030, Украина  
E-mail: nikalyuzhny@ukr.net

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт “Астрономическая обсерватория  
Одесского национального университета”,  
ул. Маразлиевская, 1в, г. Одесса, 65014, Украина

## МЕТОД И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОСТИ НАКЛОННЫХ ДАЛЬНОСТЕЙ ДО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ

*Описан разработанный в Научно-исследовательском институте “Николаевская астрономическая обсерватория” метод определения разности наклонных дальностей до активных телекоммуникационных геостационарных спутников (ТК ГСС). Обсуждаются результаты наблюдений ТК ГСС “Eutelsat-25C” и “Eutelsat-13B” двумя станциями приема цифрового спутникового телевидения. Приводится оценка точности определения разности наклонных дальностей до ТК ГСС.*

*Ключевые слова:* радиоинтерферометр, геостационарный спутник, цифровое спутниковое телевидение

### 1. Введение

Разработанный в НИИ “Николаевская астрономическая обсерватория” (НИИ НАО) радиотехнический комплекс (РК) предназначен для контроля положения активных телекоммуникационных геостационарных спутников (ТК ГСС) и использует радиоинтерференционный метод определения положений источника радиосигнала на основе корреляционного анализа излучаемых им сигналов. Комплекс может состоять из двух и более станций приема цифрового спутникового телевидения. Измеряемым параметром при этом является разность наклонных дальностей от станций до контролируемого спутника. Отметим, что основные принципы построения РК были впервые изложены в работе [1].

В 2013 г. с использованием РК начаты регулярные наблюдения ТК ГСС в условиях “нену-

левой” базы. Одна станция приема спутникового телевидения располагалась в Николаеве на территории НИИ НАО, а вторая – в пригороде Одессы, Крыжановке, на территории НИИ “Астрономическая обсерватория Одесского национального университета” (НИИ АО ОНУ). Расстояние между станциями (база) составило примерно 100 км.

С апреля 2013 г. наблюдался ТК ГСС “Eutelsat-25C”, расположенный в орбитальной позиции 25.5° в. д. Наблюдения спутника прекратились 29.10.2013 г. в 00:09:00 UTC по причине прекращения его эксплуатации и замены на спутник “Eutelsat-25B”. В связи с отсутствием информации о параметрах вещания нового спутника на Европу было принято решение нацелить РК на другой спутник. С 5 декабря 2013 г. по 16 июля 2014 г. станции комплекса были настроены на прием сигнала спутника “Eutelsat-13B”, расположенного в орбитальной позиции 13° в. д.

© Ф. И. Бушуев, Н. А. Калюжный, Е. С. Сибирякова,  
А. В. Шульга, Ю. М. Горбанёв, 2015

## 2. Метод определения разности наклонных дальностей

Каждая станция РК производит синхронизированную по GPS запись на жесткие диски персональных компьютеров временных выборок комплексного сигнала цифрового спутникового телевидения (Digital Television-Satellite (DTV-S)) [1]. Эти выборки поступают в пункт обработки для определения разности наклонных дальностей от станций до геостационарного спутника. Пусть  $A_i$  и  $\psi_i$  – выборочные значения амплитуды и фазы комплексного сигнала в дискретный момент времени  $t_i$ , а  $i$  – его порядковый номер. В пункте обработки сначала вычисляются значения действительной функции от исходных комплексных сигналов  $f(t_i) = A_i \sin(\psi_i - \psi_{i-1})$ , а затем вычисляется свертка временных реализаций  $f(t_i)$ , полученных для пар приемников, и определяются их корреляционные функции.

Применение преобразования  $f(t_i)$  обусловлено необходимостью учета структуры сигнала цифрового спутникового телевидения и увеличения тем самым отношения сигнал/шум на выходе коррелятора. В настоящее время в спутниковом телевидении применяются два стандарта передачи информации: DVB-S (Digital Video Broadcast-Satellite) или DVB-S2 [2, 3]. В обоих случаях фаза сигнала на выходе квадратурного детектора приемника должна совпадать с фазой излученного сигнала, так как от ее абсолютного значения зависит значение принятого символа. Для автоподстройки фазы выходного сигнала в приемниках DTV-S применяется так называемая синхронизация символов. В нашем случае оцифровка аналогового комплексного сигнала DVB-S(S2) производится вне петли автоподстройки фазы. Это приводит к тому, что значения  $\psi_i$  содержат дополнительный фазовый сдвиг, который обусловлен прежде всего индивидуальными фазовыми характеристиками приемника. Однако, учитывая вид модуляции сигнала DVB-S(S2), можно ожидать, что разность двух соседних отсчетов фазы ( $\psi_i - \psi_{i-1}$ ), вычисленная для одного и того же фрагмента передаваемого сигнала, будет одинаковой или близкой для пар приемников. Соответственно, будут одинаковыми или близкими значения функции  $f(t_i)$ . Применение преобразования  $f(t_i)$  позволило получить на частоте дискретизации Найквиста свертку сиг-

налов с отношением сигнал/шум на выходе коррелятора порядка  $5 \div 10$ , притом что исходные квадратурные сигналы не сворачиваются.

При вычислении корреляционной функции выборка, полученная одним из приемников, используется полностью (первая выборка), а выборка, полученная вторым приемником, – частично. Используется только ее средняя часть заданной длины, смещенная на время  $\tau_2 \geq 0$  от ее начала. Длина второй выборки определяет объем выборки коррелятора. Пусть  $\tau_1$  – время, отсчитываемое от начала первой выборки, а  $\tau_x$  – значение  $\tau_1$ , соответствующее временному сдвигу максимума корреляционной функции. Тогда, учитывая синхронность записи выборок двумя приемниками, разность расстояний  $\Delta r$  до телекоммуникационного геостационарного спутника будет пропорциональна разности  $\tau_x - \tau_2$ :  $\Delta r = c(\tau_x - \tau_2)$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. Для уточнения положения максимума  $\tau_1$  и, соответственно, для увеличения точности определения  $\Delta r$  используется интерполяция исходного сигнала (идеальная реконструкция сигнала) [4] и метод, основанный на применении преобразования Гильберта корреляционной функции [5].

Пусть  $n$  – безразмерное смещение сигнала от начала выборки, выраженное в отсчетах частоты дискретизации ADC (Analog-to-Digital Converter). Для максимума корреляционной функции значение  $n$  благодаря применению преобразования Гильберта является в общем случае не целым, тогда как для начала второй выборки  $n$  всегда целое число. Пусть  $f_n$  – номинальное значение частоты дискретизации ADC, определяемое по известным значениям длительности регистрируемого сигнала  $T_s$  и соответствующего объема выборки  $N_s$ :

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

Тогда задержка сигнала относительно начала секунды может быть определена из соотношения

$$\tau = \frac{n}{f_v} + \tau_{PPS},$$

$$f_v = k_{sr} f_n,$$

где  $f_v$  – действующее значение частоты дискретизации ADC,  $k_{sr}$  – коэффициент пропорцио-

нальности между  $f_v$  и  $f_n$ , а  $\tau_{PPS}$  – задержка переднего фронта секундного синхроимпульса (Pulse-Per-Second или PPS) относительно начала секунды.

Секундные синхроимпульсы (сигналы PPS) формируются GPS-приемниками и используются для синхронизации записи всеми станциями РК сигнала DTV-S, излучаемого контролируемым спутником. Обычно по умолчанию передний фронт синхроимпульса имеет нулевое смещение относительно начала секунды ( $\tau_{PPS} = 0$ ). В РК, однако, используются GPS-приемники, у которых имеется возможность задавать требуемое значение  $\tau_{PPS}$ . Отметим, что в рассматриваемом РК в качестве ADC используются USB-осциллографы, для которых величина  $N_s$  является константой. В условиях, когда  $N_s$  является константой, возможность задавать для каждой станции свое значение  $\tau_{PPS}$  позволяет устанавливать требуемую частоту дискретизации ADC независимо от расстояния между станциями. Пусть  $N_c$  – объем выборки коррелятора. Тогда ширину интервала анализируемых задержек можно найти из выражения

$$\Delta\tau_w = \frac{(N_s - N_c)}{f_n} = \left(1 - \frac{N_c}{N_s}\right) T_s.$$

В работе [1] было показано, что минимальное значение отношения  $N_c/N_s$  составляет порядка 0.1, а максимальное значение  $T_s = 400$  мкс, т. е.  $\Delta\tau_w = 0.9T_s \leq 400$  мкс или  $\Delta\tau_w c \leq 120$  км. Ограничение ширины интервала анализируемых задержек приводит к ограничению на длины базовых линий интерферометра, значения которых в этом случае не могут превышать 120 км. Это в свою очередь существенно ограничивает точность определения координат спутника. Данное ограничение можно снять, если представить значение относительной задержки  $\Delta\tau_x = (\tau_x - \tau_2)$  в виде суммы двух слагаемых:

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

где одно из слагаемых, средняя задержка  $\overline{\Delta\tau_x}$ , может быть существенно больше второго,  $\hat{\tau}$ , равного отклонению задержки от среднего значения (вариации задержки). Для избранной пары станций  $\overline{\Delta\tau_x}$  может быть порядка нескольких миллисекунд. Значение  $\overline{\Delta\tau_x}$  зависит от длины базовой

линии, соединяющей станции, а также 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, что существенно меньше минимального значения  $T_s$ , равного 100 мкс [1]. Следовательно, при наличии нескольких пар станций для одной (избранной) станции можно задать  $\tau_{PPS} = 0$ , а для остальных станций установить  $\tau_{PPS}$  равным значению  $\overline{\Delta\tau_x}$ , полученному для пары, состоящей из данной и избранной станций. Для оценки  $\overline{\Delta\tau_x}$  можно воспользоваться численным моделированием с использованием параметров орбиты ТК ГСС, представленных на сайте [www.space-track.org](http://www.space-track.org).

Теперь, учитывая изложенное выше, можно записать следующее расчетное соотношение для величины  $\Delta r$ :

$$\Delta r = c\Delta\tau_x = c \left[ \left( \frac{n_x}{k_{sr}f_n} + \tau_{1PPS} \right) - \left( \frac{n_2}{k_{sr}f_n} + \tau_{2PPS} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\tau_{1PPS}$  – задержка сигнала PPS первого приемника DTV-S, а  $\tau_{2PPS}$  – задержка сигнала PPS второго приемника.

### 3. Калибровка РК

Измерения разности наклонных дальностей могут содержать как случайные, так и систематические погрешности. Некоторые систематические погрешности являются постоянными и подлежат предварительному определению (калибровке) и последующему учету в процессе измерений. Прежде всего это постоянные аппаратные задержки, обусловленные неидентичностью электрических длин приемных трактов.

Схема эксперимента по калибровке РК показана на рис. 1. На рисунке используются сле-

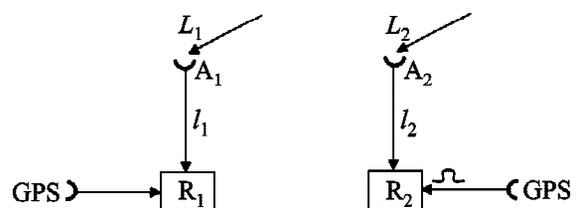


Рис. 1. Схема эксперимента по калибровке РК

дующие обозначения: индексы 1 и 2 соответствуют первой и второй станциям приема цифрового спутникового телевидения;  $A_1$  и  $A_2$  – антенны спутникового телевидения;  $l_1$  и  $l_2$  – электрические длины кабелей, соединяющих антенны с приемниками DTV-S, которые входят в состав устройств приема и регистрации сигналов DVB-S(S2), обозначенных на схеме как  $R_1$  и  $R_2$ ;  $L_1$  и  $L_2$  – наклонные дальности от ТК ГСС до фазовых центров антенн  $A_1$  и  $A_2$ .

При определении корреляционной функции в качестве первой берется выборка, записанная устройством  $R_1$ . Соответственно, второй будет выборка, полученная с помощью  $R_2$ . Обозначим символом  $\delta$  задержку сигнала, определенную по корреляционной функции и выраженную в единицах длины:  $\delta = c(\tau_x - \tau_2)$ , где  $\tau_x = \frac{n_x}{k_{sr}f_n}$ , а  $\tau_2 = \frac{n_2}{k_{sr}f_n}$ . Тогда, учитывая схему, представленную на рис. 1, а также полагая  $\tau_{1PPS} = 0$  и  $\tau_{2PPS} = 0$ , можно записать:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= (L_1 + l_1) - (L_2 + l_2) - (t_1 - t_2)c + \varepsilon = \\ &= \Delta r + \Delta l - bc + \varepsilon = \Delta r + \Delta \tau_a c + \varepsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta r = L_1 - L_2$  – разность наклонных дальностей до ТК ГСС;  $\Delta l = l_1 - l_2$  – разность электрических длин соединительных кабелей;  $t_1$  и  $t_2$  – моменты времени, соответствующие началу записи первой и второй выборок;  $\Delta \tau_a$  – суммарная аппаратурная задержка;  $\varepsilon$  – случайный шум с нулевым математическим ожиданием. Параметр  $b = (t_1 - t_2)$  характеризует наличие постоянной аппаратурной задержки, не связанной с различием электрических длин кабелей, соединяющих антенны с приемниками DTV-S. Например, ненулевое значение  $b$  может быть вызвано наличием регулярного относительного смещения секундных синхроимпульсов, формируемых GPS-приемниками. Причиной неравенства  $t_1$  и  $t_2$  может быть также отличие форм передних фронтов этих синхроимпульсов, подаваемых на внешний запуск схем синхронизации устройств регистрации сигналов DTV-S, и различие порогов срабатывания схем синхронизации от запускающих импульсов.

Целью калибровки является определение аппаратурной задержки  $\Delta \tau_a$ ,

$$\Delta \tau_a = (\Delta l - bc)/c.$$

Кроме  $\Delta \tau_a$ , уравнение (2) содержит также вторую неизвестную  $\Delta r$ , в общем случае зависящую от времени, и случайный шум  $\varepsilon$ . Вариациями разности наклонных дальностей  $\Delta r$  можно пренебречь, так как предполагается, что во время калибровки антенны  $A_1$  и  $A_2$  расположены на небольшом расстоянии друг от друга, порядка  $10 \div 20$  м. В этом случае уравнение (2) содержит две неизвестные величины, которые не зависят от времени. Для их оценки можно использовать усредненное по времени значение  $\delta_1$ , которое обозначается как  $\bar{\delta}_1$ , исключая таким образом влияние шума  $\varepsilon$ . Получим недостающее уравнение для схемы измерений, в которой к устройству  $R_1$  подключается антенна  $A_2$ , а к  $R_2$  – антенна  $A_1$ :

$$\begin{aligned} \delta_2 &= (L_2 + l_1) - (L_1 + l_2) - (t_1 - t_2)c + \varepsilon = \\ &= -\Delta r + \Delta l - bc + \varepsilon = -\Delta r + \Delta \tau_c + \varepsilon. \end{aligned} \quad (3)$$

В процессе эксплуатации может возникнуть необходимость повторной калибровки РК, например, в связи с заменой GPS-приемника, антенны GPS, антенны спутникового телевидения или соединительных кабелей. В этом случае для пересчета значений  $\Delta \tau_a$  для удаленных станций необходимо знать также параметры  $\Delta l$  и  $b$ . Для определения всех трех параметров  $\Delta r$ ,  $\Delta l$ , и  $b$  надо добавить третье уравнение, полученное, например, для схемы измерений, в которой соединительные кабели  $l_1$  и  $l_2$  меняются местами:

$$\begin{aligned} \delta_3 &= (L_1 + l_2) - (L_2 + l_1) - (t_1 - t_2)c + \varepsilon = \\ &= \Delta r - \Delta l - bc + \varepsilon. \end{aligned} \quad (4)$$

Произведя усреднения уравнений (2), (3) и (4), получим три линейных уравнения относительно трех неизвестных, решив которые, находим:

$$\begin{aligned} b &= -\frac{\bar{\delta}_2 + \bar{\delta}_3}{2c}, \\ \Delta l &= \frac{\bar{\delta}_1 + \bar{\delta}_2}{2} + bc, \\ \Delta r &= \frac{\bar{\delta}_1 + \bar{\delta}_3}{2} + bc. \end{aligned}$$

Следовательно, перед тем как станции РК должны быть удалены в места постоянной дислокации, необходимо провести калибровку каждой станции. Поскольку измеряться должны

относительные задержки, удобно производить калибровку всех станций относительно одной избранной. Пусть  $I$  – количество станций РК,  $\Delta r_{ai}$  – аппаратурная задержка  $i$ -й станции ( $i=1, \dots, I-1$ ) относительно нулевой станции ( $i=0$ ), а  $\delta_{li}$  – относительная задержка сигнала, принятого  $i$ -й станцией и вычисленная по корреляционной функции. Пренебрегая случайным шумом  $\varepsilon$ , значения разности наклонных дальностей, которые не содержат аппаратурной задержки, можно получить из выражения (2):

$$\Delta r_i = \delta_{li} - \Delta \tau_{ai} c,$$

или, с учетом выражения (1),

$$\Delta r_i = c \left[ \left( \frac{n_{ix}}{k_{sr} f_n} + \tau_{iPPS} \right) - \left( \frac{n_0}{k_{sr} f_n} + \tau_{0PPS} \right) - \Delta \tau_{ai} \right]. \quad (5)$$

## 4. Результаты регулярных наблюдений ТК ГСС

### 4.1. Наблюдения спутника “Eutelsat-25C”

Во время наблюдений спутника “Eutelsat-25C” регистрировался сигнал транспондера со следующими параметрами:

- несущая частота 11585 МГц,
- поляризация вертикальная,
- символьная частота 27500 кГц,
- вид модуляции DVB-S.

Частота дискретизации была равной 25.6 МГц, а темп записи выборок – 1 с. Синхронизация комплекса осуществлялась с помощью GPS-приемников Resolution-T. Задержка сигналов PPS относительно начала секунды была нулевой для обеих станций в течение всего периода наблюдений.

На рис. 2 приводится график изменения средней разности наклонных дальностей ( $\overline{\Delta r}$ ) от станций РК до ТК ГСС “Eutelsat-25C”, полученный для 40-суточного интервала наблюдений спутника в сентябре – октябре 2013 г. Для оценки относительной задержки сигналов DVB-S по корреляционной функции и последующего определения  $\overline{\Delta r}$  в качестве первой бралась выборка, зарегистрированная в Николаеве. Объем выборки коррелятора, равный объему второй выборки, зарегистрированной в Одессе, составил 4768 отсчетов. Интервал усреднения  $\Delta r$  для оценки

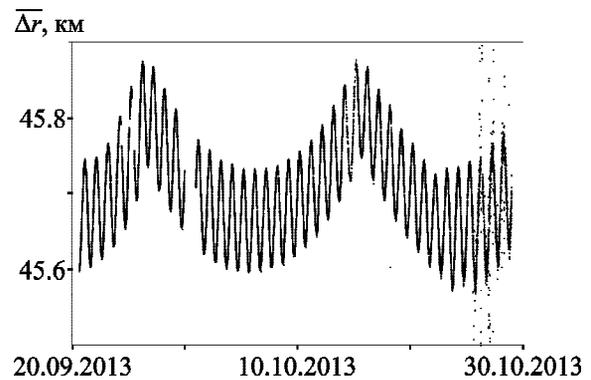


Рис. 2. Вариации разности наклонных дальностей  $\overline{\Delta r}$ , полученные по данным наблюдения ТК ГСС “Eutelsat-25C” двумя станциями РК, расположенными в Николаеве и Одессе. По оси абсцисс отложено время UTC

$\overline{\Delta r}$  составлял 60 с. Если на 60-секундном интервале времени объем выборки был меньшим 10 отсчетов или среднеквадратичное отклонение (СКО или  $\sigma$ ) величины  $\overline{\Delta r}$  было больше порогового ( $\sigma > \sigma_x$ ), то оценка  $\overline{\Delta r}$  не проводилась. Для определения  $\sigma_x$  было построено интегральное распределение СКО разности наклонных дальностей  $P(\sigma < x)$ .

Была получена медианная оценка  $\sigma$ , равная 7.2 м, которая совпала с наиболее вероятным значением СКО и была взята в качестве оценки случайной ошибки единичного измерения  $\Delta r$ . Примерно в 10 % случаев наблюдались значения СКО, более чем в 1.3 раза превышающие медиану. Значение СКО, соответствующее вероятности  $P(\sigma \leq \sigma_x) = 0.9$ , было взято в качестве порогового ( $\sigma_x = 9.3$  м) при отбраковке грубых ошибок определения  $\Delta r$ .

Часть временной реализации  $\overline{\Delta r}$  с 20.09.2013 г. по 22.10.2013 г. была подвергнута спектральной обработке с помощью дискретного преобразования Фурье. Измерения, полученные после 22.10.2013 г., были отброшены по причине увеличившихся флуктуаций  $\overline{\Delta r}$ , по-видимому, связанных с подготовкой спутника к выводу из эксплуатации. Результаты спектральной обработки представлены на рис. 3. Из данных, приведенных на рисунке, следует, что в спектре  $\overline{\Delta r}$  присутствуют две основные составляющие с периодами, равными 23.9 ч и 15.9 сут (382 ч). С учетом точности вычислений меньший период (23.9 ч) соответствует звездным суткам. Возможной

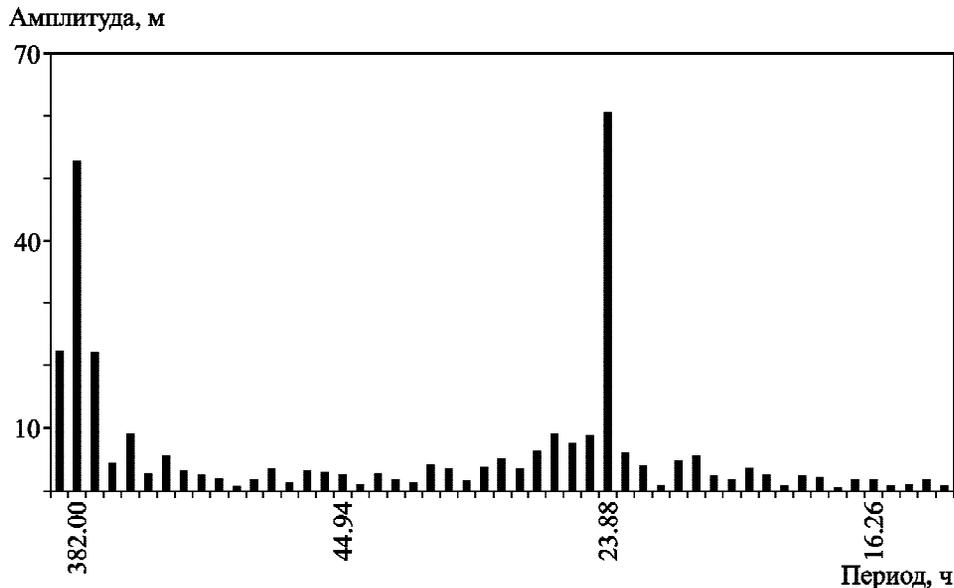


Рис. 3. Спектр разности наклонных дальностей  $\overline{\Delta r}$ , полученный по данным измерений с 20.09.2013 г. по 22.10.2013 г.

причиной появления спектральной составляющей с периодом, равным 15.9 сут, может быть влияние Луны и Солнца на движение спутника, искаженное коррекцией орбиты спутника.

#### 4.2. Наблюдения спутника “Eutelsat-13B”

Во время наблюдений спутника “Eutelsat-13B” регистрировался сигнал транспондера со следующими параметрами:

- несущая частота 11541 МГц,
- поляризация вертикальная,
- символьная частота 22000 кГц,
- вид модуляции DVB-S.

Синхронизация комплекса осуществлялась с помощью GPS-приемников Resolution-T. До 16:00:34 UTC 22.06.2014 г. частота дискретизации была равной 25.6 МГц, а задержка сигналов PPS относительно начала секунды была нулевой для обеих станций. Начиная с указанного времени и до окончания наблюдений 16.07.2014 г. частота дискретизации была равной 51.2 МГц, т. е. длительность выборки  $T_s$  была уменьшена с 400 до 200 мкс, а задержка сигнала PPS в Одессе была изменена с нулевой на  $-210$  мкс.

На рис. 4 приводятся изменения разности наклонных дальностей  $\overline{\Delta r}$  от станций РК до ТК ГСС “Eutelsat-13B”, полученные для 224-суточного интервала наблюдений спутника в период времени с 05.12.2013 г. по 16.07.2014 г.

На рис. 5 по оси ординат отложены значения относительной задержки  $\Delta\tau_x$ , полученные в интервале времени с 12:00:00 до 20:00:00 UTC 22.06.2014 г. по данным наблюдений ТК ГСС “Eutelsat-13B” двумя станциями РК, расположенными в Николаеве и Одессе. Кривая 1 соответствует  $\Delta\tau_x$ , вычисленной по формуле (5), в которой коэффициент  $k_{sr}$  был равен единице, а кривая 2 – соответствует  $k_{sr} = 0.97655$ . Таким образом, кривая 1 получена для номинального значения частоты дискретизации  $f_n$ , а кривая 2 – для действующего  $f_v$ .

Из данных, представленных на рис. 5, следует, что использование  $f_n$  для расчетов  $\Delta\tau_x$  (кривая 1) в момент изменения параметров регистрации приводит к скачку задержки примерно на 5 мкс, тогда как кривая 2, полученная с применением  $f_v$ , является гладкой кривой на всем интервале анализа. Отметим, что полученный скачок задержки на порядок больше вариаций задержки  $\hat{t}$  за весь период наблюдений. Согласно рис. 5 значение  $\hat{t}$  равно примерно  $\pm 150$  м, или  $\pm 0.5$  мкс.

Значение коэффициента  $k_{sr}$  было определено в результате измерений задержки сигнала PPS, проведенных с помощью цифрового USB-осциллографа и двух GPS приемников. При этом на вход первого канала осциллографа подавался сигнал PPS без задержки одного из GPS приемников (первый сигнал PPS). Сигнал PPS второго GPS приемника с задержкой на заданную вели-

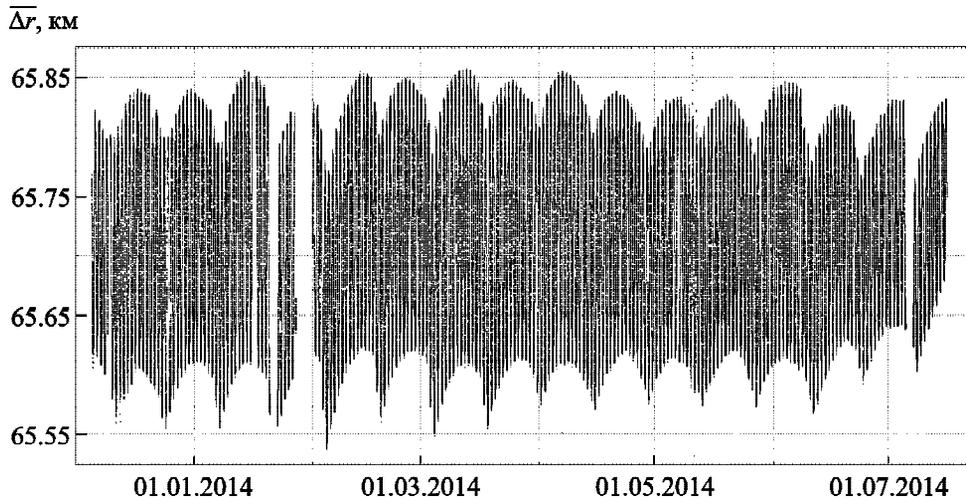


Рис. 4. Вариации разности наклонных дальностей  $\overline{\Delta r}$ , полученные по данным наблюдения ТК ГСС “Eutelsat-13B” двумя станциями РК, расположенными в Николаеве и Одессе. По оси абсцисс отложено время UTC

чину  $\tau_{2PPS}$  ( $\tau_{2PPS} \neq 0$ ) одновременно подавался на внешний запуск и на вход второго канала осциллографа (второй сигнал PPS). Задержка первого сигнала PPS относительно второго находилась корреляционным методом. Учитывая схему измерений, искомое значение коэффициента  $k_{sr}$  вычислялось по следующей формуле:

$$k_{sr} = \left( \frac{n_x - n_2}{f_n} \right) \left( \frac{1}{\tau_{1PPS} - \tau_{2PPS}} \right),$$

где  $\tau_{1PPS} = 0$ . В результате измерений была получена выборка, состоящая из 747 значений  $k_{sr}$ . СКО  $k_{sr}$  по этой выборке было равно 0.00013, а среднее значение и медиана совпали и составили 0.97655.

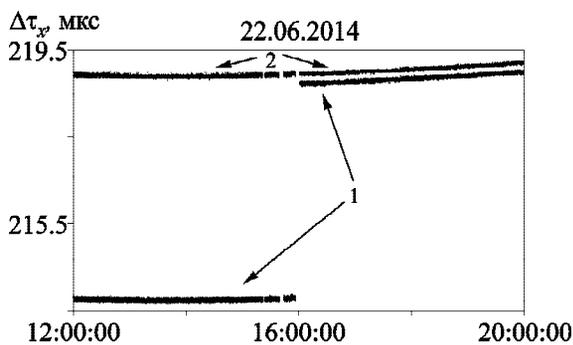


Рис. 5. Изменения задержки  $\Delta\tau_{sr}$  в интервале времени с 12:00:00 до 20:00:00 UTC 22.06.2014. Кривая 1 соответствует  $k_{sr} = 1$ , а кривая 2 соответствует  $k_{sr} = 0.97655$

## 5. Результаты сравнения измеренных и расчетных вариаций дальности до ТК ГСС

На рис. 6 приводятся результаты сравнения измеренных и расчетных значений разности наклонных дальностей до ТК ГСС “Eutelsat-13B”. Измерения проводились двумя станциями, расположенными в Николаеве и Одессе.

Представленные на этом рисунке данные получены в интервале времени с 05.12.2013 г. по 09.12.2013 г. Измеренные ежесекундно значения разности наклонных дальностей  $\Delta r_{Obs}$  (средняя панель) определялись с использованием действующей частоты дискретизации цифрового USB-осциллографа DSO5200A. Соответствующие расчетные значения  $\Delta r_{Calc}$  (нижняя панель) были получены по эфемеридам, представленным на сайте [www.space-track.org](http://www.space-track.org). Разности измеренных и расчетных значений  $\Delta r$  соответствует график на верхней панели рисунка.

Из данных, приведенных на рис. 6, следует, что систематическая составляющая  $\Delta r_{Obs} - \Delta r_{Calc}$  изменяется в пределах  $\pm 20$  м, тогда как случайная составляющая находится в диапазоне порядка 10 м.

Выборочная проверка для других моментов времени и для другого спутника, “Eutelsat-25C”, показывает, что регулярная составляющая разности  $\Delta r_{Obs} - \Delta r_{Calc}$  не выходит за пределы интервала  $\pm 40$  м, а случайная составляющая остается на уровне 10 м.

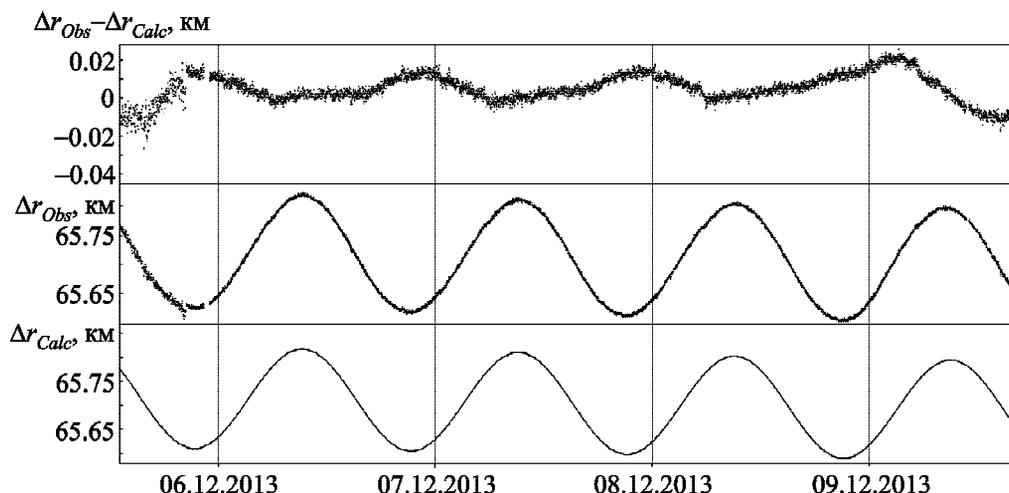


Рис. 6. Сравнение измеренных  $\Delta r_{Obs}$  и расчетных  $\Delta r_{Calc}$  значений разности наклонных дальностей. По оси абсцисс отложено время UTC

## 6. Выводы

1. Разработан и внедрен метод определения разности расстояний до ТК ГСС по временным выборкам комплексного сигнала цифрового спутникового телевидения, регистрируемым с помощью РК, разработанного в НИИ НАО и предназначенного для контроля положения ТК ГСС.

2. Проведены регулярные наблюдения ТК ГСС “Eutelsat-25C” и “Eutelsat-13B”. По данным наблюдений ТК ГСС “Eutelsat-25C” осуществлен спектральный анализ и выявлены две основные составляющие с периодами, равными 23.9 ч и 15.9 сут. С учетом точности вычислений период 23.9 ч соответствует звездным суткам. Возможной причиной появления спектральной составляющей с периодом 15.9 сут может быть влияние Луны и Солнца на движение спутника, искаженное коррекцией его орбиты.

3. По данным наблюдений из двух пунктов проведено сравнение измеренных вариаций дальности до ТК ГСС “Eutelsat-25C” и “Eutelsat-13B” с эфемеридами, представленными на сайте [www.space-track.org](http://www.space-track.org). Систематическая составляющая разности измеренных и расчетных значений  $\Delta r$  изменяется в пределах  $\pm 40$  м, случайная составляющая находится в диапазоне порядка 10 м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев Ф. И., Калюжный Н. А., Сливинский А. П., Шульга А. В. Определение дальности до телекоммуникационных геостационарных спутников с использо-

ванием сигналов спутникового телевидения // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 282–290.

2. 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). – Sophia Antipolis: ETSI, 1997. – 24 p.
3. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). European Standard (Telecommunications series). ETSI EN 302 307 V1.2.1 (2009-08). – Sophia Antipolis: ETSI, 2009. – 78 p.
4. Reconstruction of Signal by Interpolation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://fourier.eng.hmc.edu/e101/lectures/Sampling\\_theorem/node3.html](http://fourier.eng.hmc.edu/e101/lectures/Sampling_theorem/node3.html)
5. Cabot R.. A note on the application of the Hilbert transform to time delay estimation // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing. – 1981. – Vol. 29, Is. 3. – P. 607–609. DOI: 10.1109/TASSP.1981.1163564

## REFERENCES

1. BUSHUEV, F. I., KALIUZHNYI, N. A., SLIVINSKY, A. P. and SHULGA, A. V., 2012. Determination of the Range to Geostationary Telecommunications Geostationary Satellites Using the Signals of Satellite Television. *Radiofizika i Radioastronomia*, vol. 17, no. 3, pp. 281–290 (in Russian).
2. EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE., 1997. *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)*. Sophia Antipolis: ETSI.
3. EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE., 2009. *Digital Video Broadcasting (DVB);*

*Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2). European Standard (Telecommunications series). ETSI EN 302 307 V1.2.1 (2009-08).* Sophia Antipolis: ETSI.

4. *Reconstruction of signal by interpolation* [online]. Available from: [http://fourier.eng.hmc.edu/e101/lectures/Sampling\\_theorem/node3.html](http://fourier.eng.hmc.edu/e101/lectures/Sampling_theorem/node3.html)
5. CABOT R., 1981. A note on the application of the Hilbert transform to time delay estimation. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing*, vol. 29, no. 3, pp. 607–609. DOI: 10.1109/TASSP.1981.1163564

*F. I. Bushuev<sup>1</sup>, M. P. Kaliuzhnyi<sup>1</sup>, Ye. S. Sybiryakova<sup>1</sup>, O. V. Shulga<sup>1</sup>, and Yu. M. Gorbanev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>“Nikolaev Astronomical Observatory” Research Institute, 1, Observatorna St., Mykolaiv, 54030, Ukraine

<sup>2</sup>“Odessa Astronomical Observatory” Research Institute, 1v, Marazlievskaya St., Odessa, 65014, Ukraine

#### METHOD AND FIRST RESULTS OF CALCULATION OF SLANT-RANGE DIFFERENCES TO ACTIVE GEOSTATIONARY TELECOMMUNICATION SATELLITE

A method for calculation of slant-range differences to the active geostationary telecommunication satellite (GEO Telecom Satellite) is described in the article. The method is developed in the “Mykolaiv Astronomical Observatory” Research Institute. The results of observation of the “Eutelsat-25C” and “Eutelsat-13B” satellites with two receiving stations of digital satellite

TV are discussed. The accuracy of determination of slant-range differences to the GEO Telecom Satellite is presented.

*Key words:* radio interferometer, geostationary satellite, digital satellite television

*Ф. І. Бушувєв<sup>1</sup>, М. П. Калюжний<sup>1</sup>, Є. С. Сибірякова<sup>1</sup>, О. В. Шульга<sup>1</sup>, Ю. М. Горбаньов<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup>Науково-дослідницький інститут “Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету”, вул. Маразлівська, 1в, м. Одеса, 65014, Україна

#### МЕТОД ТА ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЕННЯ РІЗНИЦІ НАХИЛЕНИХ ДАЛЬНОСТЕЙ ДО ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ СУПУТНИКІВ

Описано розроблений в Науково-дослідницькому інституті “Миколаївська астрономічна обсерваторія” метод обчислення різниці нахилених дальностей до активних телекомунікаційних геостационарних супутників (ТК ГСС). Дискутуються результати спостережень ТК ГСС “Eutelsat-25C” та “Eutelsat-13B” двома станціями прийому цифрового супутникового телебачення. Наводиться оцінка точності визначення різниці нахилених дальностей до ТК ГСС.

*Ключові слова:* радіоінтерферометр, геостационарний супутник, цифрове супутникове телебачення

*Статья поступила в редакцию 29.05.2015*