

УДК 629.78

КАЛИБРОВКА РАДИОТРАКТА РАДИОТЕЛЕСКОПА RT-7,5 ПРИ МОНИТОРИНГЕ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.Б. Власов, В.П. Михайлицкий, В.С. Рыжов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: vlasov@bmsu.ru

Рассмотрен метод абсолютной калибровки измерительной системы радиотелескопа RT-7,5 в L-диапазоне для задачи оценки эквивалентной изотропно-излучаемой мощности навигационных спутниковых сигналов по радиоизлучению Солнца. Показана возможность использования данных сети солнечных радиотелескопов (RSTN) для определения спектральной плотности потока мощности радиоизлучения Солнца в L-диапазоне. Приведены результаты абсолютной калибровки радиотелескопа RT-7,5 в диапазоне ГЛОНАСС L1 (1602 МГц) и L2 (1246 МГц).

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГЛОНАСС), радиотелескоп RT-7,5, радиоизлучение Солнца, спектральная плотность потока мощности, абсолютная калибровка, эквивалентная изотропно-излучаемая мощность.

RADIO ROAD CALIBRATION OF RADIO TELESCOPE RT-7.5 DURING SIGNAL MONITORING OF NAVIGATIONAL SPACECRAFT

I.B. Vlasov, V.P. Mikhailitskiy, V.S. Ryzhov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: vlasov@bmsu.ru

The method of absolute calibration of radio telescope RT-7.5 measuring system within L-band is considered in order to estimate an equivalent isotropic radiating power of navigational satellite signal by solar radio-frequency emission. The opportunity of using data of The Radio Solar Telescope Network (RSTN) is presented to identify the spectral power flux density of solar radio-frequency emission within L-band. The absolute calibration results of radio telescope RT-7.5 within GLONASS L1-band (1602 MHz) and L2-band (1246 MHz) are given.

Keywords: Global Navigation Satellite System (GLONASS), radio telescope RT-7.5, solar radio-frequency emission, spectral power flux density, absolute calibration, equivalent isotropic radiating power.

В настоящее время наземный контроль сигналов глобальных навигационных спутниковых систем связи (ГЛОНАСС) является актуальной задачей. Применение для этой цели крупноапертурных зеркальных антенн с большим коэффициентом усиления значительно увеличивает отношение сигнал/шум на входе приемной системы, а также обеспечивает пространственную селекцию сигнала по сравнению со слабонаправленной антенной аппаратуры потребителя [1–3].

Одной из задач, решаемых наземными станциями контроля, использующими крупноапертурные зеркальные антенны, является оценка эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ)

спутниковых сигналов. Для решения такой задачи необходима абсолютная калибровка всей измерительной системы, т.е. определение параметров оценки ЭИИМ по регистрируемой мощности на выходе приемного устройства.

Общепринятым методом абсолютной калибровки в современных наземных станциях спутникового мониторинга является раздельное определение коэффициента усиления антенны G и коэффициента передачи приемного тракта, $K_{\text{прм}}$, а также контроль изменения этих параметров во времени [4].

Коэффициент усиления антенны G в этом методе определяется после измерения двух параметров — коэффициента шумовой добротности $\frac{G}{T_{\text{ш}}}$ и эквивалентной шумовой температуры на входе приемного устройства $T_{\text{ш}}$. Коэффициент $\frac{G}{T_{\text{ш}}}$ определяется по известной методике измерения шумовой добротности с использованием стандартных источников радиоизлучения, например Кассиопея А, Лебедь А и др. [5]. Эквивалентная шумовая температура на входе приемного устройства $T_{\text{ш}}$ определяется с помощью дополнительного эталонного генератора шума.

В свою очередь, контроль коэффициента передачи приемного тракта $K_{\text{прм}}$ осуществляется в режиме реального времени с использованием пилот-сигнала известной мощности, подаваемого на вход приемного тракта на частоте, близкой к частотам исследуемых сигналов.

Таким образом, по общепринятой методике калибровки одновременно определяются три параметра: коэффициент передачи приемного тракта $K_{\text{прм}}$, коэффициент шумовой добротности $\frac{G}{T_{\text{ш}}}$ и эквивалентная шумовая температура на входе приемного устройства $T_{\text{ш}}$.

Метод калибровки РТ-7,5. Для радиотелескопа РТ-7,5 в L-диапазоне (рис. 1 и 2), основные технические характеристики которого приведены далее, был применен более простой метод калибровки.

Основные технические характеристики РТ-7,5 в L-диапазоне

Диаметр зеркала	7,75 м
Тип монтировки	Полноповоротная азимутальная
Схема облучения	Из первичного фокуса
Принимаемая поляризация	Круговая правая
Диапазон частот	1100... 1700 МГц
Коэффициент усиления антенны	40 дБ (1602 МГц); 38 дБ (1246 МГц)
Ширина диаграммы направленности	1,8 град. (1602 МГц); 2,2 град. (1246 МГц)



Рис. 1. Восточная антенна радиотелескопа РТ-7,5

Суть метода заключается в прямом определении коэффициента передачи измерительной системы K при наблюдении источника с известным значением спектральной плотности потока мощности (СППМ):

$$K = GK_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ — мощность, создаваемая источником сигнала на выходе измерительной системы; $P_{\text{вх}}$ — мощность источника сигнала на входе измерительной системы. Это мощность, создаваемая источником сигнала на выходе изотропной антенны с согласованной поляризацией.

В качестве такого калибровочного источника для комплекса контроля спутниковых сигналов РТ-7,5 в L-диапазоне использовалось Солнце. Спектральная плотность потока мощности солнечного радиоизлучения в указанном диапазоне частот более чем на два порядка превышает спектральную плотность потока мощности стандартных радиоастрономических калибровочных источников, таких как Кассиопея А, Лебедь А и другие, и уже становится соизмеримой со спектральной плотностью потока мощности спутниковых навигационных сигналов, что делает возможным применение данного метода для задач оценки ЭИИМ спутниковых навигационных сигналов.

Спектральная плотность потока мощности солнечного радиоизлучения в указанном диапазоне частот более чем на два порядка превышает спектральную плотность потока мощности стандартных радиоастрономических калибровочных источников, таких как Кассиопея А, Лебедь А и другие, и уже становится соизмеримой со спектральной плотностью потока мощности спутниковых навигационных сигналов, что делает возможным применение данного метода для задач оценки ЭИИМ спутниковых навигационных сигналов.



Рис. 2. Структурная схема РТ-7,5 в L-диапазоне

Солнце как калибровочный источник в L-диапазоне. Спектральная плотность потока мощности радиоизлучения Солнца у поверхности Земли зависит от частоты, расстояния до Солнца и от текущего уровня солнечной активности.

Различают три компоненты радиоизлучения Солнца: постоянная (излучение спокойного Солнца), медленно изменяющаяся и спорадическая (всплески) [6].

Для определения текущего значения СППМ солнечного радиоизлучения использовались данные сети солнечных радиотелескопов (RSTN), принадлежащей Метеорологической службе ВВС США (AFWA). В сеть входят 4 станции, равномерно расположенные по долготе.

Измерения проводятся вблизи местного полдня (± 30 мин). Калибровка системы осуществляется 2 раза в сутки с использованием твердотельных генераторов шума. Заявленная относительная точность измерения СППМ $S_{ifд}$ одной станцией на каждой дискретной частоте $\varepsilon_{S_{ifд}} = 5\%$ (СКО) [7].

Ежедневные результаты измерений публикуются Центром прогноза космической погоды (SWPC) Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) [8]. Значения СППМ приведены в солнечных единицах потока — СЕП ($1 \text{ СЕП} = 10^{-22} \text{ Вт/м}^2 \times \text{Гц}$) и нормированы к 1 астрономической единице (а.е.).

Интервал измерения солнечного потока сетью RSTN примерно равен шести часам, что не позволяет отслеживать спорадическую компоненту радиоизлучения Солнца, однако медленно изменяющаяся компонента может быть достоверно определена (рис. 3).

Для снижения ошибки определения СППМ на одной из дискретных частот рассчитывалась средняя по четырем станциям СППМ $S_{fд}$. Таким образом, относительная погрешность определения потока радиоизлучения Солнца на каждой из дискретных частот RSTN:

$$\varepsilon_{S_{fд}} = \frac{\varepsilon_{S_{ifд}}}{\sqrt{4}} = 2,5\% \text{ (СКО)}. \quad (2)$$

Оценка значения солнечного потока S_f на произвольной частоте, лежащей в полосе частот $f = 1100 \dots 1700$ МГц, находилась посредством интерполяции значений СППМ на дискретных частотах (рис. 4).

Анализ спектра для разных периодов активности Солнца показывает, что в полосе частот $f = 1100 \dots 1700$ МГц спектр хорошо аппроксимируется прямой:

$$S_f = \frac{S_{fд1} - S_{fд0}}{f_{д1} - f_{д0}} (f - f_{д0}) + S_{fд0}, \quad (3)$$

где $S_{fд1}$ — СППМ радиоизлучения Солнца на дискретной частоте $f_{д1} = 2695$ МГц; $S_{fд0}$ — СППМ радиоизлучения Солнца на дискретной

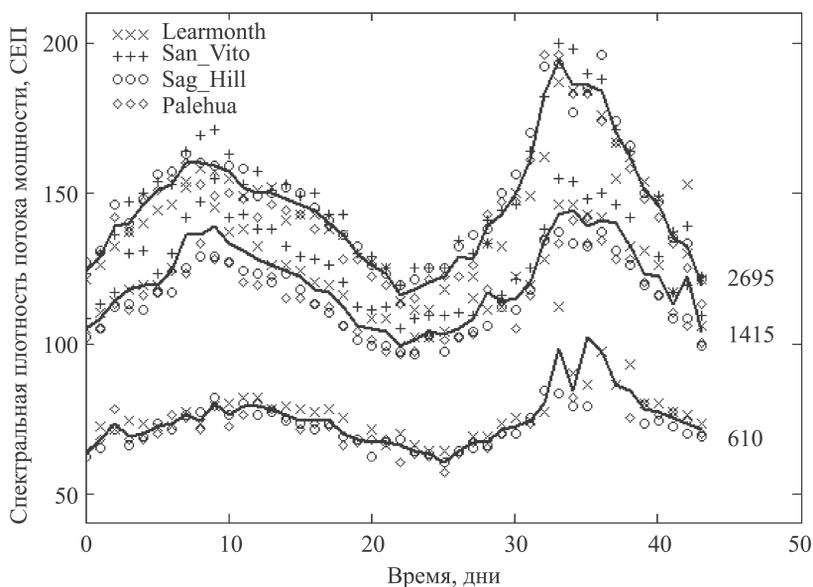


Рис. 3. СППМ радиоизлучения Солнца на частоте 610, 1415 и 2695 МГц по данным RSTN (03.12.2013 – 15.01.2014)

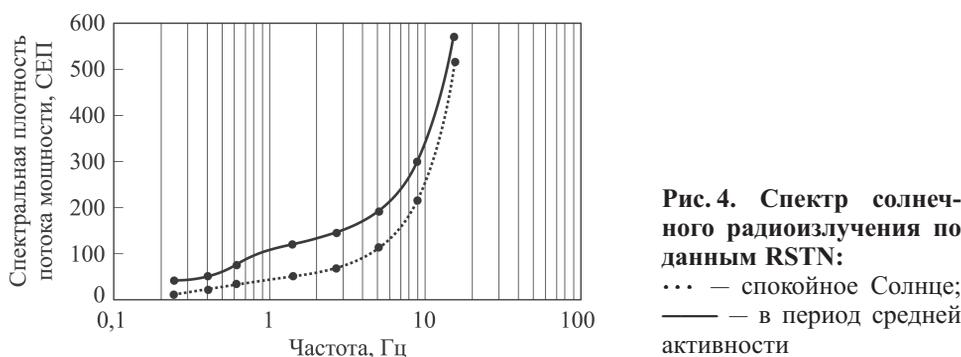


Рис. 4. Спектр солнечного радиоизлучения по данным RSTN:
 ... — спокойное Солнце;
 — в период средней активности

частоте $f_{д0} = 1415$ МГц. Оценка относительной погрешности определения СППМ на частоте $f = 1100 \dots 1700$ МГц составит

$$\varepsilon_{S_f} = \varepsilon_{S_{f_d}} = 2,5 \% \text{ (СКО)}. \quad (4)$$

Поправки к данным RSTN. При оценке спектральной плотности потока мощности, создаваемой радиоизлучением Солнца на входе измерительной системы $S_{вх}$ при наведении антенны на центр солнечного диска, необходимо учесть следующие факторы: текущее расстояние до Солнца, r (а.е.); потери из-за несогласованности поляризации, L ; поглощение в атмосфере, Y ; соизмеримость угловых размеров диаграммы направленности антенны и источника, g ; потери наведения, Q .

Публикуемые данные RSTN приведены к 1 а.е. Таким образом, при оценке $S_{вх}$ необходимо учитывать текущее расстояние до Солнца, r (а.е.).

При отсутствии спорадической компоненты радиоизлучение Солнца в L-диапазоне можно считать неполяризованным, следовательно, потери мощности на выходе антенны с круговой поляризацией составят $L = 1/2$.

В диапазоне частот более 500 МГц основное поглощение в атмосфере определяется тропосферой, точнее, газами тропосферы — кислородом и водяными парами, а также дождем и прочими гидрометеорами (рис. 5). Значение поглощения Y (дБ) при отсутствии дождя в диапазоне 1100...1700 МГц, на рабочих углах места $\beta \geq 10^\circ$ определяется следующим образом:

$$Y = \frac{Y_0}{\sin\beta}, \quad (5)$$

где $Y_0 = 0,03 \pm 0,005$ дБ (СКО) — поглощение в зените; β — угол места.

Оценка максимального значения поглощения (для угла места $\beta = 10^\circ$) составляет $Y_{\max} = 0,17 \pm 0,03$ дБ (СКО). Таким образом, максимальная относительная погрешность оценки поглощения в диапазоне частот 1100...1700 МГц при условии спокойной атмосферы составляет $\varepsilon_Y = 0,7\%$ (СКО).

Средний видимый диаметр Солнца равен 32 угл. мин, что не позволяет считать его точечным источником при наблюдении зеркальными антеннами с размерами апертуры свыше 5 м в L-диапазоне. В антенных измерениях для учета соизмеримости угловых размеров диаграммы направленности и источника вводят коэффициент потерь g [6]:

$$g = \frac{\int_{\Omega_{\text{и}}} T_{\text{я}}(\varphi, \theta) d\Omega}{\int_{\Omega_{\text{и}}} T_{\text{я}}(\varphi, \theta) F(\xi, \zeta) d\Omega}, \quad (6)$$

где $\Omega_{\text{и}}$ — телесный угол источника; $T_{\text{я}}(\varphi, \theta)$ — распределение радиояркости по источнику; $F(\xi, \zeta)$ — диаграмма направленности антенны.

Распределение радиояркости $T_{\text{я}}(\varphi, \theta)$ по солнечному диску в L-диапазоне существенным образом зависит от текущей активности Солнца, конфигурации магнитного поля, расположения активных областей. Поэтому точная оценка коэффициента g для антенн, ширина диаграммы направленности которых меньше видимого углового

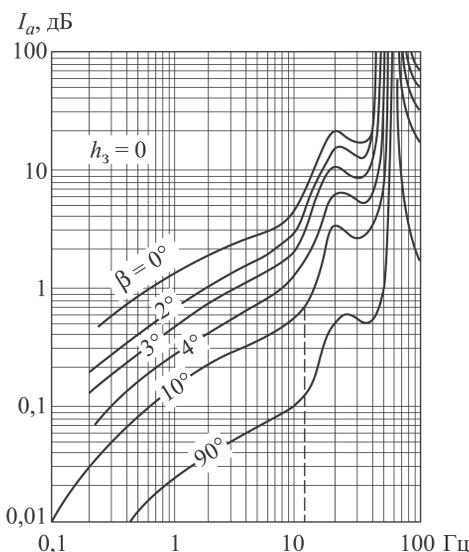


Рис. 5. Частотная зависимость поглощения радиоволн в спокойной атмосфере (без дождя) при различных углах места [9]

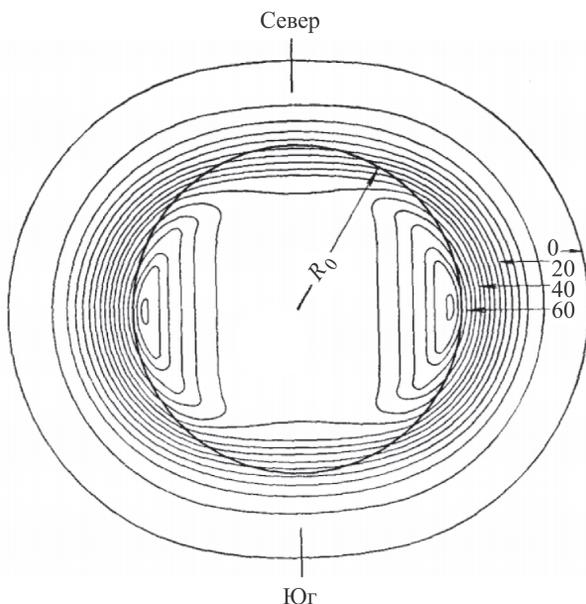


Рис. 6. Радиоизофоты спокойного Солнца на длине волны $\lambda = 21$ см в период минимума солнечной активности [10]

размера солнечного диска в L-диапазоне, т.е. для антенн с размерами апертуры более 20 м возможна только с привлечением данных о текущем распределении радиояркости, например, по результатам картографирования Солнца на соответствующих частотах антеннами с высоким угловым разрешением.

Для антенн с размерами апертуры 5...20 м расчет коэффициента g целесообразно проводить с использованием простых моделей распределения радиояркости. Для оценки значения коэффициента g и оценки погрешности его определения для антенны РТ-7,5 в диапазоне 1100...1700 МГц использовалось две модели распределения радиояркости: неравномерное распределение, соответствующее распределению по диску спокойного Солнца на длине волны 21 см (1420 МГц) (рис. 6) и равномерное распределение радиояркости по диску размером 32 угл. мин.

Интегрирование в (6) ведется по телесному углу источника, поэтому для антенн с шириной диаграммы направленности больше видимого углового размера Солнца достаточно знать только форму главного лепестка.

Главный лепесток диаграммы направленности антенны РТ-7,5 аппроксимировался гауссовой кривой:

$$F(\theta) = e^{-\frac{\theta^2}{\theta_0^2}}, \quad (7)$$

где $\theta_0 = 0,6\theta_{0,5}$ — параметр аппроксимации; $\theta_{0,5} = 1,9^\circ$ — ширина диаграммы направленности РТ-7,5 в середине L-диапазона.

Значение коэффициента g для неравномерного распределения составило $g_{н.р} = 1,045$, а для равномерного распределения $g_{р.р} = 1,025$. За оценку среднего значения было выбрано $g = g_{р.р} = 1,045$, соответствующее спокойному Солнцу. В силу малого отличия коэффициента от единицы оценка относительной погрешности определения коэффициента g была выполнена из предположения, что минимальное значение коэффициента g , соответствующее равномерному распределению, отстоит от среднего на 2 СКО:

$$\varepsilon_g = \frac{g_{н.р} - g_{р.р}}{2g_{н.р}} = 1\% \text{ (СКО)}. \quad (8)$$

Потери наведения Q определяются угловым отклонением оси главного лепестка диаграммы направленности антенны от истинного направления на источник сигнала, а также шириной и формой этого лепестка:

$$Q = \frac{F(0)}{F(\varphi_\Sigma)} = \frac{1}{F(\varphi_\Sigma)}, \quad (9)$$

где $\varphi_\Sigma = \sqrt{\varphi_A^2 + \varphi_\beta^2}$ — суммарная ошибка наведения в картинной плоскости; φ_A — ошибка наведения по азимуту; φ_β — ошибка наведения по углу места.

Для антенны РТ-7,5 основной вклад в общую ошибку наведения вносят ошибки, связанные с точностью установки опорно-поворотного устройства (монтажки) антенны. Особенностью этой составляющей ошибок является ее зависимость от углового положения антенны в полусфере. Для компенсации этих ошибок наведения, обычно используют методы юстировки осей с использованием источников радиоизлучения с точно известными координатами как естественного, так и искусственного происхождения. Для антенны РТ-7,5 применение подобных методов дает значение максимальной суммарной ошибки наведения $\varphi_{\Sigma_{\max}} = 5$ угл. мин.

Таким образом, максимальные потери наведения для антенны РТ-7,5 с диаграммой направленности (7) составят

$$Q_{\max} = \frac{1}{F(\varphi_{\Sigma_{\max}})} = 1,01. \quad (10)$$

В силу малого отличия потерь Q от единицы, оценку среднего значения потерь можно представить как среднее арифметическое минимальных ($Q = 1$) и максимальных потерь:

$$Q = \frac{1 + Q_{\max}}{2} = 1,005, \quad (11)$$

а относительную погрешность оценки среднего значения из предположения, что значение Q_{\max} отстоит от среднего значения Q на одно СКО следующим образом:

$$\varepsilon_Q = \frac{Q_{\max} - 1}{2Q} = 0,5\% \text{ (СКО)}. \quad (12)$$

С учетом всех перечисленных факторов спектральная плотность потока мощности, создаваемая радиоизлучением Солнца на входе измерительной системы $S_{\text{вх}}$, будет определяться как

$$S_{\text{вх}} = \frac{S_f}{2Ygr^2Q}. \quad (13)$$

Выражение для оценки коэффициента передачи измерительной системы K . Мощность, создаваемая источником на выходе изотропной антенны с согласованной поляризацией $P_{\text{вх}}$, связана с принимаемой плотностью потока мощности $s_{\text{вх}}$ следующим образом:

$$P_{\text{вх}} = \frac{\lambda^2 s_{\text{вх}}}{4\pi} = \frac{c^2 s_{\text{вх}}}{4\pi f^2}, \quad (14)$$

где λ — длина волны; f — частота; c — скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

Переходя к спектральной плотности потока мощности $S_{\text{вх}}$, можно записать

$$P_{\text{вх}} = \frac{c^2 \Delta f S_{\text{вх}}}{4\pi f^2}, \quad (15)$$

где Δf — ширина полосы частот, в которой измеряется мощность.

Таким образом, с учетом формул (1), (13) и (15), окончательное выражение для оценки коэффициента передачи измерительной системы имеет вид

$$K = \frac{8\pi f^2 P_{\text{вых}} Ygr^2 Q}{c^2 \Delta f S_f}. \quad (16)$$

Относительная погрешность определения мощности $P_{\text{вых}}$ на выходе измерительной системы в полосе частот Δf определялась как номинальная ошибка определения уровня мощности анализатором спектра и составила $\varepsilon_{P_{\text{вых}}} = 5\% (0,2 \text{ дБ})$ (СКО).

Суммарная относительная ошибка оценки коэффициента передачи измерительной системы РТ-7,5 в диапазоне частот 1100...1700 МГц, в предположении независимости составляющих его случайных величин составила $\varepsilon_K = 6\% (0,25 \text{ дБ})$ (СКО).

Проведение эксперимента. Эксперимент по определению коэффициента передачи измерительной системы $K = GK_{\text{прм}}$ радиотелескопа РТ-7,5 был проведен для двух частотных диапазонов ГЛОНАСС L1 (1602 МГц) и L2 (1246 МГц). Эксперимент проводился в период отсутствия спорадической компоненты солнечного радиоизлучения 21.08.2013–2.09.2013. Регистрировалась мощность солнечного радиоизлучения $P_{\text{вых}}$ в полосе частот $\Delta f = 10$ МГц для каждого диапазона отдельно, при углах места Солнца $20^\circ \dots 45^\circ$. Всего было

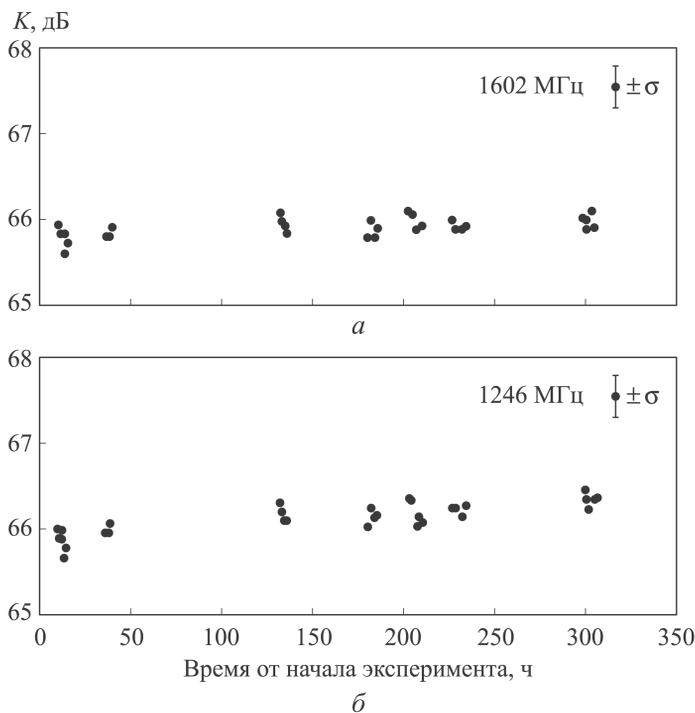


Рис. 7. Коэффициент передачи K измерительной системы РТ-7,5 в диапазонах L1 (а) и L2 (б) по результатам эксперимента (21.08.2013 – 2.09.2013)

получено 36 оценок значений коэффициента передачи измерительной системы K для каждого из двух диапазонов (рис. 7).

Анализ приведенных данных показал, что разброс оценок значений коэффициента передачи измерительной системы K для диапазонов L1 и L2 для каждого дня эксперимента лежит в пределах теоретически рассчитанной погрешности ε_K . Ввиду того, что в эксперименте использовалась антенна, предназначенная для работы в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, можно заключить, что коэффициент усиления G данной антенны оставался с высокой степенью точности постоянным. Таким образом, изменение коэффициента передачи приемного тракта $K_{\text{прм}}$ в течение одного дня эксперимента, по крайней мере, не превосходило значение теоретически рассчитанной погрешности $\varepsilon_K = 6\%$ (0,25 дБ) (СКО).

Заключение. Рассмотренный метод прямой калибровки радиотелескопа РТ-7,5 в диапазоне частот 1100...1700 МГц по солнечному радиоизлучению может быть успешно применен для антенн с размером апертуры до 20 м. Простота методики и отсутствие дополнительной калибровочной аппаратуры делает ее особенно актуальной при использовании неспециализированных систем, таких как радиотелескопы для задач высокоточных оценок ЭИИМ навигационных спутниковых сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Научно-технические сериш*. Сер. “Радиосвязь и радионавигация”. Вып. 3. Радионавигационные технологии: Коллективная монография / под ред. А.И. Перова, И.Б. Власова. М.: Радиотехника, 2013. 162 с.
2. *Радиотелескоп RT-7,5 МГТУ* вчера, сегодня, завтра / А.А. Парщикова, В.П. Михайлицкий., Г.Н. Соловьев и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. вып. “Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия”. 2009. С. 176–186.
3. *Власов И.Б., Михайлицкий В.П., Гаврилов А.И., Рыжов В.С.* Результаты наблюдения сигналов спутниковых систем с помощью антенны радиотелескопа RT-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. Спец. вып. “Радиооптические технологии в приборостроении”. 2012. № 7. С. 182–190.
4. *Tholert S., Erker S., Meurer M.* GNSS Signal Verification with a High Gain Antenna – Calibration Strategies and High Quality Signal Assessment, ION 2009, International Technical Meeting, January 26–28, 2009. Anaheim, CA.
5. *Фролов О.П., Вальд В.П.* Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Горячая линия–Телеком, 2008. 496 с.
6. *Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е.* Радиоастрономические методы измерения параметров антенн. М.: Сов. радио, 1965.
7. *Kennewell J.A., Cornelius D.W.* Learmonth Solar Observatory. The Australian Physicist. 1983. Vol. 20. P. 276–280.
8. <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/lists/radio.html>
9. *Спутниковая связь и вещание: Справочник* / под ред. Л.Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.
10. *Железняков В.В.* Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964. 560 с.

REFERENCES

- [1] Perov A.I., Vlasov I.B., eds. Seriya “Radiosvyaz’ i radionavigatsiya”. Vyp. 3. “Radionavigatsionnye tekhnologii” [Ser. “Radio communication and radio navigation”. Iss. 3 “Radionavigation technology”]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 162 p.
- [2] Parshchikov A.A., Mikhaylitskiy V.P., Solov’ev G.N., Zharkova N.A., Ivanov V.N., Lebedyuk T.S., Borisov A.A. Radio Telescope RT-7.5 of BMSTU yesterday, today, and tomorrow. *Vestn. Mosk. Gos. Tech. Univ. im. N.E. Baumana. Priborostr., Specvyp. “Radiolokatsiya, sputnikovaya navigatsiya i svyaz’, radioastronomiya”* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., Spec. Iss. “Radio-Location, Satellite Navigation and Communication, Radio Astronomy”], 2009, pp. 176–186 (in Russ.).
- [3] Vlasov I.B., Mikhaylitskiy V.P., Gavrilov A.I., Ryzhov V.S. The results of the signals observation of satellite systems using antenna of radio telescope RT-7.5 of BMSTU. *Vestn. Mosk. Gos. Tech. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr., Specvyp. “Radioopticheskie tekhnologii v priborostroenii”* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., Spec. Iss. “Radio-optical technology in instrument engineering”], 2012, no. 7, pp. 182–190 (in Russ.).
- [4] Thölert S., Erker S., Meurer M. GNSS signal verification with a high gain antenna – calibration strategies and high quality signal assessment. *Proc. Int. Tech. Meeting “ION 2009”*, Anaheim, CA, January 26–28, 2009.
- [5] Frolov O.P., Val’d V.P. Zerkal’nye anteny dlya zemnykh stantsiy sputnikovoy svyazi [Reflector antennas for earth satellite communication stations]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2008. 496 p.

- [6] Kuz'min A.D., Salomonovich A.E. Radioastronomicheskie metody izmereniya parametrov antenn [Radio astronomy methods of antenna parameters measurements]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1964. 184 p.
- [7] Kennewll J.A., Cornelius D.W. Learmonth Solar Observatory. *The Australian Physicist*, 1983, vol. 20, pp. 276–280.
- [8] Lists of solar-geophysical data, solar radio flux data, site of Space Weather Prediction Center (SWPC). Available at: <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/lists/radio.html> (accessed 01.09.2014).
- [9] Kantor L.Ya. Sputnikovaya svyaz' i veshchanie. Spravochnik [Satellite communications and broadcasting. Handbook]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1997. 528 p.
- [10] Zheleznyakov V.V. Radioizluchenie Solntsa i planet [Radio emission of the Sun and planets]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 560 p.

Статья поступила в редакцию 29.05.2014

Власов Игорь Борисович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области радиолокации и радионавигации.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Vlasov I.B. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Radio electronic systems and devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of radiolocation and radio-navigation.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation

Михайлицкий Виктор Павлович — канд. техн. наук, ведущий науч. сотр. НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области радиолокации и радионавигации.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Mikhaylitskiy V.P. — Cand. Sci. (Eng.), leading researcher of the Research Institute for Radio Electronic Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of radiolocation and radio-navigation.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Рыжов Владимир Сергеевич — аспирант кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области радиоастрономии и радионавигации.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ryzhov V.S. — post-graduate of “Radio electronic systems and devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications in the field of radio astronomy and radio-navigation.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.