

Оптические технологии калибровки и юстировки трактов радиотелескопов

Б. В. Васильчук, В. П. Власенко, Р. Н. Залужный, В. Н. Нестерук,
А. А. Сорокин, А. М. Цюх

*Центр контроля космического пространства, НЦУИ КС, НКА Украины,
Евпатория-19, АР Крым, 97419, Украина
E-mail: tsyukh@evpanet.com*

Статья поступила в редакцию 6 августа 2004 г.

Описаны возможные области применения некогерентных точечных изотропных излучателей и приведены первые экспериментальные результаты.

Введение

Основной проблемой при абсолютной калибровке трактов радиометров с антенной системой является вопрос о геометрии поля калибровочного излучателя. Принципиальное ограничение на размер обычных излучателей $d \sim \lambda$ приводит к проявлению интерференционных эффектов и искажению поля как в ближней, так и в дальней зонах. Это существенно осложняет не только абсолютную калибровку, но и простые измерения формы диаграммы направленности, так как остается открытым вопрос о том, диаграмма направленности какого объекта измеряется. Вопрос проведения относительных измерений решается при использовании удаленных естественных радиоисточников, однако проблема абсолютных измерений далека от разрешения и подробно рассмотрена в [1, 2]. Развитие техники регистрации, появление высокочувствительных маломощных радиометров позволяет использовать для калибровки источники теплового излучения – аналоги абсолютно черного тела. Техника калибровки достаточно хорошо отработана для измерений в оптическом диапазоне, и созданы достаточно мощные излучатели-модели абсолютно черного тела (глобары, специальные лен-

точные лампы накаливания, плазменные генераторы шума). В таких излучателях формирование фронтов электромагнитных волн не связано с коллективным движением зарядов, исключено появление боковых лепестков, обеспечивается высокая изотропность излучения во всех зонах и для различной поляризации. Отработаны методики расчета и измерения мощности излучения. Соответствие такого излучателя абсолютно черному телу проверяется по совпадению измеренного спектра излучения с рассчитанным по формуле Планка для заданного частотного диапазона.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка возможностей применения некогерентных, точечных, изотропных излучателей в качестве калибровочных, юстировочных и опорных источников.

Калибровка приемных трактов радиотелескопов

Некоторые недостатки обычного метода текущей калибровки трактов радиометров по горячей и холодной согласованным нагрузкам становятся существенными при переходе к предельным измерениям.

Среднеквадратичное значение напряжения шума на активном сопротивлении R

с учетом паразитной емкости C в полосе частот $\Delta f = f_2 - f_1$ [3]

$$U^2 = 4kTR \int_{f_1}^{f_2} \frac{df}{1 + 4\pi^2 R^2 C^2 f^2},$$

где T – температура, k – постоянная Больцмана.

Помимо теплового шума в некоторых типах сопротивлений имеет место избыточный токовый шум. Для угольных сопротивлений, например, мощность такого шума [4]

$$W_N = \frac{\Gamma(I)^\beta \Delta f R}{f},$$

где Γ – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала проводника, степени его чистоты, структуры и обработки; $\beta \sim 2$; I – величина тока через сопротивление $R = R_0(1 + \alpha T)$; α – температурный коэффициент сопротивления. Тогда относительная величина флуктуации мощности шума

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta T}{T} + \frac{2\Delta I}{I} + \frac{8\alpha \Delta T \pi^2 R_0^2 C^2 f^2 (1 + \alpha T)}{1 + 4\pi^2 R^2 C^2 f^2}. \quad (1)$$

Очевидно, что наибольшие ошибки вносятся при переключениях приемников с антенн на согласованное сопротивление – появляются коммутационные шумы, непредсказуемо меняется импеданс системы.

Конструктивные и технологические сложности размещения криогенных и термоизмерительных систем в ограниченном объеме фокального пространства антенны приводят к необходимости увеличения антенно-фидерных трактов, не охватываемых, как и облучатель, калибровочными измерениями.

Неудобство технического обслуживания таких измерений (нагрузка обычно охлаждается жидким азотом) затрудняет жесткий постоянный контроль временной стабильности коэффициентов усиления и передачи,

необходимый при проведении прецизионных измерений.

Всех этих недостатков лишены калибровочные источники теплового излучения, применяемые в оптике. Оптическая связь минимизирует вклад коммутационных шумов и позволяет вводить сигнал в любую точку как антенно-фидерного устройства или радиометра, так и в ближнюю и дальнюю зоны облучателей без нарушения целостности конструкции и изменения гальванических связей. При использовании достаточно мощных излучателей это обеспечивает возможность калибровки тракта прохождения излучения, включая все элементы радиотелескопа (основные и дополнительные зеркала, облучатели), с помощью которых принимаемый сигнал подается на вход приемника. Точность источника упрощает расчет геометрических параметров. Отсутствие выделенного направления движения излучающих зарядов обеспечивает однородность излучения по различным направлениям поляризации, что важно для абсолютных и относительных калибровок каналов радиометров с различными направлениями поляризации.

В большинстве случаев в качестве такого источника можно использовать обычные лампы со спиральным телом накаливания. Однако для прецизионных измерений необходимо использовать лампы с ленточным телом накаливания. Это упрощает учет закона Ламберта и устраняет слабую поляризацию излучения за счет касательных к излучающей поверхности направлений.

Без учета отвода тепла через токоподводы яркость источника теплового излучения, нагретого джоулевым теплом до температуры T ,

$$B = \frac{2k}{\lambda^2} \sqrt{\frac{R_0 I^2 (1 + \alpha T)}{S \sigma n}}$$

где n – коэффициент серости материала излучателя, σ – постоянная Стефана-Больцмана, S – площадь излучателя.

Соответственно, величина относительных флуктуаций яркости

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta I}{2I} + \frac{\alpha \Delta T}{(1 + \alpha T)}. \quad (2)$$

Сравнение формул (1) и (2) показывает, что флуктуации сигнала при использовании теплового источника ($T \sim 3000$ К) по меньшей мере на порядок меньше, чем у низкотемпературных согласованных нагрузок ($T \sim 300$ К), и определяются только коэффициентом стабилизации тока нагревателя. Кроме того, из-за эффекта теплового скинирования флуктуации тока слабо проявляются в колебаниях температуры (и яркости) при характерных временах

$$t < \frac{l^2 c \rho}{\eta}, \quad (3)$$

где l – характерный размер тела накала, c , ρ , η – соответственно удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала излучателя.

Однако этот эффект ограничивает область измерения временных характеристик каналов регистрации при временах, меньших времени выхода нагреваемого элемента на уровень стационарной температуры.

С помощью ламп накаливания проведена абсолютная калибровка облучателей с радиометрами в частотных диапазонах 4.8 ГГц – волноводный облучатель (полоса $\Delta f = 15$ МГц, шумовая температура 25 К) – и 325 МГц – спиральная антенна (полоса $\Delta f = 2$ МГц, шумовая температура 180 К) [5] – которыми оборудован радиотелескоп РТ-70 (зеркальная антенная система типа Грегори диаметром 70 м (рис. 1)). В этой схеме поток излучения от основного зеркала M_0 через контррефлектор M_k направляется на систему подвижных зеркал M_1 , M_2 . Перемещение этой системы переводит поток излучения на различные облучатели 2, смещенные относительно оси зеркала M_0 и расположенные по кругу. В другом варианте

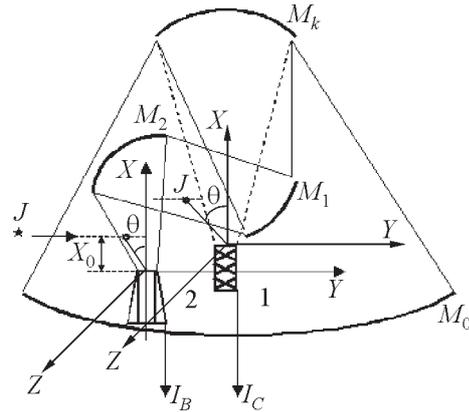


Рис. 1. Зеркальная система радиотелескопа РТ-70

($f = 325$ МГц) в фокальной плоскости зеркальной системы M_0 , M_k располагалась спиральная антенна 1, обеспечивающая работу на двух поляризациях сигнала. Лампа накаливания J перемещалась вдоль осей x , y , z для измерения диаграммы направленности $F(\theta)$ облучателей. Определялась пороговая чувствительность, т. е. минимальная интенсивность падающего на приемник излучения, вызывающая на его выходе сигнал, равный напряжению шумов. Сигнал на выходе радиометра U определяется интегралом свертки функции, описывающей пространственное распределение излучения от калибровочного источника P , и аппаратной функции калибруемого приемника с облучателем (диаграммы направленности F) в пределах охватываемого телесного угла Ω и полосы частот df .

Для лампы с вольфрамовой нитью накала

$$U = A \int_{\Delta f} \left(\int_{\Omega} P F d\Omega \right) df.$$

Для нашего случая точечного источника излучения ($\Delta f = df \ll f$)

$$U = AP \frac{S}{4\pi x_0^2} \Delta f,$$

где S – площадь входного отверстия облучателя; x_0 – расстояние от калибровочного источника до облучателя (рис. 1); A – определяемый коэффициент пересчета;

$$P = \varepsilon(f) \frac{C_1 f^3}{\left(\exp\left(\frac{C_2 f}{cT}\right) - 1 \right) c^4}, \quad (4)$$

где $\varepsilon(f)$ – коэффициент лучеиспускания вольфрама [6]; $C_1 = 1.19 \cdot 10^{-5}$ эрг·см²·с⁻¹·ср⁻¹; $C_2 = 1.439$ см·градус; $c = 3 \cdot 10^{10}$ см·с⁻¹.

Лампа накаливания перемещалась в плоскости x, y (рис. 1) до получения максимума сигнала (это положение соответствует оси облучателя и $\theta = 0$). Полная мощность излучателя определялась болометром и пересчитывалась по формуле (4) на заданную частоту. Температура нити лампы контролировалась пирометром. Линейность амплитудной характеристики проверялась изменением мощности сигнала.

Для уменьшения вклада шумов от нагретой арматуры облучателя использовался бесцокольный вариант лампы (JCG4 – 12В, 20Вт).

Эксперименты показали, что с применением синхронного накопления и вычитания сигналов, (сигнал + шум) – (шум) [7], в сантиметровом диапазоне оказалось достаточно излучателя с электрической мощностью ~ 0.1 Вт, в дециметровом диапазоне ~ 20 Вт.

В настоящее время подготавливается эксперимент по абсолютной калибровке всего тракта нескольких крупногабаритных антенных систем, что потребует проведения измерений в дальней зоне (на расстоянии ~ 1 км от зеркала) и, соответственно, применения более мощных излучателей.

Юстировка оптических систем радиотелескопов

Большинство зеркальных антенных комплексов характеризуется сложной оптической системой, состоящей из нескольких элементов (основное зеркало, контррефлектор, добавочные зеркала, облучатель), установка которых определяется расчетным путем.

Точечность и изотропность излучения тепловых источников позволяет проводить экспериментальную проверку расчетных соотношений для хода лучей в ближней зоне, что невозможно при использовании других калибровочных источников.

На рис. 2 приведены результаты эксперимента по измерению диаграммы направленности в ближней зоне волноводного облучателя 2 (рис. 1) (длина волны $\lambda = 6$ см). Излучатель перемещался в плоскости $x_0 = 30$ см. Полная интегральная мощность излучения 1 Вт. Уровень шума отмечен линией 1, телесный угол, охватываемый зеркалом M_2 , отмечен вертикальной линией 2. Из рисунка видно, что имеется расхождение – зеркало M_2 заполнено неравномерно. Это приводит к дополнительным потерям части потока (зона II) при работе антенного комплекса в режиме излучения мощности и к увеличению шумов за счет регистрации потока из зоны II в режиме радионаблюдений.

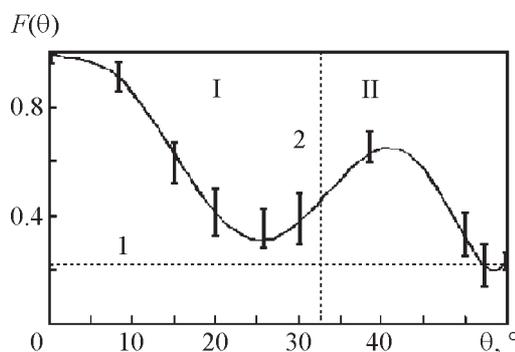


Рис. 2. Диаграмма направленности волноводного облучателя

На рис. 3 приведен график диаграммы направленности спиральных антенн ($\lambda = 91$ см) в плоскости y, z ($x_0 = 30$ см).

Кривые 1, 2 соответствуют различным поляризациям (спирали с разными направлениями намотки). Подъемы чувствительности при $\theta = -30^\circ$ и 30° соответствуют

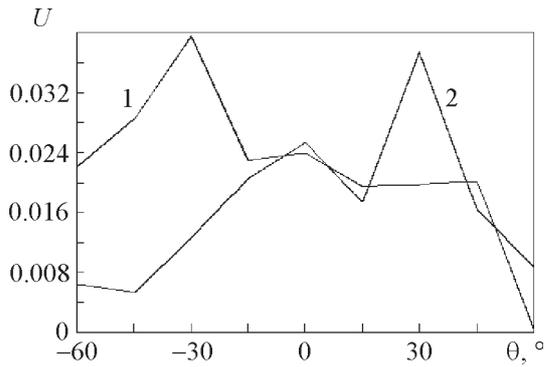


Рис. 3. Диаграмма направленности спиральных антенн: 1 – правая поляризация; 2 – левая поляризация

координатам начала спиралей. Шумовой вклад от излучения арматуры калибровочного источника не превышал 1 %. Следует отметить, что подобные эксперименты в ближней зоне невозможно провести с использованием других типов излучателей, т. к. из-за их больших габаритов искажается распределение полей.

Применения излучателей в качестве опорных источников

Высокая стабильность и простота абсолютной калибровки самого излучателя позволяют использовать его в качестве опорного источника в радиометрах с выделением сигнала из шума – синхронных детекторах, компенсационных приемниках и т. д. Особенно важно это свойство для учета нестабильности коэффициентов усиления приемников, работающих в режиме накопления с временами накопления более нескольких секунд, связанных с непредсказуемыми изменениями температур, напряжения питания и эффектами усталости. Разработана программа для численного исправления трендов коэффициентов усиления приемника прямого усиления с временем накопления $t \geq 100$ с. Используется импульсный режим работы теплового излучателя. Минимальная достигнутая длительность импульса (при размере нити накала $l = 2$ мм) $\tau = 0.1$ с измерилась фотодатчиком, что соответствует

расчету по формуле (3). На рис. 4 показан пример измерения галактического фона на антенном комплексе АДУ–1000 (восьмизеркальная антенна размером 64×32 м, радиус одного зеркала 8 м, длина волны 32 см), где установлен радиометр с большим временем накопления > 1 ч. На рис. 4, а приведена осциллограмма измеренного потока ради излу чения за период 5 с с калибровочными метками от вспышек лампы накаливания, размещенной перед облучателем (для “наглядности” длительность вспышки увеличена). На рис. 4, б показана форма сигнала

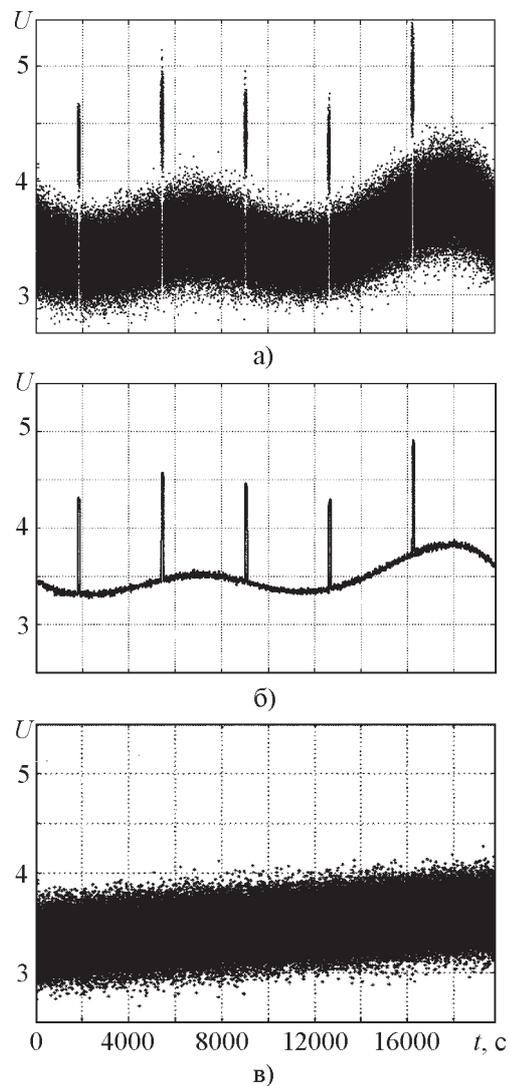


Рис. 4. Пример учета тренда коэффициента усиления приемного тракта

вспышки, выделенного интегрированием. Видно, что имеется существенное “плавание” коэффициента усиления приемного тракта (регистрируемая амплитуда сигнала от излучателя меняется на величину $\sim 15\%$, в то время как полная мощность сигнала постоянна). На рис. 4, в приведен реальный сигнал, полученный с учетом эффекта изменения коэффициента усиления тракта. Дальнейшее увеличение точности внесения поправок можно обеспечивать путем перекрытия полезного сигнала и синхронным включением опорного излучателя.

Заключение

Эксперименты показали простоту и надежность предложенного метода калибровки всего тракта антенных комплексов. С использованием оптического источника проведены измерения диаграмм направленности различных облучателей в ближней зоне. Существенное увеличение времени накопления сигнала, полученное в результате применения оптических излучателей в качестве опорных источников, показывает реальность проведения измерений абсолютных интенсивностей естественных слабых радиоисточников, что в совокупности с прецизионными измерениями их координат по методике, разработанной авторами [8, 9], позволит создать уточненный каталог радиоисточников. В настоящее время ведется эксперимент по измерению локальных коэффициентов использования полотна антенны RT-70 как в пределах существующей конструкции, так и вне нее (последнее невозможно провести другими способами, в том числе и голографическим). Это позволит увеличить эффективную площадь антенны как за счет выравнивания полотна, так и за счет увеличения геометрической площади.

Литература

1. Kraus J. D. Radio Astronomy. – 1967. – 456 p.
2. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
3. Sagnac B., Brossel J. Compt. Rend. Acad. – 1959. – 357 p.
4. Козлов А. Н. Квантовые магнитометры для геомагнитных исследований. – М.: ИЗМИРАН СССР, 1965.
5. Malevinskij S., Abrosimov V., Maslov V., Petrov G., Tomilin Yu., Nesteruk V. at all. Upgrade of Eupatoria RT-70 Antenna with Receiving System for 325 MHz Frequency Range // IAU Symp199. – Pune, India. – 1999.
6. Handbook of chemistry and physics. / Ed. by C. D. Hodgman, 44th ed. – Cleveland, 1962. – 482 p.
7. Сорокин А. Ф., Цельник Ф. А., Кудрявцев А. М. Выделение сигнала при наличии двух взаимно коррелирующих шумов // II Совещание по диагностике высокотемпературной плазмы. Тезисы. – Харьков, 1977. – С. 61.
8. Цюх А. М. Повышение точности определения угловых координат объектов в радиодиапазоне / Extension and connection of reference frames using CCD ground-based technique. Abstracts. October 10-13, 2001, Nikolaev, Ukraine, P. 20.
9. Пат. Украины №42195А. Способ прецизионного измерения координат и вектора скорости отражающего объекта: Пат. Украины №42195А / В. П. Власенко, А. Ф. Сорокин (Украина); Патент Украины №42195А от 15.10.2001. Бюл. №9.

Оптичні технології калібрування та юстирування трактів радіотелескопів

**Б. В. Васильчук, В. П. Власенко,
Р. М. Залужний, В. М. Нестерук,
О. О. Сорокін, А. М. Цюх**

Описано можливі сфери застосування некогерентних точкових ізотропних випромінювачів та наведено перші експериментальні результати.

Optical Techniques of Calibration and Alignment of Radiotelescope Sections

**B. V. Vasilchuk, V. P. Vlasenko,
R. N. Zaluzhnyj, V. N. Nesteruk,
A. A. Sorokin, and A. M. Tsyukh**

Possible areas of application of incoherent point-like isotropic emitters are described, first experimental results given.