

Система калибровки поляриметра радиотелескопа

А. А. Борисова

*Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

andermarin@rambler.ru

М. Б. Зотов

Институт прикладной астрономии РАН

zmb@iaaras.ru

Аннотация. Изучение солнечной активности является актуальным, что требует создание новой и усовершенствование существующей аппаратуры. В работе представлено обоснование необходимости изменения существующей калибровки приемной системы радиотелескопа РТ-1.8 разработки ИПА РАН. Предложен новый метод калибровки, который заключается в переносе калибровочного модуля, состоящего из генератора шума и аттенюатора, из фокального контейнера наружу. При этом излучение генератора шума через собственную антенну будет попадать напрямую в облучатель. В работе рассмотрены несколько видов антенн, аттенюаторов и генераторов шума, произведено их сравнение и обоснование выбора того или иного компонента.

Ключевые слова: Солнце, радиотелескоп, приемная система, система калибровки

I. ВВЕДЕНИЕ

Солнечное излучение влияет на работу многих сфер жизнедеятельности: на радиосвязь, работу GPS, оно может выводить из строя космические аппараты, приводить к ложным срабатываниям электронных средств, а также влиять на здоровье метеозависимых людей и космонавтов. Именно поэтому проблема прогнозирования солнечного излучения актуальна до сих пор. Важно обеспечить круглосуточное наблюдение за активностью Солнца, пополняя базы данных, на основе которых строятся модели для прогноза космической погоды, состояния атмосферы Земли.

В работе рассматривается радиотелескоп РТ-1.8, он позволяет измерять параметры радиовсплесков и степень поляризации излучения на длине волны 10,7 см. Наблюдения на этой длине волны являются хорошей заменой чисел Вольфа. Большинство существующих моделей, описывающих состояние околоземной среды (ионосферы, атмосферы и т. д.), в качестве одного из основных входных параметров используют индекс, характеризующий непосредственно солнечную активность, точнее поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см (индекс F10.7). Непрерывная регистрация радиоизлучения на волне 10,7 см с анализом тонкой структуры спектра вблизи этой частоты дает возможность для ранней регистрации вспышечной активности и выбросов KBM [1].

В пределах Солнечной системы поляриметрические наблюдения позволяют получить ценную информацию о химическом составе облачного покрова планет, составе и строении комет, зодиакального света и других объектов [2].



Рис. 1. Радиотелескоп РТ-1.8

II. РАДИОТЕЛЕСКОП РТ-1.8

Радиотелескоп РТ-1.8 (рис. 1) был разработан в ИПА РАН и состоит из антенной системы, системы наведения, приемной системы и системы регистрации. Подробная информация о его нем представлена в работе [3]. В настоящей работе предполагается внести изменения в приемную систему.

A. Приемная система РТ-1.8

Приемная система отвечает за прием радиоизлучения, усиление и выделение рабочей полосы частот. Облучатель и приемная система размещаются в герметичном фокальном контейнере радиотелескопа, расположенном в фокусе зеркала антенной системы. Основной режим работы приемной системы – модуляционный с возможностью переключения принимаемой поляризации, что позволяет определять степень поляризации солнечного радиоизлучения. Также предусмотрен режим полной мощности для одного из каналов.

Структурная схема приемно-регистрирующей системы (ПРС) изображена на рис. 2. Облучатель ПРС обеспечивает прием правой и левой круговых поляризаций (RCP и LCP) в наблюдаемом диапазоне частот (2785–2815 МГц).

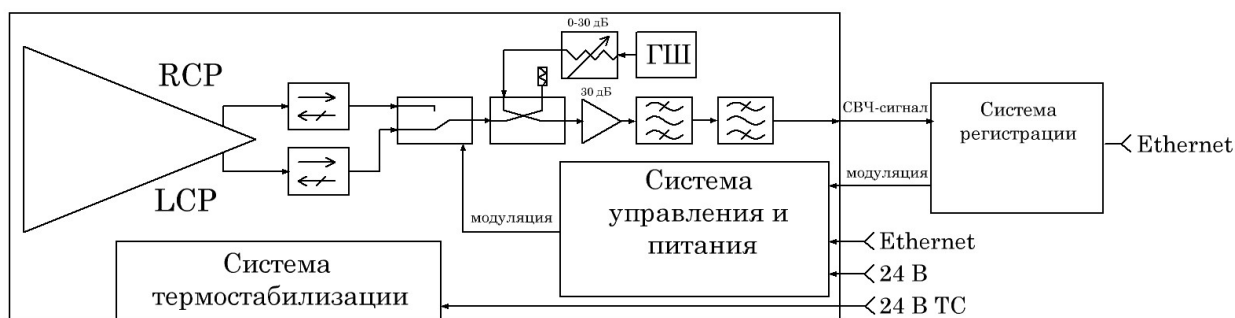


Рис. 2. Функциональная схема приемно-регистрирующей системы

На выходах облучателя установлены СВЧ-вентили, обеспечивающие согласование. На вход малошумящего усилителя с помощью направленного ответвителя (на четвертый порт установлена согласованная нагрузка) поочередно на четверть периода модулирующего сигнала поступают сигналы правой и левой круговых поляризаций, их сумма и калибровочный сигнал от генератора шума. Использование калибровочного сигнала позволяет провести калибровку приемника – учесть флуктуации коэффициента усиления канала путем вычисления разности сигналов от антенны и от генератора шума.

Управление уровнем амплитудной калибровки осуществляется управляемым аттенуатором с диапазоном регулировки ослабления 0–30 дБ. Для обеспечения стабильности калибровочного сигнала генератор шума термостатируется.

Для формирования полосы сигнала 2785–2815 МГц используются два полосно-пропускающих фильтра.

Система управления и питания предназначена для электропитания ПРС, управления модуляцией, а также для дистанционного управления и контроля работы узлов приемно-регистрирующей системы.

Питание приемной системы, системы регистрации и термостата обеспечивается независимыми источниками питания, располагаемыми вне фокального контейнера.

III. СИСТЕМА КАЛИБРОВКИ

A. Постановка задачи

Существующая система калибровки не позволяет учитывать влияние собственной поляризационной диаграммы облучателя и потери на вентиле и р-и-п переключателе (направленном ответвителе). Это может привести главным образом к систематическим

погрешностям определения индекса F10.7 и степени поляризации солнечного излучения. В работе рассматривается другой вариант калибровки приемной системы радиотелескопа.

Функциональная схема предложенной системы калибровки представлена на рис. 3. Предлагается вынести за пределы фокального модуля систему калибровки, включающую генератор шума (ГШ) и управляемый аттенуатор.

Калибровочный сигнал можно излучать с помощью антенны в облучатель напрямую, т.е. расположить антенну на месте согласующего диска (рис. 1). Это позволит учесть влияние собственной поляризационной диаграммы облучателя.

При этом стоит выделить несколько требований, предъявляемых к антенне, которая будет излучать сигнал с генератора шума. Она должна иметь центральную частоту 2,8 ГГц и минимальную полосу пропускания 30 МГц – эти параметры обусловлены характеристиками облучателя. На частоте 2,6 ГГц излучения не должно быть, чтобы не вносить помехи в рабочий диапазон частот приемной аппаратуры РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Выбор генератора шума производится, исходя из минимального значения СПМШ, которое определяется главным образом ослаблением в пространстве между антенной ГШ и облучателем.

B. Расчет ослабления излучения между антенной и облучателем

Для оценки амплитудных характеристик системы калибровки поляриметра радиотелескопа и окончательного выбора элементов системы в данном разделе будет приведен расчет ослабления излучения ГШ в пространстве между антенной и облучателем.



Рис. 3. Функциональная схема приемно-регистрирующей системы

Есть несколько факторов, влияющих на ослабление радиоволны:

- Потери в фидере, которые в работе оцениваются в 1,5 дБ. Сюда входят потери в кабелях и разъемных соединениях, а также предположительные потери в элементах запитки антенны.
- Ослабление на аттенюаторе в пределах от 1 дБ до 30 дБ – с помощью него будет осуществляться контроль и управление интенсивностью излучения ГШ.
- Ослабление излучения в пространстве между антенной ГШ и облучателем.

Ослабление в свободном пространстве определяются, исходя из нескольких предположений:

- Рассматривается «худший» случай, когда антенна является всенаправленной, т. е. ее коэффициент усиления равен 1.
- Антенна рассчитана на линейную поляризацию, что в итоге при приеме облучателем, рассчитанном на круговую поляризацию, даст потери в 3 дБ.
- Распространение волны между антенной ГШ и облучателем происходит в свободном пространстве.

Между коэффициентом усиления G и ее эффективной площадью S_T существует зависимость:

$$G = \frac{4\pi \cdot S_T}{\lambda^2}, \quad (1)$$

где λ — длина радиоволны.

Исходя из формулы (1), можно найти эффективную площадь изотропной излучающей антенны:

$$S_T = \frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi} = \frac{1 \cdot 0,107^2}{4\pi} \approx 0,911 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (2)$$

Расстояние между облучателем и зеркалом $d = 0,66 \text{ м} \gg \frac{S_A}{\lambda} = 0,00851 \text{ м}$, следовательно, электромагнитную волну можно считать плоской на ограниченной площади облучателя.

Тогда коэффициент затухания мощности радиоволны, фактор L_0 , вычисляется с учетом того, что антенны ориентированы на максимум передачи, по формуле:

$$L_0 = \frac{\lambda^2 \cdot d^2}{S_T \cdot S_R}, \quad (3)$$

где d – расстояние между антенной и облучателем, S_T и S_R – эффективная площадь изотропной антенны и облучателя соответственно.

Эффективную площадь облучателя можно оценить как:

$$S_R = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} \approx 0,0123 \text{ м}^2, \quad (4)$$

где $d_0 = 125 \text{ мм}$ – меньший диаметр облучателя, который отвечает за прием радиоизлучения.

Подставляя в (3) значения эффективной площади облучателя (4) и излучающей изотропной антенны (2), можно получить численное значение ослабления излучения в свободном пространстве между антенной и облучателем:

$$L_0 = \frac{\lambda^2 \cdot d^2}{S_T \cdot S_R} = \frac{0,107^2 \cdot 0,66^2}{0,911 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0123} = 445,074$$

или при пересчете $L_0 = 26,5 \text{ дБ}$.

Тогда итоговое значение ослабления между антенной и облучателем складывается из потерь в фидере, минимальном ослаблении аттенюатора, потерь на поляризации и ослаблении в пространстве между антенной и облучателем:

$$L = 1,5 + 26,5 + 1 + 3 = 32 \text{ дБ}.$$

C. Расчет минимальной шумовой температуры генератора шума

С помощью коэффициента ослабления L можно определить минимальное значение СПМШ генератора шума.

Яркостная температура Солнца в спокойном состоянии – 6000–8000 К, что приводит к приращению антенной температуры РТ-1.8 примерно на 400–600 К. При калибровке необходимо полностью скомпенсировать излучение Солнца, следовательно, шумовая температура ГШ на входе приемной системы должна быть более 600 К.

Тогда минимальное значение СПМШ, выраженное в единицах шумовой температуры, будет равняться $600 \cdot 1584,89 = 950934 \text{ К}$.

D. Выбор генератора шума

Согласованная нагрузка (СН) «шумит» на всем диапазоне частот, определяемом ее конструкцией, равномерно с шумовой температурой 300 К. Например, СН, реализованная на волноводе, или СН, реализованная на коаксиальном кабеле. Главное ее достоинство – простота конструкции. Однако при использовании СН в качестве ГШ необходимо повышать уровень шумов, что приводит к необходимости использования усилителя с довольно большим коэффициентом усиления, который вносит нестабильность в калибровочный сигнал, также его непросто реализовать. После усилителя необходимо будет использовать регулируемый аттенюатор для контроля уровня шумового сигнала на выходе, что в итоге усложнит схему системы калибровки.

При наличии генераторов шума на лавинно-пролетных диодах лучше использовать их. Характеристики таких генераторов шума были определены в широкой полосе частот для нескольких их серий. В данном случае нужно значение СПМШ на одной частоте 2,8 ГГц. Значения СПМШ, выраженные в единицах шумовой температуры для серий ГШ, приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. СПМШ ГШ на частоте 2,8 ГГц

Тип ГШ	СПМШ, тыс К
M31305-3	1176
NMA2218 CS5	602
M41318-7	258

Из нее видно, что подходит только одна серия ГШ — М31305-3, значения СПМШ слабо превышает минимальное, что может привести к необходимости использования усилителя. При этом установку в схему усилителя стоит рассматривать только после выбора антенны и расчета ее коэффициента усиления и потерь на систему ее запитки.

Е. Выбор аттенюатора

В программе управления приемно-регистрирующей системой (ПРС) РТ-1.8 есть возможность управления шаговым и р-і-п аттенюаторами с помощью АЦП. На рис. 4–5 приведены зависимости ослабления, даваемого аттенюаторами, от значения кода АЦП программы управления ПРС.

Характеристика шагового аттенюатора линейная, а вот р-і-п – в общем случае нет. Преимущество р-і-п аттенюатора – более плавная регулировка ослабления, дискрет шагового аттенюатора значительно больше (всего 32 значения, тогда как у р-і-п он составляет 4100 значений).

Исходя из характеристик ГШ (значение СПМШ ГШ несильно превышает минимальное) собственное вносимое ослабление аттенюатора должно быть минимальным, что приводит к закономерному выбору р-і-п аттенюатора. К тому же он обладает меньшим дискретом, что важно при компенсации.

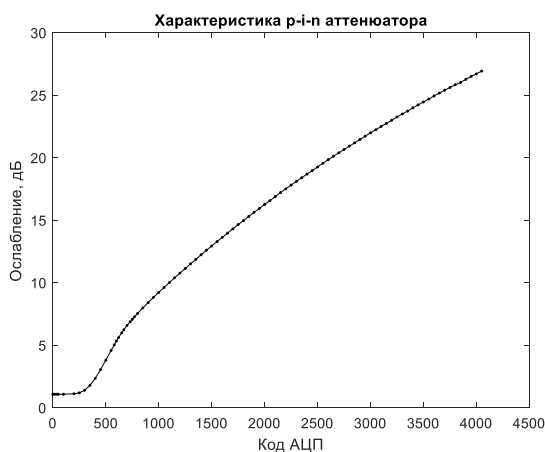


Рис. 4. Зависимость ослабления, вносимого р-і-п аттенюатором, от кода АЦП

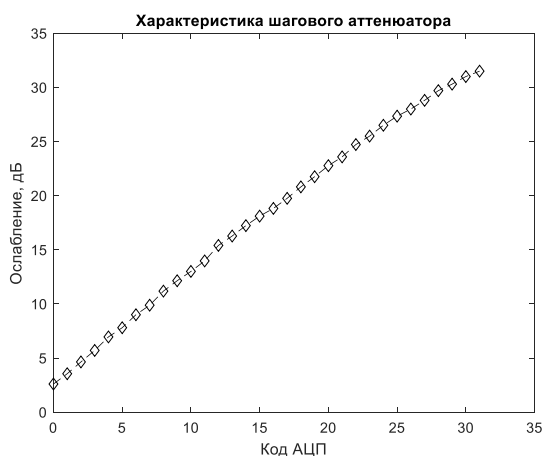


Рис. 5. Зависимость ослабления, вносимого шаговым аттенюатором, от кода АЦП

ТАБЛИЦА II. ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН

Вид антенны	Полоса частот, МГц	КУ, дБ	Согласование на частоте 2.8 ГГц
Дипольная антенна с четвертьволновым шунтовым питанием	201	6,46	-13,65
Полуволновая щелевая антенна с резонатором	96,7	7,54	-21,2
Патч-антенна	40	5,45	-37,9

Ф. Выбор антенны

В работе рассматриваются три типа простых антенн: вибраторная антенна с четвертьволновым шунтовым питанием [4], полуволновая щелевая антенна с резонатором [5], а также простая прямоугольная патч-антенна [6]. Их моделирование производится в специализированном программном пакете. В табл. 2 приведены характеристики антенн.

На данный момент были построены антенны без системы запитки. В дальнейшем будут учтены особенности запитки каждой из них.

На основании моделирования антенны с системой запитки будет делаться выбор в пользу той или иной антенны. Также из-за простоты конструкции патч-антенны и ее удобного расположения на согласующем диске радиотелескопа предпочтения будет отдаваться именно ей. Однако полоса частот патч-антенны довольно узкая, из-за чего могут возникнуть проблемы при изготовлении. В дальнейшем планируется рассмотреть стандартные методы расширения полосы патч-антенны.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена система калибровки поляриметра радиотелескопа РТ-1.8. Проведен анализ существующей системы калибровки и обоснован альтернативный метод калибровки. Он основан на выносе калибровочного модуля за пределы фокального контейнера, что позволяет при калибровке учесть собственную поляризационную диаграмму облучателя.

В рамках исследования проведены расчеты ослабления сигнала ГШ между антенной ГШ и облучателем. Проанализированы требования к характеристикам антенны ГШ и самого ГШ, а также рассмотрены некоторые их варианты.

Предложенная схема модернизации системы калибровки позволит повысить точность измерений индекса F10.7 и степени поляризации солнечного излучения, что, в свою очередь, будет способствовать улучшению прогнозирования солнечной активности и ее воздействия на околоземное пространство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Богод В.М., Стороженко А.А., Тлатов А.Г. и другие. Разработка проекта реконструкции Гаванской радиоастрономической станции в составе Российских служб Солнца и Космической Погоды // Космич. исслед. 2021. Т. 59, №2. С. 102–110.
- [2] Астронет: Ю.Н. Гнедин, "Физика Космоса", 1986 Поляризация излучения (космических источников). [Электронный ресурс] URL: https://www.astronet.ru/db/msg/1188548?utm_source=chatgpt.com (дата обращения 07.03.2025)
- [3] Зотов М.Б., Быков В.Ю., Векшин Ю.В., Ерофеев Д.В., Лавров А.С., Стэмповский В.Г., Хвостов Е.Ю., Чернов В.К., Шишикон А.М., Бетяга Д.С. Радиотелескоп РТ-1.8 для наблюдений за солнечной активностью // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 38-43.
- [4] J. D. Kraus, Antennas, 2nd Ed. McGraw-Hill, 1988, pp. 741-743.
- [5] Марков Г.Т. И Сазонов Д.М. Антенны: Учеб. для студ. радиотех. специальностей вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975. С.347-351.
- [6] J. D. Kraus, Antennas, 2nd Ed. McGraw-Hill, 1988, pp. 745-748.