

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ РАДИОПОЛЯРИМЕТРОВ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

В. М. Богод, А. Д. Бутенко, В. В. Комаров

На радиотелескопе РАТАН-600 разработаны радиополяриметры нового поколения (с использованием транзисторных СВЧ-усилителей) для регистрации солнечного радиоизлучения в сантиметровом диапазоне волн. Отличительная особенность радиометров — широкое применение различных схемных элементов на полосковых и коаксиальных линиях, использование современных промышленных элементов с высокими качественными характеристиками. Это позволило упростить конструкцию радиометров при значительном улучшении их основных параметров и удовлетворить повышенным требованиям, которые предъявляются к солнечным радиополяриметрам нового поколения. Приводится описание приемных устройств, их параметры. Обсуждаются основные режимы работы радиометров.

Radiopolarimeters of a new generation (using the transistor amplifiers on shf (superhigh frequency) have been elaborated at the RATAN-600 radiotelescope. They are supposed for the solar-radiation registration in cm wavelengths. The main peculiarities of the new radiometers are the wide use of different units with the microstrip and coaxial lines and the use of modern commercial sets of good quality. The design of the radiometers has been simplified, the main parameters being considerably improved, so that the new solar radiopolarimeters can meet the raised modern requirements.

The description of the receivers and parameters of the radiometers are given, main operating modes are discussed.

Специфика солнечных наблюдений на инструментах типа РАТАН-600 заключается в регистрации сигналов в широком диапазоне их уровней от слабых опорных объектов до ярких образований на фоне мощного сигнала спокойного Солнца. При этом возможности одновременного анализа спектра солнечного излучения в широком диапазоне волн и анализа степени круговой поляризации с достаточно высокой степенью точности (1.5—2 %) при относительно высоком пространственном разрешении делают такие наблюдения уникальными и пока нереализуемыми на других инструментах.

Поэтому основные требования, предъявляемые к аппаратуре, регистрирующей солнечное радиоизлучение, помимо многоволновости, состоят в следующем:

- а) реализация большого динамического диапазона (вплоть до 10^5 — 10^6 К для изучения всплесков);
- б) необходимость измерения поляризованной по кругу составляющей для оценки магнитных полей активных областей на Солнце;
- в) достаточно высокая чувствительность.

Последнее требование необходимо:

— во-первых, для повышения точности измерения круговой поляризации от отдельных солнечных образований (это достигается в основном за счет увеличения полосы радиометров до 10 %);

— во-вторых, для проведения опорных наблюдений по точечным объектам, сигналы от которых на 3—4 порядка меньше, чем от спокойного Солнца;

— в-третьих, для проведения измерений инструментальных погрешностей системы антенна—радиометр (например, измерение паразитной круговой поляризации с использованием неполяризованного излучения ярких точечных радиосточников).

Радиометры солнечного спектрально-поляризационного комплекса (ССПК) сантиметрового диапазона для РАТАН-600 были разработаны более 10 лет

назад и их схемы отражали уровень радиоэлектроники того времени [1]. Выполненные полностью на полупроводниковых элементах эти радиометры по чувствительности на порядок превосходили радиометры предыдущего накопления на ламповых схемах и имели значительный динамический диапазон до $(3-4) \times 10^4$ К. С их помощью были получены важнейшие астрофизические результаты (см., например, [2-4]).

Накопленный опыт работы на радиотелескопе РАТАН-600 по наблюдениям солнечного радиоизлучения показывает необходимость дальнейшего улучшения параметров радиополяриметров. Основные причины здесь следующие:

— во-первых, с ростом числа радиометров в ССПК и в других комплексах радиотелескопа возникла проблема их электромагнитной совместимости (проникновение сигнала гетеродина одного радиометра в приемный тракт другого), возникли трудности в наблюдательных программах, особенно при проведении комплексных наблюдений [5];

— во-вторых, во многих случаях чувствительность радиополяриметров ($\Delta T_{\text{ср.кр}} \approx 0.2-0.3$ К) была уже недостаточной для наблюдений опорных источников и измерений инструментальных погрешностей антенны;

— в-третьих, в связи с реализацией программы частых наблюдений в азимутах на телескопе [3] участились случаи регистрации всплесков радиоизлучения с антенной температурой (T_a) более 10^5 К и возникли ограничения по динамическому диапазону.

Функциональная схема радиополяриметров нового типа. С учетом вышеизложенных требований были разработаны два радиополяриметра (с использованием транзисторных СВЧ-усилителей), работающих в сантиметровом диапазоне на волнах 2.7 и 4.0 см [6]. Отличительной их особенностью является использование современных промышленных элементов с высокими качественными характеристиками, что позволило упростить конструкцию при значительном улучшении основных параметров радиометров.

Схема радиополяриметров представляет собой приемник прямого усиления на транзисторных СВЧ-усилителях. Модуляционный тракт на входе обеспечивает регистрацию двух параметров Стокса: интенсивности (I) и поляризации (V) и, кроме того, возможно работать в различных режимах:

- режим внутренней калибровки по каналам I и V ;
- режим программной компенсации входного сигнала;
- режим программного подшумливания входного сигнала.

Компенсация входного сигнала и внутренние калибровки могут изменяться в широком интервале температур за счет программного управления динамическим диапазоном радиометра. Для этого в схему приемного тракта включен рип-аттенюатор, сконструированный на полосковых линиях и управляемый от ЭВМ [7]. При работе аттенюатора насыщение радиометра наступает в том случае, когда входной сигнал достигает величины 10^6-10^7 К.

На рис. 1 приведена функциональная схема волноводного тракта радиополяриметра сантиметрового диапазона. С целью повышения стабильности параметров радиометра, модуляционный тракт вместе с генераторами шума расположен в термостабилизированном корпусе.

Принимаемый антенной сигнал поступает на вход радиометра через модулятор круговой поляризации. Это типовой модулятор на круглом волноводе, работающий на эффекте Фарадея. Далее сигнал, промодулированный частотой поляризации Ω_V , поступает на модулятор интенсивности, выполненный на рип-диоде. Сюда же через волноводный направленный ответвитель (НО) поступает калибровочный сигнал полупроводникового генератора шума (ГШП-калибровки, выполненного на твердотельном шумовом диоде), который также модулируется частотой Ω_V . Проходя через модулятор интенсивности, сигнал ГШП-калибровки модулируется частотой интенсивности Ω_I и, как и входной сигнал, становится дважды модулированным. В результате калибровочный сигнал регистрируется как в канале поляризации, так и в канале интенсивности.

Промодулированные сигналы со входа и от ГШП-калибровки поступают в усилительный тракт. Сюда же через волноводный НО поступает сигнал от другого ГШП (ГШП-компенсации, выполненного также на твердотельном шумовом диоде). Его сигнал модулируется Ω_I с управляемой фазой модуляции

и подается через управляемый от ЭВМ аттенуатор. Управление фазой модуляции ГШП-компенсации позволяет реализовать несколько режимов работы радиометра. Остановимся на них подробнее.

Первый режим — вторая калибровка в канале интенсивности. Сигнал ГШП-компенсации поступает в приемный тракт синфазно с сигналом, принимаемым антенной, т. е. поступает в приемный тракт, когда открыт *pin*-модулятор интенсивности. Наличие двух ГШП позволяет в режиме калибровки реализовать программное тестирование как стабильности калибровок от отдельных генераторов шума, так и стабильности радиометра в целом.

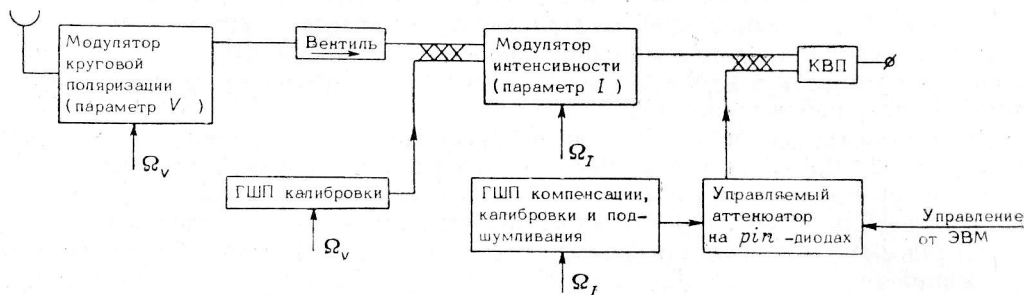


Рис. 1. Функциональная схема волноводного тракта радиополяриметров см-диапазона. КВП — коаксиально-волноводный переход; ГШП — полупроводниковый генератор шума.

Второй режим — компенсация уровня неба или режим подшумливания. Величину регистрируемого сигнала в канале *I* можно описать следующей формулой:

$$T_c = T_a + T_{\text{ГШП. кал}} - T_0 \pm T_{\text{ГШП. комп}}$$

где T_c — измеряемая температура сигнала на выходе радиометра; T_a — температура антенны; $T_{\text{ГШП. кал}}$ — шумовая температура ГШП-калибровки; $T_{\text{ГШП. комп}}$ — шумовая температура ГШП-компенсации; T_0 — шумовая температура согласованной нагрузки на входе усилительного тракта при выключенной модуляции.

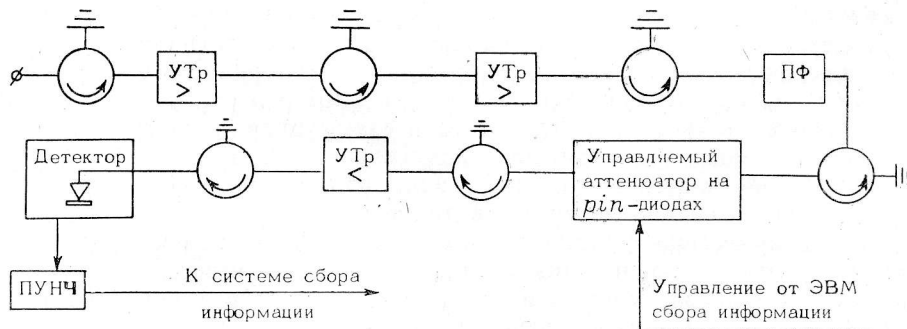


Рис. 2. Функциональная схема усилительного тракта радиополяриметров.

УТр — транзисторный усилитель; ПФ — полосовой фильтр; ПУНЧ — предварительный усилитель низкой частоты.

Температура согласованной нагрузки задается схемой терморегуляции радиополяриметра и составляет обычно (310 ± 2) К.

При отсутствии радиоисточников на входе антенны: T_a — собственная шумовая температура антенны, которая в нашем случае составляет около 50 К; T_0 — поддерживается около 300 К.

Таким образом, при отсутствии радиоисточников и выключенных ГШП T_c в канале *I* составляет около 250 К. Компенсация этого сигнала с помощью ГШП-компенсации ($T_{\text{ГШП. комп}} = T_0 - T_a \approx 250$ К) и реализует компенсацию уровня неба. В этом случае обеспечивается квазиулиевой метод регистрации. Здесь, как и в первом режиме, сигнал ГШП-компенсации поступает в приемный тракт синфазно с антенным сигналом.

Следующий режим — компенсация уровня спокойного Солнца. Регистрируемый антенной сигнал $T_c \gg T_0$ при наведении антенны на Солнце и выключенных ГШП. Если уровень ГШП-компенсации увеличить до T_a , соответствующей прохождению диаграммы направленности через участок спокойного Солнца, то на выходе приемного тракта вновь пропишется нулевой уровень. В этом режиме сигнал ГШП-компенсации поступает в противофазе с сигналом, принятым антенной.

Далее сигналы поступают в усилительный тракт, который показан на рис. 2. Усиление до необходимой величины (50—60 дБ) осуществляется промышленными транзисторными СВЧ-усилителями. Полосовой фильтр, выполненный на полосковых линиях, обеспечивает заданную величину полосы пропускания (5—7 %). Управляемый с помощью ЭВМ аттенюатор на *pin*-диодах расположен перед третьим усилителем. Его назначение — управление динамическим диапазоном радиометра. Если регистрируемый сигнал в ЭВМ превысит некоторый пороговый уровень, то осуществляется переключение аттенюатора на большее затухание. Динамический диапазон таким образом повышается на 10—15 дБ.

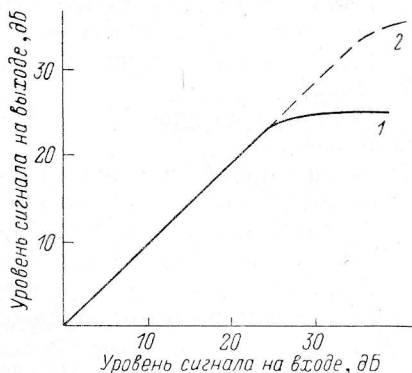


Рис. 3. Динамический диапазон сантиметровых радиополяриметров по отношению к уровню собственных шумов радиометра.

1 — с выключенным *pin*-аттенюатором между усилителями (без управления от ЭВМ); 2 — с включением *pin*-аттенюатора при превышении сигналом некоторого порогового уровня (с внешним управлением).

После усиления сигнал обрабатывается по классической схеме: детектируется квадратичным детектором, усиливается по низкой частоте и поступает в систему сбора информации [8].

Параметры радиополяриметров. Измерение шумовой температуры радиометров проводилось с помощью «теплой» (~ 290 К) и «холодной» (~ 78 К) нагрузок [9]. Определение динамического диапазона осуществлялось методом «горячей» нагрузки (ГШП до $5 \cdot 10^6$ К). Погрешность измерений лежит в пределах ± 5 % и определяется в основном погрешностью в оценке температуры «холодной» нагрузки. Основные параметры сантиметровых радиополяриметров сведены в таблицу:

	№ 1	№ 2
Рабочая длина волны, см	2.7	4.0
Шумовая температура радиометров, К	600	450
Полоса пропускания по уровню —ЗдБ, МГц	1100	700
Чувствительность *, мК	40	35
Усиление в рабочей полосе, дБ	≥ 55	≥ 55
Нестабильность усиления, %/ч	≤ 2	≤ 2
Динамический диапазон, дБ (без управления / с управлением по ВЧ)	25/40	25/40
Затухание модулятора интенсивности, дБ (прямые потери / обратное затухание)	1.2/17	0.8/18
Потери входного тракта, дБ	0.5	0.4

* Ухудшение значения реальной чувствительности радиометров по сравнению с расчетной величиной связано с неидеальностью входного тракта, потери которого составляют для радиометров № 1 и № 2 соответственно 0.5 и 0.4 дБ.

Шумовая температура радиометров определяется шумами транзисторных усилителей, применяемых в приемниках. Использование усилителей с меньшими шумовыми температурами позволяет без каких-либо переделок повысить чувствительность радиометра.

Кривые, характеризующие динамический диапазон сантиметровых радиополяриметров, показаны на рис. 3. Динамический диапазон измерен по отношению к уровню собственных шумов СВЧ-усилителей и составляет:

- а) 20 дБ с точностью 1 %;
- б) 25 дБ с точностью 10 %;
- в) 40 дБ с точностью 2—3 %.

В последнем случае осуществляется дополнительное (управляемое от ЭВМ) ослабление по ВЧ. Это позволяет обеспечить линейную регистрацию сигналов от уровня шумовой дорожки до величины 10^7 К.

Заключение. Представленная работа описывает две первые разработки, связанные с модернизацией солнечных радиополяриметров сантиметрового диапазона на радиотелескопе РАТАН-600. В радиометрах широко используются различные схемные элементы на полосковых и коаксиальных линиях, такие как π -модуляторы и управляемые аттенюаторы на π -структурах, фильтры, детекторы, направленные ответвители и т. д. Использование современной элементной базы позволило удовлетворить тем повышенным требованиям, которые предъявляются к солнечным радиометрам нового поколения.

Параметры радиополяриметров улучшены по сравнению с [1]: а) по чувствительности в 8—10 раз; б) по динамическому диапазону в 10^2 раз.

Значительно упрощен модуляционный тракт с сохранением его основных функций:

- автоматической калибровки по параметрам I и V с использованием ГШП-калибровки;
- калибровки по чернотельному эталону: $T_c = T_0 - T_a \approx 250$ К;
- возможности компенсации входного сигнала по каналу I .

Сделан шаг в решении проблемы электромагнитной совместимости приемных устройств и комплексов за счет перевода двух радиополяриметров сантиметрового диапазона на схемы прямого усиления. Накоплен опыт по созданию радиометров в сантиметровом диапазоне волн на основе транзисторных СВЧ-усилителей.

Литература

1. Богод В. М., Корольков Д. В. Радиометры сантиметрового диапазона на полупроводниковых элементах // Изв. вузов. Радиофизика, 1973. XVI, № 5. С. 691—694.
2. Богод В. М. Измерение параметров радиогрануляции по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 // Сообщ. САО. 1978. 23. С. 22—42.
3. Структура активных областей на Солнце по наблюдениям на VLA и РАТАН-600 в июле 1982 г. (Ч. 1: AR 3804) / Ш. Б. Ахмедов, В. М. Богод, В. Н. Боровик и др. Препр. № 19Л. САО АН СССР. Л., 1985. 60 с.
4. Bogod V. M., Gelfreikh G. B. Measurements of the magnetic field and gradient temperature in the solar atmosphere above flocculi using radio observations // Solar Physics. 1980. 67. P. 29—46.
5. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В. И. Владимиров, А. Л. Докторов, Ф. В. Елизаров и др. М.: Радио и связь, 1985. 272 с.
6. Богод В. М., Бутенко А. Д., Комаров В. В. Радиополяриметры нового поколения для исследования Солнца в сантиметровом диапазоне // XVII Всесоюз. радиоастрон. конф. Тез. докл. Ереван, 1985. С. 220—221.
7. Управляемые аттенюаторы / Г. М. Крылов, Е. И. Хоняк, А. Н. Тынина и др. М.: Радио и связь, 1985. 120 с.
8. Богод В. М., Гельфрейх Г. Б., Петров З. Е. Автоматизированный солнечный спектрально-поляризационный комплекс ИКАР-16 на радиотелескопе РАТАН-600 // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1985. 20. С. 102—116.
9. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. С. 332—344.

Поступила в редакцию 30 мая 1986 г.