

УДК 520.272.5

МАТРИЧНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАРС-3 ДЛЯ РАТАН-600

© 2012 А. Б. Берлин¹, Ю. Н. Парийский¹, Н. А. Нижельский², М. Г. Мингалиев^{2,3},
П. Г. Цыбулёв², Д. В. Кратов², Р. Ю. Удовицкий², В. В. Смирнов⁴, А. М. Пилипенко⁵

¹Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, 196140 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

⁴НИИ Феррит-Домен, Санкт-Петербург, 196084 Россия

⁵НПП Сатурн, Киев, 03148 Украина

Поступила в редакцию 23 марта 2012 года; принята в печать 23 мая 2012 года

Разработана, изготовлена и используется в наблюдениях по программе “Генетический код Вселенной” матричная радиометрическая система третьего поколения МАРС-3. Система построена на новой элементной базе и состоит из 16 независимых радиометров (32 рупора с шагом 20 мм). Каждая пара рупоров подключена на вход усилительного модуля с помощью ППГ-модулятора. Параметры каждого радиометра: центральная частота 30.0 ГГц, полоса приема 5 ГГц, средняя шумовая температура системы 250 К, чувствительность около 5 мК при $\tau = RC = 1$ с.

Ключевые слова: *аппаратура: детекторы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Матричная радиометрическая система (МАРС) [1] разработана для аппаратурного обеспечения проекта “Генетический код Вселенной” [2], утвержденного Президиумом РАН. Проект предполагал использование большого числа радиометров на фокальной линии вторичного зеркала крупнейшего в мире зеркального радиотелескопа РАТАН-600. Большое свободное от аберраций поле зрения при наблюдениях в околосенитной области позволяет установить вдоль фокальной линии большое число радиометров. В данной работе описывается 32-волноводный вариант матричного радиометра. Система МАРС-3 была полностью смонтирована в лаборатории, прошла испытания и установлена на вторичном зеркале (“облучателе”) № 2 радиотелескопа РАТАН-600.

2. ЭТАПЫ ПРОЕКТА: МАРС-1, МАРС-2, МАРС-3

“МАРС-1” (2001) — первый радиометрический модуль, исследованный в схемах:

- 1) радиометр полной мощности (РПМ);
- 2) радиометр с добавлением шумов;
- 3) модуляционный радиометр с ППГ переключателем на входе (МОД).

Модуль был разработан совместно с ОАО НПП “Сатурн” (Киев, Украина) и представлял собой миниатюрный радиометр прямого усиления (без входных трактов) со следующими параметрами: диапазон частот 27–33 ГГц, шумовая температура модуля 185 К, полное СВЧ усиление 67 дВ. Структурная схема одноканального варианта радиометра МАРС-1 приведена на Рис. 1. Габаритные размеры радиометрического модуля — 13 × 24 × 59 мм, генератора шума — 13 × 24 × 29 мм. Вход модуля волноводный (волновод 7.2 × 3.4 мм). Суммарные потери в переходе с волновода на микрополосковую линию и в согласующих цепях — около 0.7 дВ. Входной усилитель трехкаскадный, изготовлен по гибридноинтегральной технологии на РНЕМТ (Pseudomorphic High Electron Mobility) транзисторах EC2612 фирмы UMS (United Monolithic Semiconductors, Франция). Питание усилителя осуществлялось от двухполярного источника питания ±5 В. В модуляторах применены монолитные микросхемы (ММИС — Monolithic Microwave Integrated Circuit) на арсениде галлия фирмы Hewlett-Packard типа НММС-1002. В качестве выходных усилителей успешно испытаны серийные микросхемы НММС-5040 (Hewlett-Packard) и АА 038N1-00 (Alpha Ind). Полоснопропускаю-

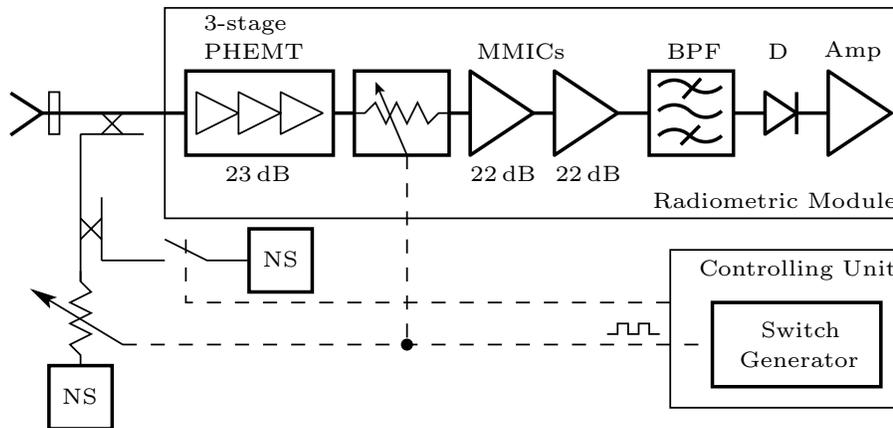


Рис. 1. Структурная схема радиометрического модуля МАРС-1 и макета приемного устройства на его основе. Здесь 3-stage PHEMT — трехкаскадный малошумящий усилитель на PHEMT-транзисторах, MMICs — усилители на монолитных микросхемах MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit), BPF (Band Pass Filter) — полоснопропускающий фильтр, D — квадратичный детектор, Amp — предварительный усилитель низкой частоты, NS (Noise Source) — источник шумового сигнала.

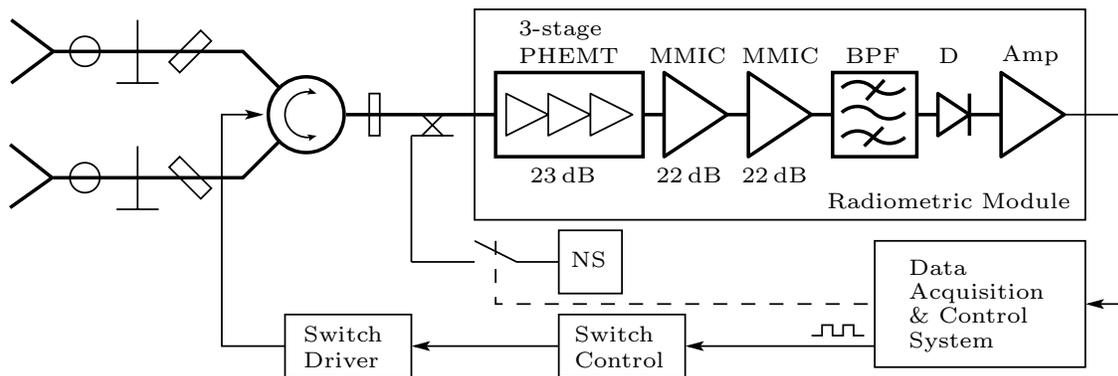


Рис. 2. Структурная схема радиометрического модуля МАРС-2 и приемного устройства на его основе (показан один из трех приемных каналов). Обозначения идентичны Рис. 1.

щий фильтр обеспечивает затухание 20 dB при отстройке на 1.5 ГГц от границ рабочего диапазона частот, изготовлен по тонкопленочной технологии на подложке из кварца толщиной 0.2 мм и помещен в канал сечением 3×1.5 мм. Детектор изготовлен на GaAs-диоде Шоттки фирмы Hewlett-Packard.

Испытания модуля в трех режимах работы показали перспективность только модуляционной схемы (МОД), в двух других режимах чувствительность оказалась в несколько раз хуже расчетной. На основе описанного радиометрического модуля был реализован модуляционный радиометр, на котором проведены пробные наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600. Была подтверждена целесообразность применения модуля в качестве одного из элементов многоканальной матричной радиометрической системы МАРС.

МАРС-2 (2003) (Рис. 2) — круглосуточно работающая более восьми лет трехканальная система

с диаграммной модуляцией. Параметры: центральная частота $f_0 = 30$ ГГц, полоса приема $B = 4$ ГГц, температура системы $T_s = 240$ К, что соответствует чувствительности $\Delta T_s = 6$ мК ($\tau = RC = 1$ с). В связи с отказом от схемы радиометра с добавлением шумов из радиометрического модуля было исключено сложное и недостаточно надежное звено — модулятор коэффициента передачи. Для реализации модуляционной схемы в НПО «Феррит-Домен» (г. Санкт-Петербург) была заказана специальная разработка — широкополосный быстродействующий ферритовый модулятор с прямоугольной петлей гистерезиса на основе Y-циркулятора. Нами был разработан и изготовлен волноводный входной тракт, состоящий из первичных облучателей, переходов с круглого сечения на прямоугольное, направленных ответвителей, устройств калибровки. Переходы с круглого на прямоугольное сечение проектировались с учетом

дальнейшего тиражирования числа каналов в виде блочной конструкции по 4 шт.

МАРС-3 (2006) — 16-канальная система с полосами приема $B = 5$ ГГц, расчетная $T_s = 210\text{--}220$ К, расчетная чувствительность $\Delta T_s = 5$ мК ($\tau = RC = 1$ с). Конструкция радиометрических модулей аналогична показанной на Рис. 2, но элементная база изменена (см. ниже). Основной элемент матричной системы МАРС-3 — модернизированный радиометрический модуль, включающий в себя все элементы классического (блочного) радиометра: входной малошумящий усилитель, выходные усилители, полоснопропускающий фильтр, согласующие устройства, СВЧ детектор, предварительный усилитель низкой частоты (ПУНЧ).

3. ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДУЛИ МАРС-3

3.1. Преимущество разработки. Концепция

Учитывая опыт эксплуатации предыдущей версии МАРС-2, было принято решение о необходимости замены элементной базы модулей на более современную, что позволило:

- 1) перейти от разработки и изготовления гибридного входного малошумящего усилителя к использованию готового монолитного, в виде ММІС, т.к. появились малошумящие “монолиты” с шумами ниже, чем у гибридной схемы;
- 2) применить в выходных каскадах “монолиты” класса “безусловно стабильные” с однополярным (вместо двухполярного) питанием и со значительно уменьшенным тепловыделением (по сравнению с использованными в МАРС-2). Шумы новых микросхем ниже, чем ранее применявшихся, что дало возможность уменьшить шумовой вклад выходных каскадов.

Центральная частота выбрана та же, что и в МАРС-2 (30 ГГц), но полоса приема увеличена с 4 до 5 ГГц. Сочетание всех парциальных улучшений позволило реализовать заметное (порядка 20%) повышение чувствительности по сравнению с МАРС-2. Всего по проекту изготовлено 20 радиометрических модулей (4 — запасные, из опыта эксплуатации предыдущей разработки) и 2 модуля генераторов шума (ГШ).

Для испытания входных малошумящих усилителей нашими украинскими партнерами изготовлен специальный тестовый модуль, в составе которого микросхемы фирмы FUJITSU были испытаны на работоспособность и возможность каскадирования. Предварительные результаты оказались вполне удовлетворительными: усиление 20–25 dB в расчетной полосе и шумы 160–170 К (для двухкаскадного модуля с 0.25 dB потерь во входном волноводнополосковом переходе).

3.2. Измерения эффективной шумовой температуры модулей

Измерения проводились *двухточечным методом* путем подключения на вход радиометрического модуля согласованной нагрузки при температуре окружающей среды T_0 и при температуре жидкого азота, (при этом шумовая температура нагрузки составила $T_c = 85$ К). По измерениям шумы модулей близки к расчетным и лежат в пределах 160–180 К.

Приведем составляющие средней шумовой температуры системы.

- 1) Антенна на средних углах (северный сектор): около 30 К.
- 2) Входной волноводный тракт: около 20 К.
- 3) Модулятор с прямыми потерями 0.3 dB: около 20 К (обратные потери модуляторов лежат в диапазоне 20–22 dB).
- 4) Радиометрический модуль: 160–180 К.

Таким образом, температура системы (T_s) составляет 230–250 К, что соответствует расчетной чувствительности около 5 мК при постоянной времени выходного RC-фильтра $\tau = RC = 1$ с.

4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МОНТАЖ СВЧ БЛОКА

4.1. Концепция

При разработке СВЧ блока учитывались следующие условия:

- 1) необходимость реализовать режим термостатирования при обеспечении отвода избыточного тепла от собственного тепловыделения;
- 2) целесообразность размещения ГШ в термостатированном объеме блока;
- 3) возможность разводки питания каждого модуля от общей шины питания;
- 4) возможность установки четырех или шести крупногабаритных разъемов для подвода кабелей управления модуляторами и питания термостатов;
- 5) необходимость технологических и конструктивных решений, позволяющих оперативно реализовать переход от регистрации параметра Стокса U к Q и обратно;
- 6) возможность и удобство проведения ремонтных работ.

4.2. Конструкция

Из всех рассмотренных вариантов конструкции была выбрана, как наиболее оптимальная, компоновка с расположением модуляторов и модулей попеременно по разные стороны от проекции фокальной линии. Из вариантов расположения — в перпендикулярной к оси рупора плоскости или под некоторыми углом к ней — выбран первый.

От расположения под некоторым углом к перпендикулярной плоскости пришлось отказаться из-за усложнения формы соединительных волноводов от волноводных переходов к модуляторам: помимо изгиба появляется необходимость скручивания.

5. ИСПЫТАНИЯ ВХОДНЫХ ФЕРРИТОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ И БЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЯТОРАМИ

5.1. Концепция

Опыт использования переключателей и контактов с разработчиками ферритовых изделий (НПО “Феррит”, Санкт-Петербург) показали, что разработка и изготовление серии из 20 шт. быстродействующих волноводных ферритовых переключателей с магнитной памятью возможны, причем с некоторым улучшением параметров: полоса частот может быть расширена с 4 до 5 ГГц без увеличения активных потерь.

5.2. Разработка и наладка

Разработчиками успешно изготовлено по нашему техническому заданию 20 экземпляров уникальных волноводных управляемых переключателей (модуляторов) на основе циркуляторов с магнитной памятью. В лаборатории Санкт-Петербургского филиала САО был собран специальный стенд для входного контроля и исследования характеристик этих приборов. Для каждой смежной пары плеч в широкой полосе и при паспортном токе управления измерялись прямые потери, развязка и КСВН, всего 180 документированных циклов измерений. Подтверждено соответствие всех изделий техническому заданию.

Схема блока управления модуляторами (БУМ) переработана (по сравнению с вариантом для МАРС-2) из-за резкого увеличения количества модуляторов. Минимизировано число органов управления, упрощена процедура установки режима модуляции, изменена схема питания.

Двадцать “парциальных” субблоков управления модуляторами обеспечивают импульсный знакопеременный сигнал управления (до 10 А при длительности около 3 мкс). Проработана компоновка субблоков в единый блок и проведены комплексные испытания (исследование возможных паразитных связей). Блок управления вместе с самими ферритовыми переключателями удерживают заданные режимы работы и высокую стабильность параметров в течение пяти лет эксплуатации.

5.3. Лабораторные испытания термостата

Термостатирование достаточно большого СВЧ блока представляет собой довольно сложную задачу. Так как блок устанавливается целиком на фокальной линии вторичного зеркала, т.е. на открытом воздухе, следует предусмотреть хорошую термоизоляцию наружных стенок корпуса блока. Монтажная плита, на которой установлены входные тракты и радиометрические модули, термически изолирована как от основания, так и от верхней крышки. Для термостатирования такой системы потребовалась установка шести исполнительных элементов терморегулирования. Исполнительные элементы питаются от трех первичных источников питания (27 В, 5 А каждый). В рабочем состоянии точность терморегулирования составляет 1°C на заданном уровне (35°C).

6. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСА МАРС-3

6.1. Методика измерений

Сигнал с выхода квадратичного детектора (КД) модуляционного радиометра должен быть обработан синхронным детектором (СД). В основе метода измерений на комплексе МАРС-3 лежат операции *скоростная оцифровка – цифровое синхронное детектирование* (ЦСД) сигналов радиометров, введенные на РАТАН-600 ранее ([3, 4]), взамен операциям *аналоговое синхронное детектирование* (АСД) – *оцифровка*. Вкратце, суть метода заключается в скоростной оцифровке сигнала с последующим, синхронным с частотой модуляции, разделением в цифровом сигнальном процессоре (ЦСП) сигнала радиометра на две части, соответствующие двум полупериодам модуляции. Далее два полученных сигнала с одного радиометра вычитаются и производится понижение частоты дискретизации (децимация) до требуемой.

В дополнение к данному методу на комплексе МАРС-3 впервые на РАТАН-600 в штатном режиме применен метод *отложенного цифрового синхронного детектирования* (ОЦСД, термин авторов), когда вычитание сигналов полупериодов модуляции не производится, а вместо этого указанные сигналы регистрируются как независимые информационные каналы. Вычитание может производиться по желанию наблюдателя в постобработке данных.

Метод ОЦСД дает дополнительную информацию, которая в методе ЦСД полностью терялась. Здесь необходимо отметить, что оцифровка сигнала производится вместе с постоянной составляющей напряжения на выходе КД. Тогда постоянные составляющие сигналов отдельных полупериодов

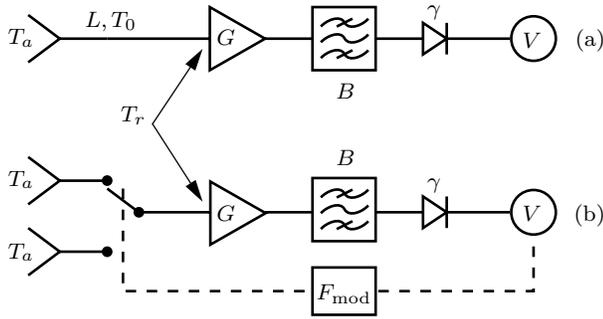


Рис. 3. Упрощенные блок-схемы радиометров. (а) — радиометр полной мощности. Здесь B — ширина СВЧ полосы радиометра, G — полное усиление радиометра по мощности, γ — коэффициент преобразования мощности в напряжение на квадратичном детекторе, L — абсолютные потери во входном тракте, измеряемые как отношение мощности на входе линии с потерями к мощности на ее выходе (P_{in}/P_{out}), $L > 1$, T_0 — физическая температура линии с потерями (входного тракта), T_a — антенная температура, (эквивалентная шумовая температура (ЭШТ) излучения, поданного на вход радиометра), T_r — ЭШТ радиометра. (б) — радиометр с диаграммной модуляцией. Обозначения аналогичны рисунку (а), блок с обозначением F_{mod} — генератор прямоугольного управляющего сигнала “меандр” частоты F_{mod} , V — вольтметр, работающий синхронно с F_{mod} (так схематично показан синхронный детектор).

модуляции дают информацию о полной температуре системы радиотелескоп+радиометр (T_s) и ее вариациях в зависимости от различных внешних и внутренних факторов, а также информацию о флуктуациях радиометра вида $1/f$, где f — частота. Таким образом, произведен переход к “абсолютным” измерениям сигналов радиометров, вместо “относительных” измерений (как в методах вычитанием сигналов полупериодов в АСД и ЦСД).

Сравним сигнал и шум отдельных полупериодов модуляции с сигналом и шумом *радиометра полной мощности* (РПМ). Напряжения на выходе РПМ (Рис. 3а) записывается как:

$$V = kB G \gamma \left[\frac{T_a}{L} + T_0 \left(1 - \frac{1}{L} \right) + T_r \right] + V_0(t), \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, B — ширина СВЧ полосы радиометра, G — его полное СВЧ усиление, γ — коэффициент преобразования мощности в напряжение на квадратичном детекторе, T_a — шумовая температура излучения, пришедшего на вход радиометра, T_r — шумовая температура радиометра, $V_0(t)$ — *паразитное смещение* напряжения, возникшее в измерительной системе (после квадратичного детектора). Формула (1) не учитывает флуктуаций коэффициента передачи и флуктуаций шумовой температуры радиометра (*идеальный радиометр полной мощности*), но учитывает абсо-

лютные потери в антенно-фидерном тракте (АФТ) L ($L > 1$), равные отношению входной мощности к выходной (для тракта), а также учтено паразитное смещение измерительной системы ($V_0(t)$). В работе [5] показано, как на практике, в реальной системе сбора данных и управления (ССДиУ) на РАТАН-600, устранено слагаемое $V_0(t)$. Поэтому в дальнейших выкладках оно участвовать не будет.

В практических наблюдениях требуется калибровка радиометра, чтобы его показания отражали изменения T_a . В квадратных скобках формулы (1) стоит эквивалентная шумовая температура системы радиотелескоп+радиометр, приведенная ко входу малошумящего усилителя радиометра. Процедура калибровки приводит эту температуру ко входу АФТ радиометра и сводится к отысканию калибровочного множителя

$$c = \frac{k B G \gamma}{L}. \quad (2)$$

Тогда:

$$V/c = T_s = T_a + T_0(L - 1) + L T_r. \quad (3)$$

В правой части формулы (3) стоит температура системы радиотелескоп+радиометр, приведенная ко входу всего радиометра, включая АФТ (далее — температура системы). Применив найденный калибровочный коэффициент к измеренному напряжению можно записать полную температуру системы и ее вариации в РПМ:

$$\begin{cases} T_s = T_a + T_0(L - 1) + L T_r, \\ \delta T_s = T_s \sqrt{\frac{2 \Delta F}{B}}, \end{cases} \quad (4)$$

где ΔF — *эквивалентная шумовая полоса* (ЭШП) по мощности фильтра нижних частот (ФНЧ) на выходе радиометра.

На практике на выходе РПМ регистрируется напряжение, которое вместе с его вариациями равно:

$$\begin{cases} V = c \times T_s, \\ \delta V = c \times T_s \sqrt{\frac{2 \Delta F}{B}}. \end{cases} \quad (5)$$

Рассмотрим блок-схему радиометра с диаграммной модуляцией (Рис. 3б). Шум в каждом из полупериодов будет в $\sqrt{2}$ раз больше, чем в предыдущем случае, для радиометра полной мощности. С учетом этого, аналогично формуле (5) для полупериодов модуляции модуляционного

радиометра можно записать:

$$\begin{cases} V_1 = c_1 T_{s1}, \\ \delta V_1 = 2 V_1 \sqrt{\Delta F/B}, \\ V_2 = c_2 T_{s2}, \\ \delta V_2 = 2 V_2 \sqrt{\Delta F/B}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $c_i = kBG\gamma/L_i$, $T_{si} = T_{ai} + T_0(L_i - 1) + L_i T_r$, ($i = 1, 2$ — номер полупериода). Это и есть измеряемые напряжения и их средне квадратичные отклонения (СКО).

6.2. Стандартное синхронное детектирование

Выходной сигнал синхронного детектора стандартного модуляционного радиометра — это всегда только разность напряжений $\Delta V = V_1 - V_2$. Именно поэтому в модуляционных радиометрах на выходе применялись видеосуилители, а не усилители постоянного тока. Тогда

$$\Delta V = c_0 \left[\frac{T_{a1}}{L_1} - \frac{T_{a2}}{L_2} - T_0 \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right) \right] \quad (7)$$

(здесь и далее $c_0 = kBG\gamma$). Формула (7) показывает, насколько важно в радиометре с диаграммной модуляцией физическое равенство потерь L_1 и L_2 . Рассмотрим три случая.

Случай 1. $T_{a1} = T_{a2} = T_a$. Тогда:

$$\Delta V = c_0 (T_a - T_0) \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right) = \Delta V_p, \quad (8)$$

где нижний индекс “p” в ΔV_p означает “parasitic”. В идеальном случае (при равенстве потерь) эта разность должна быть равна нулю. В противном случае (потери различны) на выходе СД появляется паразитный сигнал (8), который на больших масштабах времени отразит изменение физической температуры T_0 .

Случай 2. $T_{a1} = T_a + T_{src}$, $T_{a2} = T_a$ (сигнал от радиосточника T_{src} в первом рупоре). Тогда разность будет

$$\Delta V_+ = \Delta V_p + c_0 \frac{T_{src}}{L_1}. \quad (9)$$

Случай 3. $T_{a1} = T_a$, $T_{a2} = T_a + T_{src}$ (сигнал от радиосточника T_{src} во втором рупоре). Тогда разность будет:

$$\Delta V_- = \Delta V_p - c_0 \frac{T_{src}}{L_2}. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) дают расчетную асимметрию амплитуд радиосточника, измеренных по разностному сигналу ΔV относительно среднего значения ΔV_p , которое определяется формулой (8). Чем

меньше разность потерь L_1 и L_2 , тем эта асимметрия меньше и тем меньше паразитный сигнал ΔV_p .

Входные рупора радиометра пространственно расположены на минимально возможном расстоянии. Пусть антенна радиотелескопа неподвижна, и за счет вращения Земли сигнал от радиосточника последовательно появляется в первом и втором рупорах (случай стандартных наблюдений в “пассажном” режиме на РАТАН-600). Итак, модуль амплитуды отклика на радиосточник для первого рупора будет:

$$\Delta V_{+,src} = c_0 \frac{T_{src}}{L_1}, \quad (11)$$

и для второго:

$$\Delta V_{-,src} = c_0 \frac{T_{src}}{L_2}. \quad (12)$$

Существует единственный способ максимально приблизить потери в двух трактах радиометра с диаграммной модуляцией — физически их выравнять. В случае с радиометрическим комплексом МАРС-3 это означает изготовление 16-ти пар входных трактов, где в каждой паре максимально близкие потери. Кроме того, в каждом радиометре на входе установлен ферритовый циркуляторный переключатель, и необходимо обеспечить равенство потерь в его плечах. Данные задачи решены в комплексе МАРС-3 максимально эффективно, однако, небольшие остаточные разности потерь все же могут остаться. При этом $T_a/L_1 \neq T_a/L_2$, и если поставить целью не полностью устранить влияние разности потерь на T_s , а только влияние этой разности на T_a , то необходимо знать отношение L_1/L_2 , для чего существует два способа.

1) Полная калибровка радиометра. В данном методе известный, либо неизвестный, но одинаковый калибровочный сигнал, нужно подать в каждый из входных трактов радиометра и найти либо калибровочный множитель для каждого тракта, либо их отношение. Однако, в радиометрах МАРС-3 предусмотрена подача калибровочного сигнала только в один из трактов каждого радиометра. Кроме того, абсолютная точность первичной калибровки двухточечным методом (“горячей” и “холодной” нагрузки) недостаточна для данной задачи.

2) Программный учет потерь. Этот метод будет описан в следующем параграфе.

6.3. Программный учет потерь

Как упоминалось выше, синхронное детектирование в радиометрах комплекса МАРС-3 производится методом ОЦСД. Это означает, что раздельно записываются напряжения V_1 и V_2 (6)

путем разделения сигнала радиометра во времени синхронно с частотой модуляции. Этот подход позволяет произвести требуемые дополнительные операции с двумя измеренными напряжениями V_1 и V_2 прежде чем получить разность. В случае с выравниванием потерь необходимо по измеренным напряжениям найти *отношение потерь* в трактах, например, найдя отношение $\Delta V_{+,src}/\Delta V_{-,src} = L_2/L_1$ (см. формулу (12)). Однако, на волне 1 см такое отношение по радиоисточникам брать нецелесообразно (из-за других погрешностей измерения амплитуды, связанных с точностью фокусировки системы радиотелескоп/радиометр). Вместо этого предлагается использовать флуктуации радиоизлучения облачной атмосферы, либо радионаблюдения Солнца небольшой апертурой РАТАН-600 (во избежание выхода квадратичного детектора в режим линейного детектирования). Так можно найти оценку отношения потерь

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = \frac{\widetilde{L}_2}{L_1}, \quad (13)$$

предварительно удалив фон под записью радиоизлучения выбранного облака или Солнца (отсюда и символ Δ при соответствующих напряжениях в (13)). При достаточно быстром прохождении объекта через диаграмму направленности радиотелескопа остальные составляющие T_s можно считать постоянными на протяжении измерения, и они будут удалены как фоновый сигнал. Запишем в более полном виде измеренные исходно напряжения

$$\begin{cases} V_1 = \frac{c_0}{L_1} [T_a + T_0 (L_1 - 1) + L_1 T_r], \\ V_2 = \frac{c_0}{L_2} [T_a + T_0 (L_2 - 1) + L_2 T_r]. \end{cases} \quad (14)$$

После умножения V_2 на оценку отношения потерь получим:

$$\begin{cases} V_1 = \frac{c_0}{L_1} [T_a + T_0 (L_1 - 1) + L_1 T_r], \\ V_2 \frac{\widetilde{L}_2}{L_1} \approx \frac{c_0}{L_1} [T_a + T_0 (L_2 - 1) + L_2 T_r]. \end{cases} \quad (15)$$

Как видно из (15), теперь коэффициенты при T_a одинаковы для обоих полупериодов и можно воспользоваться единым калибровочным множителем, равным $kBG\gamma/L_1$ для получения соответствующих T_s и их вычитания. Интересно также отметить, что после применения правильных калибровочных коэффициентов к сигналам отдельных полупериодов, паразитный сигнал не устранится, но будет уже совершенно другим, чем в формуле (8), а именно:

$$\Delta T_s = (T_0 + T_r)(L_1 - L_2), \quad (16)$$

что опять подчеркивает важность физического равенства потерь в трактах радиометра с диаграммой модуляцией.

6.4. Конструкция системы сбора данных и управления комплекса МАРС-3

Блок-схема ССДиУ показана на Рис. 4. Система выполнена на основе четырех 4-канальных подсистем ER-DAS, представленных в работе [5]. Все четыре подсистемы синхронизированы между собой для обеспечения единой частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и для синхронного детектирования с единой частотой модуляции, которая подается на все входные модуляторы радиометров одновременно. Поэтому одна из подсистем ER-DAS является ведущей (master), остальные три — ведомыми (slave). Выходные оцифрованные и обработанные сигналы всех радиометров (каждого из полупериодов модуляции) передаются по сети Ethernet к управляющему компьютеру ССДиУ. Управление радиометрами также осуществляется по сети Ethernet (модуляция, калибровка). Модули АЦП (Рис. 4) максимально приближены к выходам радиометров. Процессорные модули гальванически развязаны с модулями АЦП, что устраняет наводки сильных импульсных подсистем на прецизионные и малошумящие аналоговые цепи.

Частота регистрации сигналов (F_s) каждого радиометра составляет 32 768 Гц. Частота модуляции равна $F_s/256 = 128$ Гц. Полоса сигнала при этом составляет 0–8000 Гц, что вполне достаточно для передачи необходимого числа гармоник частоты модуляции. Достаточно широкая выходная полоса сигнала позволяет работать при меньшем НЧ усилении (при сохранении соотношения “шум радиометра/младший значащий разряд АЦП”). Отсчеты данных с частотой F_s подаются на вход программы, реализующей алгоритм RDL (Radiometric Digital Lock-in), детально описанный в работе [5]. Выходной поток данных от RDL алгоритма — это уже сигналы отдельных полупериодов модуляции радиометра, поступающие на регистрацию с частотой $F_s/256 = 128$ Гц в НЧ полосе 0–20 Гц. В результате первичной обработки этих сигналов, окончательно в файл данных записываются отдельные сигналы полупериодов с частотой $F_s/(256 \times 6) \approx 21.3$ Гц в полосе примерно 9 Гц каждый.

7. ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОМЕТРОВ КОМПЛЕКСА МАРС-3

7.1. Чувствительность

Часовая запись сигналов двух полупериодов модуляции (для каждого из входов радиометра)

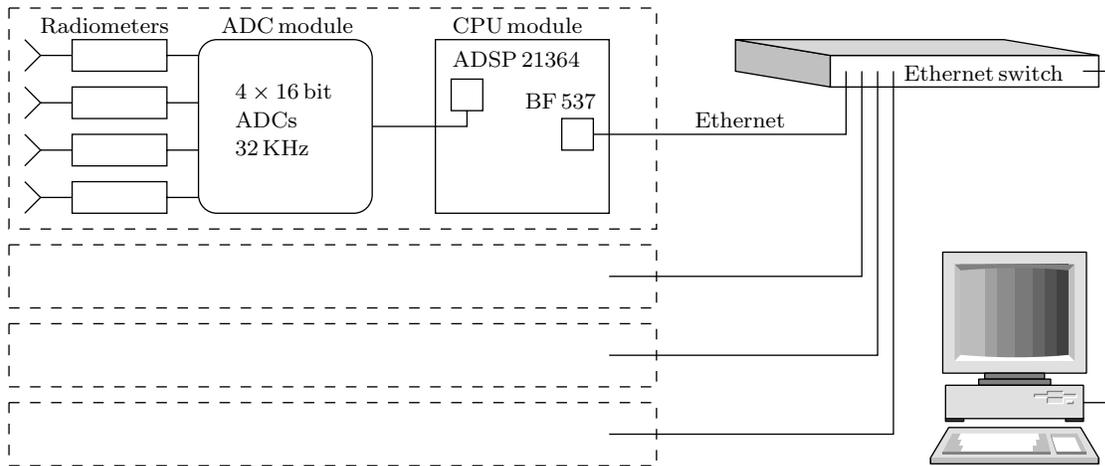


Рис. 4. Блок-схема системы сбора данных и управления 16-ти радиометров комплекса МАРС-3. Программное обеспечение микропроцессора ADSP-21364 также вырабатывает сигнал модуляции для радиометров и включает калибровочный сигнал (на схеме не показано).

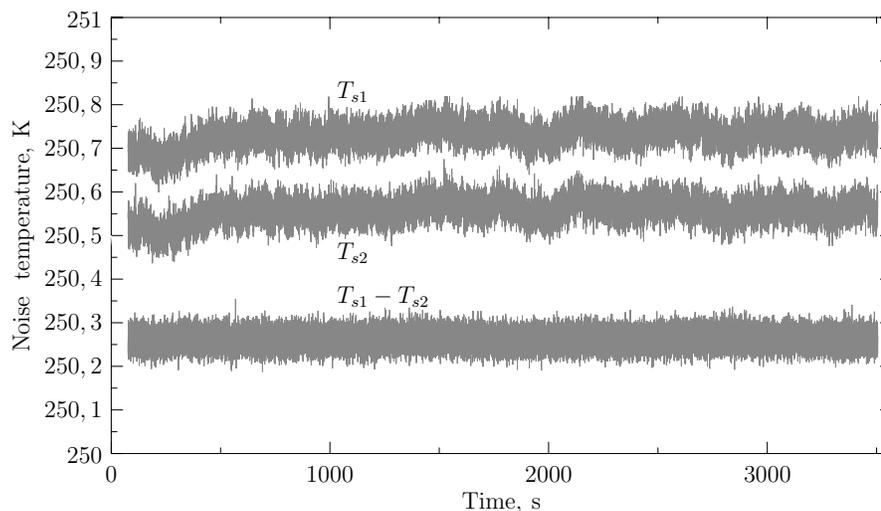


Рис. 5. Сигналы отдельных полупериодов модуляции радиометра (T_{s1} и T_{s2}) и разностный сигнал ($T_{s1} - T_{s2}$), смещенный по оси Y вверх для сравнения с исходными. Сигналы записаны в низкочастотной полосе 0–10 Гц.

приведена на Рис. 5. Эти сигналы на рисунке обозначены как T_{s1} и T_{s2} . Их разность показана там же как сигнал $T_{s1} - T_{s2}$ и позволяет найти чувствительность модуляционного радиометра. Для этого можно применить программный фильтр нижних частот с заданной ЭШП по мощности и оценить СКО результата фильтрации, а можно выполнить оценку *спектральной плотности мощности* (СПМ) для этой разности. Выберем второй способ. Оценка СПМ сигнала приведена на Рис. 6 и обозначена как $S_{MOD}(f)$. Среднее значение данной СПМ равно $0.0001 \text{ K}^2/\text{Гц}$. Извлекая квадратный корень из данной величины, получаем *спектральную плотность амплитуды* (СПА) флуктуаций на выходе модуляционного радиомет-

ра, равную $10 \text{ мК}/\sqrt{\text{Гц}}$. Данная оценка означает, что в прямоугольной энергетической полосе 1 Гц СКО флуктуаций на выходе данного модуляционного радиометра равно 10 мК. Это и есть окончательная оценка чувствительности одного радиометра комплекса МАРС-3.

Если на выходе данного радиометра установить не идеальный прямоугольный ФНЧ с полосой 1 Гц, а *идеальный интегратор* с временем интегрирования $t_i = 1 \text{ с}$ (ЭШП = 0.5 Гц, см. [6]), то СКО будет в $\sqrt{2}$ раз меньше (около 7.07 мК).

Если на выходе данного радиометра установить *интегрирующее RC-звено с постоянной времени*, равной 1 с (ЭШП = 0.25 Гц, см. [6]), то СКО будет еще в $\sqrt{2}$ раз меньше (около 5 мК).

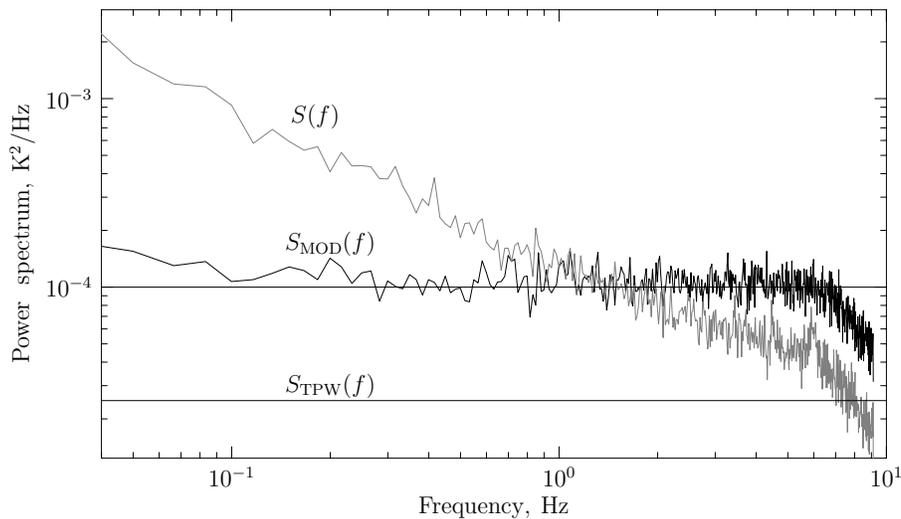


Рис. 6. Оценки СПМ одного и того же радиометра в режимах радиометра полной мощности ($S(f)$) и модуляционном режиме ($S_{\text{MOD}}(f)$). Оценка для идеального радиометра полной мощности $S_{\text{TPW}}(f)$ получена делением $S_{\text{MOD}}(f)$ на 4.

На РАТАН-600 исторически так, что чувствительность радиометров приводится именно для такого случая.

Итак, запишем результаты трех оценок:

$$\begin{cases} \sigma_{\Delta F=1 \text{ Гц}} \approx 10 \text{ мК} \\ \sigma_{t_i=1 \text{ с}} \approx 7.07 \text{ мК} \\ \sigma_{\tau=RC=1 \text{ с}} \approx 5 \text{ мК}. \end{cases} \quad (17)$$

Запись оценки чувствительности в виде первой строки (17) наиболее предпочтительна, так как позволяет верно нанести СПМ радиометра на графики СПМ других фонов, например — СМВ (Cosmic Microwave Background). Зная эту оценку, можно вычислением получить две оставшиеся. Кроме того, идеальный интегратор (вторая запись в (17)) имеет далеко не идеальную частотную характеристику (передаточная характеристика по мощности имеет вид $(\sin^2 f)/f^2$), в отдельных “боковых лепестках” которой могут остаться нежелательные спектральные составляющие не “белой” природы. Практическое получение третьей оценки в (17) связано с построением (физическим или программным) РС-фильтра. Однако, в современных системах регистрации применяются другие, более подходящие фильтры (часто — программные, как, например, в данной конструкции ССДиУ, см. [5]).

7.2. Флуктуации вида $1/f$

Оценка СПМ в режиме радиометра полной мощности одного из радиометров комплекса приведена на Рис. 6 (на рисунке обозначена как $S(f)$). Пользуясь методикой для оценки параметров шума

вида A/f^α , описанной в работе [5], найдены оценки параметров: $A = 1.744 \times 10^{-9}$ с абсолютной погрешностью не хуже 2%, $\alpha = 0.89$ с погрешностью не хуже 1%. Это позволяет построить как суммарную оценку для функции $\tilde{S}(f)$, так и для функции $\tilde{S}_g(f)$:

$$\tilde{S}_g(f) \approx T_s^2 \frac{1.744 \times 10^{-9}}{f^{0.89}}, \quad (18)$$

$$\tilde{S}(f) = \tilde{S}_{\text{TPW}}(f) + \tilde{S}_g(f), \quad (19)$$

где $T_s = 250 \text{ К}$, $\tilde{S}_{\text{TPW}} = T_s^2 \frac{2}{B} = 2.5 \times 10^{-5} \frac{\text{К}^2}{\text{Гц}}$ (см. Рис. 7), а нижний индекс g здесь и далее относится к шуму вида $1/f$.

7.3. “Однорупорный” вариант наблюдений

Иногда наблюдатели работают с выходными сигналами отдельных полупериодов модуляции как с самостоятельными независимыми наблюдениями. В этом случае, СПМ таких сигналов представляет собой сумму белой компоненты шума радиометра и шума вида A/f^α , аналогично режиму радиометра полной мощности. При этом, параметры A и α остаются без изменений, как описано в предыдущем параграфе, а белая компонента будет находиться в два раза выше на спектре мощности:

$$\tilde{S}_{1,2} = 2\tilde{S}_{\text{TPW}} = 2T_s^2 \frac{2}{B} = 5 \times 10^{-5} \frac{\text{К}^2}{\text{Гц}}$$

(этой СПМ соответствует СКО в полосе $1 \text{ Гц} \approx 7.07 \text{ мК}$).

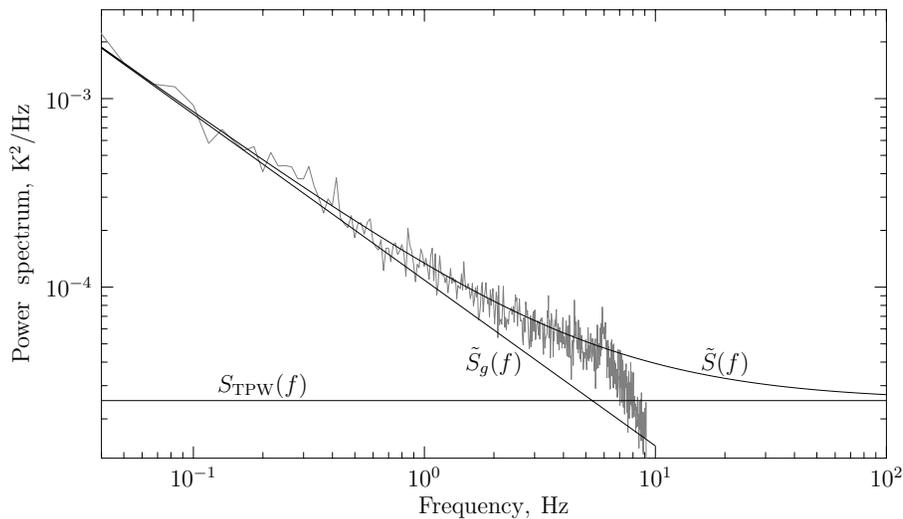


Рис. 7. Аппроксимация ($\tilde{S}(f)$) шума вида $1/f$ реального радиометра полной мощности по данным предыдущего рисунка ($S(f)$), как суммы $S_{TPW}(f)$ и $\tilde{S}_g(f)$.

В таблице приведены оценки СКО для двух вариантов “однорупорных” наблюдений по формулам:

$$\sigma_g^2 = 1.744 \times 10^{-9} T_s^2 \int_{F_1}^{F_2} \frac{1}{f^{0.89}} df, \quad (20)$$

$$\sigma_w^2 = 2 T_s^2 \frac{2}{B} [F_2 - F_1], \quad (21)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_g^2}, \quad (22)$$

где $T_s = 250$ К.

Оценки компонент шума радиометра (в “однорупорном” режиме) для двух вариантов измерений

$F1$, Гц	$F2$, Гц	σ_w , мК	σ_g , мК	σ , мК	Временной масштаб, с
0.5	3.3	11.8	14.5	18.7	0.3–2
0.1	2	9.75	17.3	19.86	0.5–10

8. О МЕТОДИКАХ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

8.1. Наблюдения точечных радиисточников

Точечные радиисточники наблюдаются каждой парой входных рупоров радиометра независимо, с последующим вычитанием сигналов каждой пары

в постобработке данных, как показано на Рис. 8а. В результате вычитания получаем сигнал модуляционного радиометра с диаграммной модуляцией, в котором эффективно подавляется шум вида $1/f$ радиометра и сигнал облачной атмосферы, если есть облака, см. сигнал $T_{s1} - T_{s2}$ на Рис. 8b. Спектр исходных записей ограничен в постобработке программным ФНЧ с ЭШП около 2 Гц, так что если СКО модуляционного радиометра в полосе 1 Гц = 10 мК (см. оценки (17)), то в полосе, которая в 2 раза шире, СКО должно быть в $\sqrt{2}$ раз больше. Это полностью совпадает с оценкой СКО (около 14 мК) реальной разностной записи $T_{s1} - T_{s2}$ (Рис. 8b).

Обращает на себя внимание ухудшение чувствительности в “однорупорных” наблюдениях даже для точечных радиисточников. Если бы шум вида $1/f$ отсутствовал, СКО записей в отдельных полупериодах было бы около 10 мК, как на нижней модельной кривой на Рис. 8b. Но реальный шум, вместе с шумом $1/f$, вдвое больше (две верхних кривых на Рис. 8b). Модуляционный способ приема устраняет шум вида $1/f$, при этом чувствительность полностью соответствует расчетной для модуляционного радиометра.

8.2. Наблюдения протяженных фонов

Центральной задачей проекта “Генетический код Вселенной” является исследование анизотропии ЗК-фона (интенсивность, поляризация) на предельно короткой волне РАТАН-600, 1 см (30 ГГц), где роль многочисленных мешающих внеатмосферных факторов минимальна (шумы Галактики, фоновые радиисточники). Одновременно

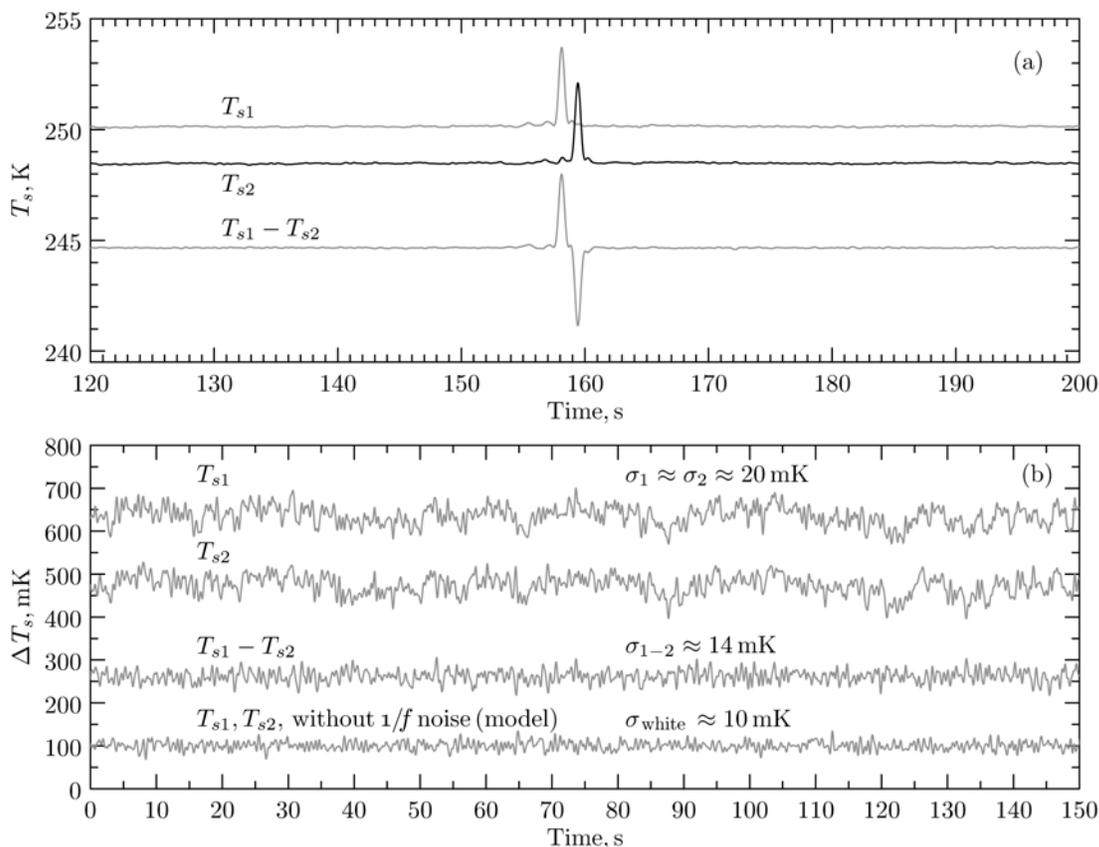


Рис. 8. Запись радиосточника 3C84 одним из радиометров комплекса МАРС-3. (а) — радиосточник в отдельных полупериодах модуляции (кривые, обозначенные как T_{s1} и T_{s2}) и результат вычитания, произведенный в постобработке, кривая $T_{s1} - T_{s2}$ (сдвинута по оси Y для наглядности). Сигналы T_{s1} и T_{s2} обработаны программным ФНЧ с ЭШП около 2 Гц с целью максимизировать отношение сигнал/шум до предела, пока полностью сохраняется форма радиосточника. (б) — шумы радиометра перед прохождением радиосточника с учетом фильтрации, описанной для (а) (с такими же обозначениями трех верхних кривых). Нижняя кривая — модельный белый шум для каждого из полупериодов T_{s1} и T_{s2} , как если бы в них полностью отсутствовал шум вида $1/f$. Оценки σ_1 и σ_2 получены при дополнительном удалении низкочастотных трендов в сигналах T_{s1} и T_{s2} , больших, чем ширина радиосточника (на рисунке тренды не удалены).

предполагается получить новую, космологически важную информацию на масштабах, недоступных основным космическим проектам (WMAP, PLANCK). В частности, интерес представляет диапазон пространственных гармоник $l > 1000$, где l — номер полиномов Лежандра в разложении T_a на сферические гармоники. Практически все исследования по анизотропии ЗК-излучения связаны со сравнением наблюдаемого спектра мощности с предсказанным спектром как в интенсивности, так и в поляризации.

8.2.1. Интенсивность

Наблюдения в интенсивности на МАРС-3 возможны пока только в режиме радиометра полной мощности, в “однорупорном” варианте наблюдений (см. выше). Первые две кривые на Рис. 8b соответствуют диапазону $10\,000 < l < 240\,000$. Таким образом, при усреднении записей от всех 32-х рупо-

ров радиометра получаем СКО в данном диапазоне пространственных гармоник около 3.5 мК за одно наблюдение в режиме пассажного инструмента.

Пространственные масштабы $l < 1000$ отягощены воздействием флуктуаций радиоизлучения атмосферы Земли, а именно — ветрового сноса облачности мимо апертуры радиотелескопа. Однако, большие линейные размеры фокальной матрицы позволяют устранить эти флуктуации благодаря тому факту, что весь атмосферный водяной пар находится в *ближней зоне* радиотелескопа (здесь мы используем преимущество большой апертуры РАТАН-600). Так что разность между сигналами разнесенных рупоров является одновременно и фильтром пространственных частот для фоновых сигналов из *дальней зоны*, и фильтром с высокой добротностью для атмосферных флуктуаций, поскольку сигнал от атмосферы одинаков для всей матрицы радиометров.

Пространственные масштабы $l > 2500$ доступны для наблюдений на комплексе МАРС-3 в безоблачную или малооблачную погоду, так что основным методом здесь является метод многократных наблюдений для увеличения отношения сигнал/шум.

8.2.2. Поляризационные наблюдения

Предполагается, что поляризация 3К-фона мала и имеет случайную ориентацию. Поэтому все группы исследователей надеются получить статистически значимые оценки поляризации, при этом дисперсия в параметре Q должна быть такой же, как в параметре U . В первой фазе проекта “Генетический код Вселенной”, который сегодня реализуется, было решено накапливать данные о параметре Q (разность интенсивности в плоскостях $+45^\circ$ и -45°). Такой выбор связан с некоторой паразитной поляризацией от Земли, намного большей флуктуационной чувствительности МАРС-3. Для регистрации U параметра были изготовлены СВЧ тракты (“скрутки”) для всех 32-х каналов в другой поляризации (вертикально-горизонтальной). Одновременная регистрация Q и U параметров на разных радиометрах была успешно опробована при прохождении диска Луны (поляризованного линейно).

Если излучение не поляризовано, то такой модуляционный радиометр регистрирует радиоизлучение только точечных источников. Для измерения поляризационных параметров излучения на достаточно больших масштабах пространственный (и соответствующий угловой) разнос рупоров одного радиометра несущественен.

Выше упоминалось, что есть небольшое различие в параметрах каналов (потери L), регистрирующих две плоскости поляризации. Это приводит к тому, что в разность между каналами просачивается некоторое излучение от неполяризованной атмосферы. Как показано в настоящей статье, эта проблема практически полностью устранена независимой регистрацией каналов, и атмосферный паразитный сигнал удаётся полностью, до флуктуационной чувствительности, устранить.

Шум радиометра при измерениях поляризации белый на масштабах $l > 100$ и имеет расчетное СКО (см. оценки 17). В диапазоне $100 < l < 30\,000$ СКО составляет около 5 мК. При наблюдении 16-ю радиометрами одного и того же участка неба и усреднении наблюдений получим шум с СКО около 1.25 мК.

При белой природе шума в поляризационных наблюдениях эффективно работает уменьшение СКО с увеличением размера пиксела (чего не происходит при наличии шума вида $1/f$). Так, в диапазоне $3000 < l < 10\,000$ СКО шума одного

радиометра будет уже около 2.9 мК, результат усреднения даст шум с СКО около 722 μ К.

9. ВЫВОДЫ

Радиометрический комплекс МАРС-3 разработан, изготовлен, введен в штатную работу и дает радиоастрономическую информацию на протяжении нескольких лет. Характеристики комплекса полностью соответствуют расчетным.

Обращает на себя внимание точность соответствия чувствительности расчетному значению. Чувствительность радиометра должна определяться только тремя параметрами: T_s , B и $\Delta F = F_2 - F_1$ (см., например, формулу (6)). Для радиометров комплекса МАРС-3 это так и есть.

Интерес представляет также шум вида $1/f^\alpha$. В нашем случае показатель степени $\alpha < 1$. Это интересный факт, поскольку у радиометров предыдущих поколений этот показатель был и больше единицы. Вопрос состоит в том, где предел? Насколько α может быть меньше единицы и больше нуля (белый шум)? Заметим, что это пока интегральный показатель степени для всего радиометра, включающий в себя, в основном, усилительный тракт и квадратичный детектор. Ответы на поставленные здесь вопросы могут быть даны в дальнейших исследованиях и разработках.

В работе показано, как изменения в регистрации сигналов приводят к изменениям и в методах наблюдений и обработки. Во первых, описание работы радиометра приводится теперь с учетом полной мощности принятого радиоизлучения. Регистрируются не приращения T_a , а полная T_s и ее вариации. Показано, что только при точной калибровке радиометра T_a входит в T_s с единичным коэффициентом, (см. формулы (3), и (15)). Во вторых, отдельная регистрация полупериодов позволяет активно вмешаться в процесс получения сигнала модуляционного радиометра, устраняя при этом некоторые виды паразитных сигналов.

Изменения в регистрации сигнала влияют и на конструкцию самого радиометра. Например, существует проблема регистрации интенсивности на длинных пространственных масштабах, связанная с флуктуациями вида $1/f$ радиометра. Требуется модуляционный способ приема интенсивности фонов. Для этого к одному из входов ППГ модулятора радиометра подключается либо рупор, направленный в небо, либо термостатированная согласованная нагрузка. При новом методе регистрации (ОЦСД) уже не нужно аппаратного выравнивания мощностей излучения в два полупериода модуляции, как для классического модуляционного радиометра (балансировка). Теперь данная операция может быть произведена в постобработке, так что нет необходимости в разработке и изготовлении

дополнительного оборудования балансировки смещения. Получаем новую схему радиометра: “модуляционный радиометр Дике” [6, 7] с программной балансировкой. Данный метод применяется в проекте “Планк” [8] для режима наблюдений, когда в один полупериод модуляции регистрируется сигнал измеряемого излучения, а во второй полупериод — сигнал от согласованной нагрузки сравнения (около 4 К). В работе [8] авторами отмечено, что основной способ программно сбалансировать такой радиометр — взять отношение средних уровней напряжения в отдельных полупериодах модуляции. Также отмечено, что данный метод на практике применим только в одном случае: если слагаемое $V_0(t)$ в формуле (1) полностью известно и учтено при проведении измерений. Если же это не так, и нет возможности учета этого напряжения, то задача балансировки усложняется, например, как в других способах программной балансировки радиометра, описанных в [8]. Для измерительной системы (ИС) комплекса МАРС-3 напряжение V_0 известно и не зависит от времени. В этом основное отличие ИС, применяемой в настоящей работе, от ИС проекта “Планк”, что позволяет на практике реализовать “модуляционный радиометр Дике” с простой программной балансировкой.

Данная работа является первой на РАТАН-600, в которой реализована неохлаждаемая многолучевая радиометрическая матрица с большим количеством информационных каналов. Получен большой опыт в работе с такой системой, как технический, так и методический, и этот опыт будет учтен в дальнейших исследованиях и разработках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы выполнялись при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-02-00486-а, 09-02-12169-офи-м, 11-02-12036-офи-м-2011, 11-02-00489-а) и Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.518.11.7062, 02.518.11.7167, 16.552.11.7028). Авторы выражают благодарность всем коллегам, принявшим участие в обсуждениях данной работы. Ю. Н. Коновалову и С. С. Ермоленко авторы признательны за выполнение большого объема радиомонтажных и механических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. B. Berlin, G. M. Timofeyeva, N. A. Nizhelsky, et al., *Astron. and Astrophys. Trans.* **19**, 559 (2000).
2. Yu. N. Parijskij, *Astron. and Astrophys. Trans.* **19**, 265 (2000).
3. P. G. Tsybulev, A. B. Berlin, N. A. Nizhel'skij, et al., *Astrophysical Bulletin* **62**, 193 (2007).
4. P. A. Fridman, E. V. Bulaenko, and S. V. Tuzenko, in *Proc. First Int. Conf. and Exhibition, Digital Signal Processing and its Applications, Moscow, Russia, 1998*, III-E-55-66.
5. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
6. M. Tiuri, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation* **12**, 930 (1964).
7. R. H. Dicke, *Review of Scientific Instruments* **17**, 268 (1946).
8. A. Mennella, M. Bersanelli, M. Seiffert, et al., *Astronom. and Astrophys.* **410**, 1089 (2003).

MARS-3 Matrix Radiometric System for RATAN-600

A.B. Berlin, Yu.N. Parijskij, N.A. Nizhelkij, M.G. Mingaliev, P.G. Tsybulev, D.V. Kratov, R.Yu. Udovitskiy, V.V. Smirnov, O.M. Pylypenko

The MARS-3 third-generation matrix radiometric system has been developed, manufactured, and is currently being used in observations within the framework of the “Cosmological Gene” program. The system is based on new hardware components and consists of 16 independent radiometers (32 horns with a step of 20 mm). Each pair of horns is connected to the input of an amplifier unit via a square-loop modulator. The parameters of each radiometer are: central frequency, 30.0 GHz; bandwidth, 5 GHz; average noise temperature of the system, 250 K; and a sensitivity of about 5 mK for $\tau = RC = 1$ s.

Keywords: *instrumentation: detectors*