

УДК 520.27+520.874

ТЕКУЩИЙ ЭТАП РАЗРАБОТКИ ПРИЁМНОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН»

А. В. Смирнов^{1,2}, *А. М. Барышев*³, *П. де Бернардис*⁴, *В. Ф. Вдовин*^{1,5,6},
Г. Н. Гольцман^{1,2}, *Н. С. Кардашёв*¹, *Л. С. Кузьмин*^{6,7}, *В. П. Кошелец*⁸,
*А. Н. Выставкин*⁸, *Ю. В. Лобанов*², *С. А. Рябчун*², *М. И. Финкель*^{1,2}, *Д. Р. Хохлов*⁹

¹ Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва;

² Московский педагогический государственный университет, г. Москва, Россия

³ Netherlands Institute for Space Research (SRON), Groningen, the Netherlands

⁴ Sapienza University of Rome, Rome, Italy

⁵ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

⁶ Нижегородский технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

⁷ Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

⁸ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва;

⁹ Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

В статье представлен обзор состояния бортового приёмного комплекса космической обсерватории «Миллиметрон» на этапе разработки его эскизного проекта. Рассмотрены основные параметры бортовых приборов, планируемых для создания и проведения астрофизических наблюдений. Проведён обзор когерентных и некогерентных детекторов, являющихся центральным элементом каждого из приёмников обсерватории, представлены их характеристики и предельные параметры, реализуемые на современном уровне развития технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие радиоастрономии во второй половине XX столетия привело к революционным изменениям в понимании структуры Вселенной и происходящих в ней процессов, а открытия этого времени ещё больше стимулировали развитие техники наблюдений и приборостроения. Всё это продвинуло радиоастрономические исследования в недоступный ранее терагерцовый диапазон, представляющий огромный интерес, поскольку многие молекулярные соединения, важные для астрофизических процессов и планетарных наук, имеют чётко выраженные вращательные или колебательные линии излучения или поглощения в данном диапазоне частот. С тех пор был достигнут значительный прогресс в области создания различного рода наземных и бортовых телескопов, обеспечивающих эффективные радиоастрономические наблюдения в коротковолновой части миллиметрового (ММ) и субмиллиметрового (СубММ) диапазонов длин волн. Тем не менее, в связи с физическими и технологическими ограничениями, возникающими при построении больших антенн с заданным качеством поверхности, уже тогда был сделан акцент на развитии альтернативных путей регистрации полезного сигнала и, как результат, повышение отношения сигнал/шум. Наиболее интересными и перспективными путями развития астрофизики являются: построение интерферометров, таких, как VLBA, EVLA, SMA и ALMA, что позволяет достичь лучших угловых разрешений, и запуск обсерваторий космического базирования (например, IRAS, ISO, «Spitzer», AKARI, WMAP, «Herschel», «Planck», «Спектр-Р», SPICA, BPOL, JWST и др.), целью которых является регистрация предельно слабых сигналов, не наблюдаемых с поверхности Земли в силу значительного атмосферного поглощения во всём интересующем нас диапазоне частот.

А. В. Смирнов, А. М. Барышев, П. де Бернардис и др.

617

Проект «Миллиметрон» включает в себя разработку, создание, запуск и эксплуатацию (управление приёмными системами, считывание и обработку данных) космической обсерватории «Миллиметрон» со сверхвысокой чувствительностью в миллиметровом, субмиллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра.

1. КЛЮЧЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ТЕЛЕСКОПА

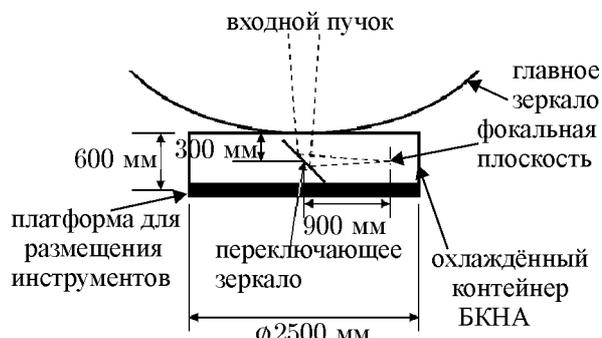


Рис. 1. Расположение охлаждаемого контейнера относительно главного зеркала.

Приёмная оптическая система космической обсерватории состоит из охлаждаемого до 4,5 К главного зеркала, состоящего из цельной центральной части (диаметр 3 м) и раскрывающихся лепестков, образующих зеркало с общим диаметром 10 м, контррефлектора и переключающего зеркала, которое направляет принимаемое излучение на выбранный приёмник. Все приёмники располагаются внутри криоконтейнера бортового комплекса научной аппаратуры (БКНА), система рефрижераторов позволяет устанавливать на каждом из приёмников определённую

эксплуатационными характеристиками температуру от 0,1 до 4 К. В другом контейнере БКНА, температура которого составляет порядка 300 К, находятся управляющая электроника, блоки питания и система радиосвязи с Землёй для передачи экспериментальных данных. Изоляция антенны и криоконтейнера от солнечного излучения осуществляется с помощью пассивно-активной системы охлаждения из 11 экранов, всегда обращённых к Солнцу [1]. Температура внешнего, самого дальнего от антенны экрана составит примерно 300 К, температура наиболее близкого к антенне экрана (он предполагается с активным охлаждением) составит примерно 4,5 К. Финальное охлаждение главного зеркала до гелиевой температуры обеспечивается за счёт использования бортовых рефрижераторов замкнутого цикла наряду с пассивной системой охлаждения.

Расположение охлаждаемого контейнера относительно главного зеркала телескопа представлено на рис. 1. Переключающее зеркало прецизионно и дискретно поворачивается относительно главной оси космического телескопа, занимая одну из 9 существующих позиций для подключения различных инструментов (представлены далее). Предварительный эскиз распределения инструментов в криоконтейнере БКНА представлен на рис. 2.

Блок-схема БКНА представлена на рис. 3. Базовая температура основных компонент криоконтейнера БКНА составляет порядка 4 К, при этом матрицы прямых детекторов (0,1 ÷ 1,0 ТГц и 1 ÷ 15 ТГц) охлаждаются отдельно при помощи дополнительных рефрижераторов до температуры около 0,1 К, блок гетеродинов и усилителей промежуточной частоты расположен в области с температурой примерно 20 К. Находясь в едином криоконтейнере, перечисленные узлы, имеющие различные уровни криостатирования, теплоизолированы как друг от друга, так и от элементов антенной системы телескопа. Блоки питания, управления, аналого-цифрового преобразования (АЦП) сигнала и цифровой обработки данных и их передачи на Землю расположены в неохлаждаемом контейнере.

По разрешению приёмные комплексы обсерватории можно разделить на две группы — приёмники низкого и высокого спектрального разрешения. В качестве приёмного элемента (детектора) в приёмниках низкого разрешения используются болометры, имеющие отклик, как правило, в широкой полосе частот. На обсерватории планируется использовать два фурье-спектрометра, один для диапазона 0,1 ÷ 1,0 ТГц и второй для диапазона 1 ÷ 15 ТГц, идеология и структура

Рис. 2. Предварительный эскиз распределения инструментов в фокальном криоконтейнере БКНА. Цифрами обозначены: 1 — спектрометр высокого разрешения, включающий каналы радиointерферометра РСДБ-2 диапазонов 211÷275 ГГц, 602÷720 ГГц и 787÷950 ГГц, 2 — блок гетеродинов и усилителей промежуточной частоты, 3 — блок стандарта частоты. РСДБ-1 — приёмники комплекса интерферометра Земля–космос диапазонов 18÷26 ГГц; 31÷45 ГГц и 84÷116 ГГц, пунктирные линии обозначают направление переключающего зеркала при работе с соответствующим инструментом. В процентах показано относительное время, планируемое для наблюдений с помощью конкретного инструмента

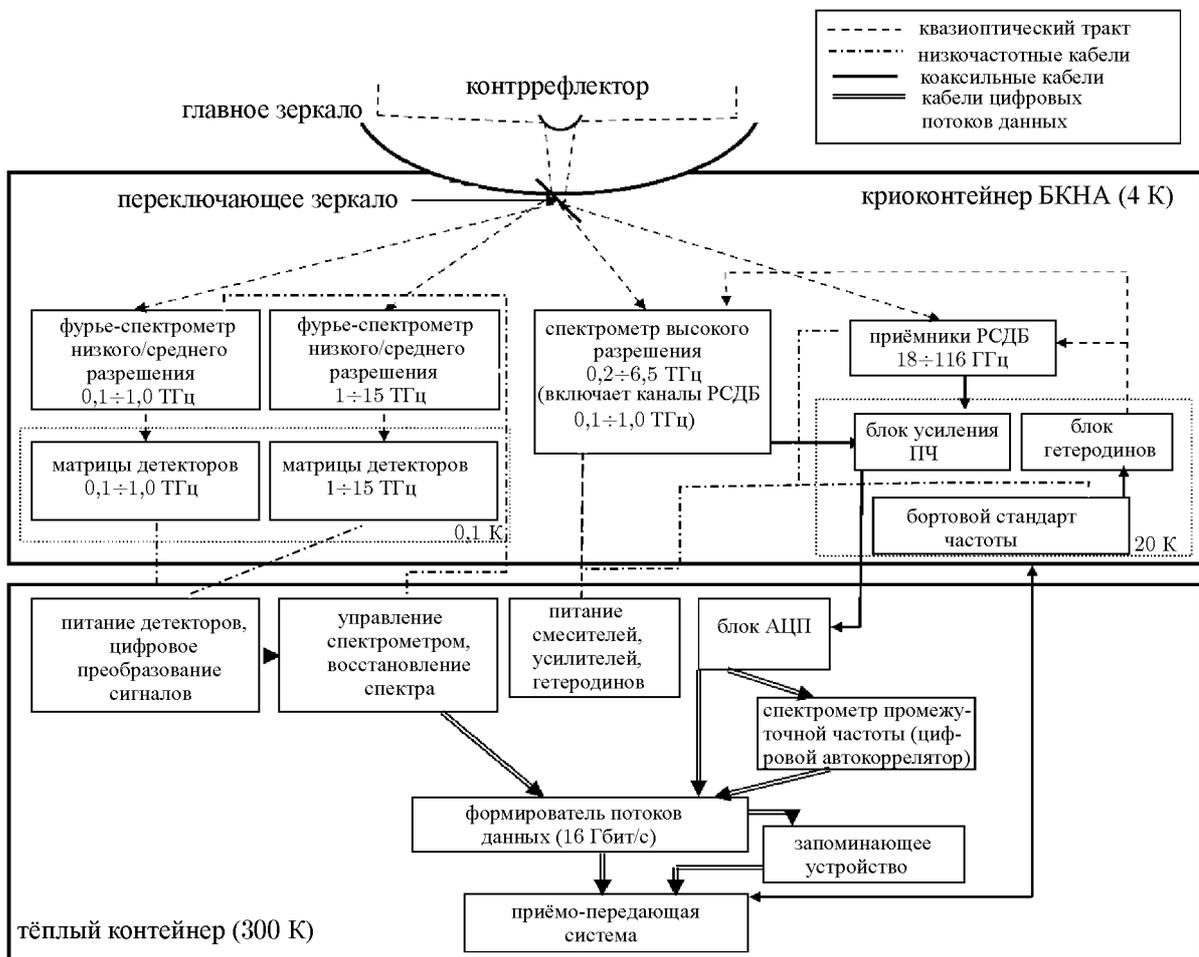
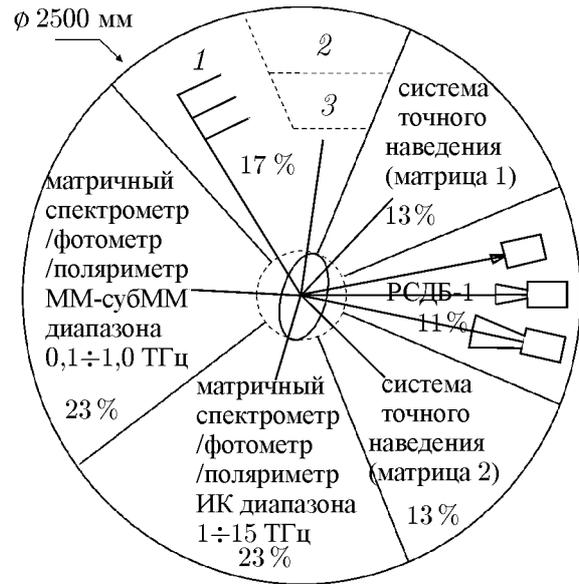


Рис. 3. Блок-схема БКНА космической обсерватории «Миллиметрон»

квазиоптики спектрометров предложены специалистами Римского университета совместно с ведущей организацией, ответственной за создание приёмного комплекса, Институтом космических

исследований (SRON, Голландия). Спектрометры будут оснащены матрицами прямых детекторов соответствующих диапазонов, разработка которых ведётся как в России (МГПУ, МГУ, ИРЭ РАН, НГТУ), так и за рубежом (SRON, CUT, JPL и др.). Приёмники высокого разрешения разделены на две группы: $18 \div 116$ ТГц — приёмники для радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ), $0,2 \div 6,5$ ТГц — спектрометр высокого разрешения, включающий каналы РСДБ в диапазоне $0,2 \div 1,0$ ТГц. Если для первой группы приёмников, классических супергетеродинов с малозумящим усилителем высокой частоты на входе, основой является именно усилитель, то центральным элементом когерентного приёмника высокого разрешения на длинах волн $1 \div 2$ мм и короче является смеситель.

Матричный спектрометр/фотометр/поляриметр инфракрасного диапазона включает в себя фурье-спектрометр низкого/среднего разрешения и матрицы детекторов. Назначение инструмента — проведение исследований непрерывного спектра и широких спектральных линий в диапазоне $1 \div 15$ ТГц. Основными научными задачами этого приёмника являются исследование галактических и внегалактических объектов, облаков космической плазмы, газа и пыли, процессов образования и эволюции планет, звёзд и галактик. Несомненную новизну и интерес представляют собой уникальные возможности этого прибора по реализуемой чувствительности.

В табл. 1 представлены основные параметры матричного спектрометра/фотометра/поляриметра инфракрасного диапазона.

Приёмник будет состоять из матриц прямых детекторов с частотным фильтром, основанным на схеме интерферометра Маха—Цандера. Для получения чувствительности $10^{-17} \div 10^{-19}$ Вт/Гц^{0,5} технология детекторов требует глубокого охлаждения до температур ниже одного градуса Кельвина. Система охлаждения от 4 К до 100 мК входит в состав спектрополяриметра. Поляриметрия будет осуществляться стандартным методом вращающейся четвертьволновой пластины и линейного поляризатора, установленных на входе в спектрополяриметр. Спектральное разрешение прибора зависит от длины хода подвижного зеркала и будет изменяться по команде с Земли.

Конструктивно прибор будет состоять из четырёх блоков (в соответствии с четырьмя указанными в табл. 1 диапазонами), которые будут скомпонованы в одном корпусе внутри криоконтейнера в непосредственной близости от переключающего зеркала. Система управления и преобразования сигналов будет смонтирована в специальном блоке приборного контейнера платформы «Навигатор» [2].

Матричный спектрометр/фотометр/поляриметр миллиметрового/субмиллиметрового диапазона включает в себя фурье-спектрометр низкого/среднего разрешения и матрицы детекторов. Назначение инструмента — проведение исследований непрерывного спектра и широких спектральных линий в диапазоне $0,1 \div 1,0$ ТГц. Основными научными задачами этого приёмника яв-

Таблица 1. Матричный спектрометр/фотометр/поляриметр инфракрасного диапазона

Частотный диапазон, ТГц	1÷2	2÷4	4÷8*	8÷15*
Угловое разрешение, угл. с	6÷3	2÷6	6	6
Спектральное разрешение	3 или 1000			
Число детекторов в матрице	7			
Чувствительность каждого детектора, Вт/Гц ^{1/2}	$10^{-17} \div 10^{-19}$			
Чувствительность обсерватории 5σ (время накопления 3600 с)	$5 \cdot 10^{-6}$ Ян/ $1 \cdot 10^{-20}$ Вт/м ²			
Динамический диапазон, дБ	> 30			

* Диапазоны 4÷8 и 8÷15 ТГц в настоящее время находятся в стадии предварительной разработки.

Таблица 2. Матричный спектрометр/фотометр/поляриметр миллиметрового/субмиллиметрового диапазона

Частотный диапазон, ГГц	100÷200	200÷300	300÷450	720÷760
Угловое разрешение, угл. мин	1,20	0,60	0,35	0,13
Спектральное разрешение	5÷200	10÷300	15÷450	36÷750
Спектральное разрешение, ГГц	1÷20			
Число детекторов в матрице	16	64	225	1 600
Чувствительность каждого детектора, Вт/Гц ^{1/2}	$1,3 \cdot 10^{-17}$	$0,6 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-18}$	$0,8 \cdot 10^{-18}$
Чувствительность обсерватории 5 σ , Ян (время накопления 3 600 с)	$6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Динамический диапазон, дБ	50	40	40	40

ляются исследование структуры, спектра и поляризации внегалактических объектов, в т. ч. пространственных флуктуаций реликтового фона, поиск следов рекомбинации Вселенной, её «тёмного» периода расширения и первых объектов периода реионизации, исследование процесса образования звёзд и планетных систем в нашей Галактике, а также изучение некоторых объектов, спектр которых, по наблюдениям в радиодиапазоне, растёт с увеличением частоты. Потенциал обсерватории «Миллиметрон» позволяет впервые исследовать эти объекты с необычайно высокой чувствительностью.

Основные параметры матричного спектрометра/фотометра/поляриметра миллиметрового/субмиллиметрового диапазона приведены в табл. 2.

Приёмник будет состоять из матриц прямого детектирования с частотным фильтром по схеме интерферометра Мартина—Паплетта. Для получения чувствительности $10^{-17} \div 10^{-19}$ Вт/Гц^{1/2} технология детекторов требует глубокого охлаждения до температуры порядка 100 мК, которую обеспечивает система охлаждения, входящая в состав спектрополяриметра. На входе спектрометра располагается линейный поляризатор и два входных порта спектрометра, чувствительных к двум ортогональным поляризациям, и поворачиваемые четвертьволновые и полуволновые пластины, позволяющие получить все параметры Стокса. Спектральное разрешение прибора зависит от длины хода подвижного зеркала и будет меняться по команде с Земли.

Прибор размещается в четырёх блоках (в соответствии с четырьмя указанными в табл. 2 диапазонами), которые будут скомпонованы в одном корпусе внутри криоконтейнера в непосредственной близости от переключающего зеркала. Система управления и преобразования сигналов будет смонтирована в специальном блоке приборного контейнера платформы «Навигатор».

Спектрометр высокого разрешения терагерцового диапазона основан на технологиях инструмента NIFI космической обсерватории «Herschel». Для достижения высокого спектрального разрешения используется гетеродинный принцип приёма. В качестве основных элементов приёмника для спектрометра будут использованы детекторы на основе переходов сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник и болометры на основе разогрева электронов.

Основным назначением этого прибора является изучение химических и физических характеристик, а также динамики межзвёздной среды, протопланетных и протозвёздных дисков, звёзд и ближайших галактик путём детального исследования профиля атомарных и молекулярных линий излучения и поглощения. Основные параметры инструмента перечислены в табл. 3.

Диапазоны 211÷275 ГГц, 602÷720 ГГц и 787÷950 ГГц этого прибора будут использованы в системе интерферометр Земля—космос совместно с системой ALMA и другими крупными телескопами субмиллиметрового диапазона. Рабочая температура прибора будет поддерживаться

Таблица 3. Параметры спектрометра высокого разрешения терагерцового диапазона

Параметр	Типичное значение	Комментарии
Шумовая температура	40÷800 К	В зависимости от частоты
Частотный диапазон	0,2÷6,5 ТГц	Для частот выше 2 ТГц используется центральная часть главного зеркала
Спектральное разрешение	10 ⁶	—
Диапазон спектрометра промежуточной частоты	4÷12 ГГц	—
Диапазон промежуточной частоты для интерферометрических каналов	2 канала по 1,5 ГГц	—
Поляризация	Две линейных или круговых поляризации	Возможно полное восстановление параметров Стокса за счёт кросскорреляции поляризационных каналов
Количество точек в матрице	1÷7	Матричные приёмники для частот выше 600 ГГц
Чувствительность обсерватории 5σ , Вт/м ² (время накопления 3 600 с)	10 ⁻¹⁹ ÷10 ⁻²¹	—

при помощи внешней системы охлаждения, требуемый уровень температур около 4 К.

Приёмник также включает в себя систему управления, которая будет смонтирована в неохлаждаемом приборном отсеке модуля «Навигатор», и систему генераторов гетеродинов, которая будет смонтирована в промежуточной температурной зоне охлаждаемого контейнера при температуре порядка 20 К. Система аналого-цифрового преобразования с полосой 4÷12 ГГц для спектрометра и 2 канала по 1,5 ГГц для интерферометра (используются совместно с приборами комплекса интерферометра Земля—космос) будут смонтированы в тёплом отсеке. В режиме одиночного телескопа в целях разгрузки системы передачи информации на Землю поток данных с аналого-цифрового преобразователя будет предварительно обрабатываться бортовым автокоррелятором для получения спектра. В режиме интерферометра дополнительно отформатированный поток данных будет передаваться либо непосредственно на Землю, либо предварительно на бортовое запоминающее устройство.

Построение радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) космос—космос (например, «Радиоастрон»—«Миллиметрон») и Земля—космос (например, ALMA—«Миллиметрон») является одной из краугольных задач при проектировании обсерватории «Миллиметрон». РСДБ позволяет получить беспрецедентное пространственное разрешение для мощных астрономических источников, какими являются, например, активные ядра галактик. Параметры прибора приведены в табл. 4.

Предполагается, что сигнал генератора гетеродина также будет транслироваться на Землю, чтобы провести измерения фазы и стабильности бортовой системы эталонной частоты в реальном времени.

Все приёмники интерферометра будут совмещены по частоте с системой телескопа ALMA, каждый из них будет смонтирован в своём корпусе и расположен в непосредственной близости от переключающего зеркала. Это соответствует применяемым технологиям и требованиям к охлаждению. Предполагается совместное использование системы обработки сигнала промежуточной частоты со спектрометром высокого разрешения терагерцового диапазона.

Таблица 4. Параметры комплекса интерферометр Земля—космос

Параметр	Типичное значение	Комментарии
Шумовая температура, К	10÷250	В зависимости от частоты
Частотные диапазоны, ГГц	18÷26, 31÷45, 84÷116, 211÷275, 602÷720, 781÷950	Приёмники с частотой выше 200 ГГц включены в спектрометр высокого разрешения
Ширина полосы	2 канала по 1,5 ГГц	—
Поляризация	Две линейных или круговых поляризации	Возможно полное восстановление параметров Стокса за счёт кросскорреляции поляризационных каналов
Чувствительность обсерватории, Ян (полоса частот 1 ГГц, время накопления 300 с), наземное плечо ALMA или РТ-70 (Суффа)	$0,5 \cdot 10^{-3}$	На частоте 275 ГГц при шумовой температуре 50 К
	$4 \cdot 10^{-3}$	На частоте 950 ГГц при шумовой температуре 200 К

2. ПРИЁМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

2.1. БолOMETрические матрицы для построения изображений дальнего инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов длин волн

Современные болометрические приёмники на основе применения сверхпроводниковых мостиков нанометровых размеров, встроенных в сверхширокополосные планарные антенны, согласующие их с излучением и требующие для работы сверхнизких температур менее 300 мК, обладают предельно высокой чувствительностью. Рабочая температура таких детекторов достигается сорбционным охлаждением ^3He . Другим немаловажным фактором в пользу широкого использования прямых детекторов является разнообразие возможных способов мультиплексирования и возможность построения на их основе больших матриц.

В проекте «Миллиметр» в качестве основных детекторов для инструментов с низким ($R \approx 3$) и средним ($R \approx 1000$) спектральным разрешением планируется использовать болометрические приёмники. В составе проекта имеются 2 таких инструмента, первый рассчитан на диапазон частот 0,1÷1,0 ТГц, второй на диапазон 1÷15 ТГц. Использование в данном проекте основного зеркала с активным охлаждением до 4,5 К позволяет увеличить флуктуационную чувствительность радиотелескопа, вместе с тем предъявляя всё более жёсткие требования к детекторам. Эквивалентная мощность шума NEP последних должна находиться в диапазоне $10^{-19} \div 10^{-20}$ Вт/Гц^{1/2}.

Основными технологиями, способными удовлетворить требованиям проекта для данных инструментов, мы считаем следующие: детекторы на границе сверхпроводящего перехода TES (transition edge sensor) [3], детекторы на кинетической индуктивности KID (kinetic inductance detector) [4], детекторы на горячих электронах НЕВ (hot-electron bolometer) [5], детекторы на холодных электронах СЕВ (cold-electron bolometer) [6] и детекторы на основе легированного РbТе [7].

Перспективными для создания матричных болометрических приёмников являются детекторы на границе сверхпроводящего перехода — TES. Данный вид детекторов способен работать в очень широком диапазоне длин волн от видимого до ближнего инфракрасного. Основной принцип работы основан на калориметрическом методе, когда энергия фотона, поглощённого чувствительным элементом, увеличивает его температуру и соответственно увеличивает сопротивление

элемента протекающему электрическому току. Малейшие изменения тока в цепи такого детектора регистрируется СКВИД-усилителем (Superconducting Quantum Interference Device). TES-детекторы имеют постоянную времени $10 \text{ мкс} \div 10 \text{ мс}$ и требуют для своей работы сверхнизких температур менее 300 мК . Флуктуационная чувствительность данных детекторов ограничена фоновым шумом. По оценкам, изготавливаемые структуры, с очень низкой теплопроводностью и критической температурой примерно 80 мК , должны обладать чувствительностью порядка $1,7 \cdot 10^{-19} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ [8]. На сегодняшний день в лабораторных условиях они демонстрируют чувствительность порядка $3,5 \cdot 10^{-19} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ в широком диапазоне частот [9, 10]. Для улучшения термоизоляции чувствительного элемента TES-детектора увеличивают длину термических изоляторов между чувствительным элементом и холодным основанием, а благодаря их сворачиванию в виде паутины размер детектора практически не меняется. Уже продемонстрирована успешная реализация матриц TES-детекторов и их мультиплексирования — $10\,000$ элементов на телескопе наземного базирования SCUBA-2 [11], и матрицы 5×5 элементов для радиотелескопов космического базирования [12].

Необходимая чувствительность приёмников для космической обсерватории «Миллиметрон» может быть также достигнута применением в качестве чувствительных элементов детекторов на кинетической индуктивности (детектора KID), которые легко интегрируются в большие матрицы. Принцип работы этого вида детекторов основан на измерении кинетической индуктивности сверхпроводящего конденсата, которая меняется за счёт неравновесных квазичастиц, созданных электромагнитным излучением. Чувствительным элементом детектора является индуктивность, выполненная в виде сверхпроводниковой полоски, скрученной в меандр. При поглощении меандром кванта электромагнитной волны меняется кинетическая поверхностная индуктивность и поверхностное сопротивление сверхпроводниковой полоски, что меняет частоту и ширину резонанса контура. Это приводит к изменению амплитуды и фазы передаваемого по линии микроволнового сигнала. Чувствительность данных детекторов может быть повышена за счёт использования ультратонких сверхпроводящих плёнок и переходу в микроволновый диапазон рабочих частот. В этом случае кинетическая поверхностная индуктивность может быть значительной частью полной индуктивности меандра. На одной сигнальной линии можно разместить до $10\,000$ чувствительных элементов. Объём катушки индуктивности (меандра) достигает примерно 1 мкм^3 . Таким образом, на основе данной технологии можно создавать многоэлементные матрицы приёмников с большим фактором заполнения. Ещё одним несомненным преимуществом детекторов на кинетической индуктивности является простота их мультиплексирования [13, 14]. Детекторы работают при температурах, не превышающих 300 мК .

Теоретически детекторы на кинетической индуктивности на основе алюминия при температуре $T = 100 \text{ мК}$ должны показывать чувствительность порядка $10^{-20} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$, однако реально на сегодняшний день лучшие лабораторные образцы демонстрируют чувствительность на уровне порядка $10^{-16} \div 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ [4, 15].

Чувствительность детекторов на основе электронного разогрева (НЕВ), которые могут быть реализованы в виде больших матриц, уже соответствует чувствительности детекторов, планируемых к использованию для космической обсерватории «Миллиметрон». Примером являются детекторы, созданные на основе чувствительных титановых мостиков ($10^3 \times 10^3 \times 20 \text{ нм}$), интегрированных в планарную антенну, подложкой которых является высокоомный кремний [5]. Фундаментальным ограничением эквивалентной мощности шума электронно-разогревных детекторов является составляющая шума, связанная с термодинамическими флуктуациями энергии [16]. Увеличения чувствительности данных детекторов добиваются, во-первых, уменьшением объёма чувствительного мостика, используя нанолитографические методы создания субмикронных структур, и, во-вторых, понижением температуры электронной подсистемы. Уменьше-

ние последней достигается, в свою очередь, уменьшением температуры сверхпроводящего перехода T_c , поскольку температуры T_e и T_c близки в силу принципа работы сверхпроводникового электронно-разогревного детектора. Ещё одним фактором, повышающим чувствительность электронно-разогревных детекторов, служит использование эффекта андреевского отражения на контактах [17]. Уменьшение планарных размеров мостиков для увеличения чувствительности детекторов ведёт к тому, что помимо электрон-фононного взаимодействия в механизм релаксации электронной температуры начинает включаться диффузионный канал охлаждения [18]. При диффузионном механизме охлаждения мостик остывает благодаря тепловому рассеянию и последующему охлаждению высокоэнергетичных электронов на контактных площадках. Использование эффекта андреевского отражения предполагает формирование контактных площадок из сверхпроводника с большей энергетической щелью, чем для самого мостика. В рабочем режиме детектора это никак не сказывается на протекании транспортного тока через границу чувствительный мостик—контактная площадка, однако при этом высокоэнергетичные диффундирующие электроны блокируются эффектом андреевского отражения, не рассеиваясь на контакте.

Максимальная чувствительность данных детекторов, продемонстрированная в лабораторных условиях на сегодняшний день, составляет порядка $3 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{1/2} [5] для мостиков с размерами $10^3 \times 10^3 \times 20$ нм с критической температурой 360 мК. Дальнейшего увеличения чувствительности этих детекторов планируется достичь созданием более низкотемпературных мостиков.

Весьма вероятными кандидатами для приёмников космической обсерватории «Миллиметр» могут стать так называемые детекторы на холодных электронах (СЕВ). Болметры на холодных электронах представляют собой предельно компактный абсорбер в виде нормального или слабо сверхпроводящего мостика, отделённого двумя тонкими барьерами от сверхпроводящей антенны. При приложении напряжения смещения к переходу сверхпроводник—изолятор—нормальный металл только электроны с высокоэнергетичных состояний (выше энергии Ферми в металле) могут туннелировать в сверхпроводник, при этом ток, протекающий через структуру, резко зависит от электронной температуры. Вместе с тем происходит понижение температуры электронного газа в металле. Электротермическая обратная связь в данных устройствах намного больше, чем у TES-детекторов. Расчёты показывают, что данные детекторы, используя СКВИД-усилитель, могут достигать чувствительности порядка 10^{-19} Вт/Гц^{1/2} при $T = 100$ мК, 10^{-18} Вт/Гц^{1/2} при $T = 300$ мК и $2 \cdot 10^{-16}$ Вт/Гц^{1/2} при $T = 2$ К [19]. Реальные детекторы сегодня показывают менее высокую чувствительность порядка $2 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2} при $T = 100$ мК [20] и $6 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2} при $T = 280$ мК [21]. Основные трудности при создании таких детекторов заключаются в технологической сложности изготовления очень маленького чувствительного элемента с объёмом примерно $0,1$ мкм³, экстремально тонкого изоляционного барьера и создании большого числа детекторов с одинаковыми параметрами.

Перспективными с точки зрения применения в проекте «Миллиметр» также являются полупроводниковые детекторы на основе легированного РbТе [7]. Данный материал является узкощелевым полупроводником, прямая щель в L -точке зоны Бриллюэна при температуре $T = 0$ К составляет 190 мэВ. В силу отклонения от стехиометрии порядка 10^{-3} концентрация свободных носителей в данном материале $n, p \sim 10^{18} \div 10^{19}$ см⁻³. Отрицательная фотопроводимость в детекторах вызвана разогревом электронного газа и изменением подвижности электронов; положительная — генерацией неравновесных электронов с метастабильных электронных состояний и изменением концентрации свободных электронов. Большое время жизни фотовозбуждённых электронов $\tau > 10^4$ с связано с существованием барьера между локальными и зонными состояниями. Быстрое гашение сигнала задержанной фотопроводимости путём приложения сверхвысоко-частотных импульсов к детектору приводит к увеличению квантовой эффективности фотоприёмников до 10^2 и увеличению отношения сигнал/шум. Проведённые исследования зависимости

амплитуды фотоотклика данного типа детекторов от длины волны свидетельствуют о широком рабочем диапазоне частот. Лучший результат для данного типа приёмников по флуктуационной чувствительности составляет порядка $5 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{1/2} при $T = 1,57$ К и $\lambda = 350$ мкм [22].

2.2. Приёмные элементы для спектрометра высокого разрешения и РСДБ

В качестве смесительных элементов для спектрометра высокого разрешения и РСДБ-приёмников могут быть использованы смесители на основе перехода сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (для частотного диапазона до 1,2 ТГц) и смесители на эффекте электронного разогрева (для высокочастотного диапазона).

Смеситель на основе перехода сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (СИС) представляет собой планарный джозефсоновский переход, состоящий из двух слоёв сверхпроводника, разделённых тонким слоем изолятора. Для достижения оптимального режима смешения к смесителю прикладывается напряжение смещения (единицы милливольт) и постоянное магнитное поле для подавления шума, вызванного эффектом Джозефсона. Мощность гетеродина обычно составляет единицы микроватт и зависит от площади джозефсоновского перехода. Квантовая теория СИС-смесителей была подробно разработана в работах [23, 24]. Как было показано, чувствительность СИС-смесителей ограничена лишь нулевыми квантовыми флуктуациями, а значит, нижний предел шумовой температуры составляет $h\nu/k_B \approx 48$ К/ТГц, где h — постоянная Планка, ν — частота, k_B — постоянная Больцмана. СИС-смеситель является предельно чувствительным и быстродействующим и не требует большой мощности гетеродина. Ширина полосы преобразования СИС-смесителя составляет несколько десятков гигагерц [24], а полоса преобразования приёмника на его основе ограничивается лишь усилителем промежуточной частоты, обычно работающим в полосе 4÷8 ГГц [25]. Практические СИС-приёмники имеют шумовую температуру, равную 3÷5 квантовым пределам ($h\nu/k_B$) в диапазоне частот от 50 до 800 ГГц [25–28]. На частотах, близких к частоте, соответствующей энергетической щели сверхпроводника и выше, согласование СИС-элемента с принимаемым излучением представляет определённые трудности, что приводит к ухудшению чувствительности приёмника [29] и налагает ограничение на область практического применения приёмников, основанных на данной технологии.

Традиционные СИС-смесители (материал сверхпроводника Nb или NbN) широко используются на частотах до 1 ТГц (SMA, ALMA, и др.), и СИС-смесители на NbTiN до 1,2÷1,4 ТГц [30]. Как отмечалось выше, выполнение высокочастотных СИС-структур представляет собой нетривиальную технологическую задачу и требует тонкого подбора электрических и геометрических параметров структуры и используемых материалов.

Сверхпроводниковый интегральный приёмник (Superconducting Integrated Receiver, SIR) представляет собой устройство на основе джозефсоновских переходов: на микросхеме SIR размещаются приёмная антенна, сверхпроводниковый гетеродин на основе длинного джозефсоновского перехода, СИС-смеситель, гармонический СИС-смеситель, используемый в системе фазовой автоподстройки частоты для стабилизации частоты сверхпроводникового генератора [31, 32]. Таким образом, SIR является завершённым гетеродинным приёмником. В балонном проекте TELIS был использован SIR-приёмник для частот 480÷650 ГГц, разработанный и изготовленный в Институте радиоэлектроники РАН [33, 34]. Измеренные на частоте гетеродина 510 ГГц шумовая температура и предельная флуктуационная чувствительность составляют 95 К и 10 ± 1 мК соответственно [35]. SIR-структуры, как и СИС-смесители, могут быть использованы в качестве основных элементов для РСДБ-приёмников обсерватории «Миллиметрон».

Смесители на эффекте электронного разогрева (НЕВ) занимают лидирующую позицию среди когерентных детекторов на частотах выше 1 ТГц благодаря тому, что они не имеют частот-

ных ограничений по механизму смещения [36, 37]. Они обладают низкой шумовой температурой порядка 0,5 К/ГГц и относительно широкой полосой преобразования [38–43]. Мощность гетеродина, требуемая для работы смесителя в оптимальном режиме, составляет единицы микроватт и зависит от размеров чувствительного элемента. В приёмнике HIFI космической обсерватории «Herschel» НЕВ-смеситель используется для полосы частот 1410÷1910 ГГц [44]. Гетеродинные приёмники CASIMIR и GREAT на основе НЕВ-смесителей будут установлены на борту самолётной обсерватории SOFIA [45] для проведения наблюдений в частотных диапазонах 1,2÷2,1 ТГц и 1,5÷5 ТГц. НЕВ-смеситель использован в балонном проекте TELIS для наблюдений на частоте 1,8 ТГц [46]. Наземный телескоп APEX, расположенный в Чили на высоте 5105 м, использует НЕВ-смеситель для покрытия частотного диапазона 1250÷1384 ГГц [47]. Телескоп RLT (Receiver Lab Telescope), построенный Гарвард-Смитсоновским астрофизическим центром, в настоящее время один из немногих наземных телескопов, работающих на частотах 0,8÷1,5 ТГц, также использует смеситель на основе технологии НЕВ [48]. Проект «Миллиметр», разрабатываемый Астрокосмическим центром ФИАН им. П. Н. Лебедева, будет использовать НЕВ-смесители для проведения наблюдений в диапазоне 1÷6 ТГц [49]. Несмотря на неоспоримые преимущества НЕВ-смесителей по сравнению с другими приёмниками на частотах выше 1 ТГц, ведётся дальнейшая работа по оптимизации основных характеристик смесителей — шумовой температуры и полосы преобразования. В настоящее время полоса преобразования практических НЕВ-приёмников не превышает 4 ГГц [44]. Фундаментальным ограничением здесь является время релаксации электронной температуры, которое составляет порядка 50 пс.

Ещё одним направлением совершенствования НЕВ-смесителей является увеличение их рабочей частоты. Интегрирование на чипе смесителя антенны, рассчитанной на более высокие частоты, проблематично. С увеличением частоты характерный размер антенны неизбежно уменьшается, а следовательно, уменьшаются размеры контактов между антенной и чувствительным мостиком, что приводит к увеличению контактных потерь и увеличивает шумовую температуру смесителя. Поэтому перспективной является разработка НЕВ-смесителя без интегрированной планарной металлической антенны, а следовательно без контактных потерь (НЕВ-смеситель с прямым поглощением). Смеситель на горячих электронах с прямым поглощением фиксируется на плоской поверхности вытянутой полусферической линзы таким образом, чтобы плоскость чувствительного мостика совпадала с фокальной плоскостью линзы. При этом падающее излучение гетеродинного и сигнального источников фокусируется линзой в пятно, диаметр которого в фокальной плоскости определяется дифракцией. Для $\nu \sim 28,4$ ТГц (средняя часть инфракрасного диапазона) диаметр пятна составляет примерно 7 мкм. Первые исследования смесителей на горячих электронах с прямым поглощением на основе плёнки NbN с толщиной 5 нм показывают, что их шумовая температура на указанной частоте близка к 3100 К [50].

Продвижение технологии сверхпроводниковых НЕВ-смесителей в более высокочастотный диапазон от 5 до 28 ТГц возможно как со стороны высоких частот, за счёт увеличения планарных размеров смесителей с прямым поглощением при соответствующем увеличении мощности гетеродина, так и со стороны низких частот за счёт уменьшения контактных потерь смесителей с интегрированной антенной.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект создания космической обсерватории «Миллиметрон» («Спектр-М») поддержан на уровне государства и включён в российскую федеральную космическую программу. В кооперацию проекта «Миллиметрон» входит большое число организаций из ведущих мировых научных центров, разрабатывающих аппаратуру для радиоастрономических исследований в миллиметровом, субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах длин волн. Ориентировочный запуск обсерватории запланирован на 2017 год. По своей сути, применяемым технологиям и планируемым задачам исследования данный проект является беспрецедентным за всю историю радионаблюдений. В июле 2011 года состоялся успешный запуск радиотелескопа «Радиоастрон» («Спектр-Р»), развёртываемая антенна которого является прототипом антенны будущей обсерватории «Миллиметрон», а верхний частотный диапазон приёмной аппаратуры совпадает с нижним частотным диапазоном обсерватории. Запуск дал возможность в реальных условиях оценить возможность создания развёртываемой антенны с ещё большими эксплуатационными, технологическими и температурными требованиями, которые предъявляются к обсерватории «Миллиметрон».

Коллектив авторов выражает глубокую благодарность и признательность коллективу Астро-космического центра ФИАН за плодотворные обсуждения основных задач и характеристик обсерватории «Миллиметрон», а также за обсуждения различных деталей, позволивших наиболее точно описать приёмный комплекс обсерватории. Работа выполнена при поддержке со стороны Министерства образования и науки в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» (госконтракт 16.740.11.0155).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.asc.rssi.ru/millimetron>.
2. <http://www.laspace.ru/rus/index.php>.
3. Irwin K. // App. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 1998.
4. Day P. K., LeDuc H. G., Mazin B. A., et al. // Nature. 2003. V. 425. P. 817.
5. Karasik B. S., Cantor R. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. Art. no. 193503.
6. Kuzmin L. S., Devyatov I. A., Golubev D. // Proc. SPIE. 1998. V. 3465. P. 193.
7. Chesnokov S. N., Dolzhenko D. E., Ivanchik I. I., Khokhlov D. R. // Infrared Phys. 1994. V. 35. P. 23.
8. Khosropanah P., Dirks B., Parra-Borderias M., et al. // Proc. SPIE. 2010. V. 7741. Art. no. 77410L.
9. Morozov D., Mauskopf P. D., Ade P. A. R., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. P. 188.
10. Mauskopf P. D., Morozov D., Ade P. A. R., et al. // 22nd Int. Symp. Space Terahertz Technol., Tucson, USA, 2011. P. 130
11. <http://www.roe.ac.uk/ukatc/projects/scubatwo>.
12. Ferrari L., Audley M. D., de Lange G., et al. // 22nd Int. Symp. Space Terahertz Technol., Tucson, USA, 2011. P. 90
13. Monfardini A., Bideaud A., Benoit A., et al. // Astrophys. J. Suppl. Series. 2011. V. 194, No. 2. P. 24.
14. Swenson L. J., Cruciani A., Benoit A., et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. Art. no. 263511.
15. Roesch M., Benoit A., Bideaud A., et al. // 22nd Int. Symp. Space Terahertz Technol., Tucson, USA. 2011. P. 53.

16. Gershenson M., Gong D., Sato T., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79. P. 2049.
17. Андреев А. // *ЖЭТФ.* 1964. Т. 46. С. 1823.
18. Karasik B., Il'in K., Pechen E., Krasnosvobodtsev S. // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68, No. 16. P. 2285.
19. Kuzmin L. // *Proc. SPIE Conf.* 2004. V. 5498. P. 349.
20. Agulo A., Kuzmin L., Tarasov M. // *Proc. 16th Int. Symp. Space Terahertz Technol., Gothenburg, Sweden, 2005.* P. 147.
21. Tarasov M., Kuzmin L., Kaurova N., et al. // *Proc. 21th Int. Symp. Space Terahertz Technol., Oxford, UK, 2010.* P. 256.
22. Dolzhenko D. E., Ryabova L. I., Nicorici A. V., Khokhlov D. R. // *19th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", Ekaterinburg, Russia, 2011.* P. 247.
23. Tucker J. R. // *IEEE J. Quantum Electron.* 1979. V. 15. P. 1234.
24. Tucker J. R., Feldman M. J. // *Rev. Mod. Phys.* 1985. V. 57. P. 1055.
25. Tong C.-Y. E., Blundell R., Bumble B., et al. // *Proc. 7th Int. Symp. Space Terahertz Technol., Charlottesville, Virginia, USA, 1996.* P. 47.
26. Karpov A., Blondel J., Voss M., Gundlach K. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1999. V. 9. P. 4456.
27. Chattopadhyay G., Rice F., Miller D., et al. // *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.* 1999. V. 9, No. 11. P. 467.
28. Hedden A., Li H., Tong E., et al. // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest.* 2009. P. 949.
29. de Lange G., Kuipers J. J., Klapwijk T. M., et al. // *J. Appl. Phys.* 1995. V. 77. P. 1795.
30. Karpov A., Miller D., Rice F., et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2007. V. 17, No. 2. P. 343.
31. Дмитриев П. Н., Ермаков А. Б., Кинев Н. В. и др. // *Успехи современной радиоэлектроники.* 2010. № 5. С. 75.
32. Torgashin M. Yu., Koshelets V. P., Dmitriev P. N., et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2007. V. 17, No. 2. P. 379.
33. de Lange G., Birk M., Boersma D., et al. // *Supercond. Sci. Technol.* 2010. V. 23, No. 4. Art. no. 045016.
34. Kiselev O., Birk M., Ermakov A., et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2011. V. 21, No. 3. P. 612.
35. Ozhegov R., Gorshkov K., Gol'tsman G., et al. // *Supercond. Sci. Technol.* 2011. V. 24. Art. no. 035003.
36. Гершензон Е. М., Гольцман Г. Н., Елантьев А. И. и др. // *Физика низких температур.* 1988. Т. 14, № 7. С. 753.
37. Gol'tsman G. N., Semenov A. D., Gousev Yu. P., et al. // *Superconductors: Science and Technology.* 1991. V. 4. P. 453.
38. Lobanov Y., Tong C.-E., Hedden A., et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2011. V. 21, No. 3. P. 628.
39. Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. Art. no. 033507.
40. Vachtomin Yu., Finkel M., Antipov S., et al. // *Proc. 13th Int. Symp. Space Terahertz Technol. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2002.* P. 259.
41. Baselmans J. J. A., Hajenius M., Gao J. R., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. P. 1958.
42. Khosropanah P., Gao J. R., Laauwen W. M., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. Art. no. 221111.
43. Zhang W., Khosropanah P., Gao J. R., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. Art. no. 111113.
44. Cherednichenko S., Drakinskiy V., Berg T., et al. // *Rev. Sci. Instrum.* 2008. V. 79. Art. no. 034501.
45. <http://www.sofia.usra.edu>.
46. Manfred B., Georg W., de Lange G., et al. // *Proc. 21th Int. Symp. Space Terahertz Technol., Oxford, UK, 2010.* P. 195.

47. <http://www.apex-telescope.org>.
48. Marrone D. P., Blundell R., Tong E., et al. // Proc. 16th Int. Symp. Space Terahertz Technology, Goteborg, Sweden, 2005. P. 64.
49. Wild W., Kardashev N. S. // Experimental Astron. 2008. V. 23, No. 1. P. 221.
50. Maslennikov S., Finkel M., Antipov S., et al. // Proc. 17th Int. Symp. Space Terahertz Technology, Paris, France, 2006. P. 174.

Поступила в редакцию 2 сентября 2011 г.; принята в печать 30 сентября 2011 г.

THE CURRENT STAGE OF DEVELOPMENT OF THE RECEIVING COMPLEX OF THE “MILLIMETRON” SPACE OBSERVATORY

*A. V. Smirnov, A. M. Baryshev, P. de Bernardis, V. F. Vdovin, G. N. Gol'tsman, N. S. Kardashev,
L. S. Kuz'min, V. P. Koshelets, A. N. Vystavkin, Yu. V. Lobanov, S. A. Ryabchun, M. I. Finkel, and
D. R. Khokhlov*

We give an overview of the state of the onboard receiving complex of the “Millimetron” space observatory in the development phase of its preliminary design. The main parameters of the onboard equipment planned to create and required for astrophysical observations are considered. A review of coherent and noncoherent detectors, which are central to each receiver of the observatory, is given. Their characteristics and limiting parameters implemented at the present level of technology are presented.