

Научно-исследовательский радиофизический институт  
Министерства образования Российской Федерации

Препринт № 484

**АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ  
КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ  
С КАЛИБРОВКОЙ ПО ДВУХТЕМПЕРАТУРНОМУ  
ЧЕРНОТЕЛЬНОМУ ЭТАЛОНУ.**

Часть 1.

Измерительный стенд. Двухтемпературный эталон

Н. А. Дугин  
И. П. Кузнецова  
В. А. Разин

Нижегород, 2004

Дугин Н. А., Кузнецова И. П., Разин В. А. Абсолютные измерения плотностей потоков радиоизлучения космических источников с калибровкой по двухтемпературному чернотельному эталону. Часть 1. Измерительный стенд. Двухтемпературный эталон. // Препринт № 484. — Нижний Новгород: НИРФИ, 2004. 32 с.

УДК 523.164

В 2002 году в РАО НИРФИ “Старая Пустынь” восстановлен и модернизирован стенд для проведения абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения внеземных источников с калибровкой по излучению “черных” дисков с различной температурой. Одной из основных целей проводимых работ является достижение предельно малых погрешностей измерений и максимальной реализации возможностей разработанного в НИРФИ метода “черных” дисков. В 2003 году проведены первые серии измерений в частотных диапазонах 3 и 10 ГГц.

Работа состоит из трех частей.

В первой части приведено описание стенда для абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения РАО “Старая Пустынь” — параметры аппаратуры, антенной системы, калибровочного эталона и регистрирующих устройств, а также методика работы с двухтемпературным эталоном шумового радиоизлучения.

Во второй части рассмотрены факторы, влияющие на точность измерений интенсивности космических источников в радиоастрономических экспериментах, определены коэффициенты коррекции (поправки) измеряемых данных и процедура расчета общей погрешности измерений. Приведены первые результаты.

В третьей части описана система регистрации, математическое и программное обеспечение записи и обработки данных. Приведены алгоритмы обработки файлов записи сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 0729-01).

© Научно-исследовательский радиофизический институт

## ВВЕДЕНИЕ

Абсолютные измерения плотностей потоков радиоизлучения космических источников имеют принципиальное значение, т. к. позволяют определить энергетические и связанные с ними другие параметры астрономических объектов.

Для проведения абсолютных измерений плотностей потоков внеземных радиоисточников в Нижегородском научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) был предложен и детально разработан метод “черных” дисков, подробно рассмотренный в работах [1, 2]. Суть метода заключается в калибровке радиотелескопа по шумовому излучению искусственного эталона радиоизлучения, представляющего собой металлический диск, покрытый радиопоглощающим материалом; эталон имеет яркостную температуру излучения, равную температуре окружающей среды.

Развитие метода “черных” дисков шло по пути расширения сферы применимости чернотельных эталонов за счет размещения их в зоне Френеля антенн, теоретических расчетов поправок для сведения к минимуму методических погрешностей и поиску путей повышения точности измерений. Одним из таких путей является применение двух идентичных по конструкции эталонов с разной температурой. Методика абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения внеземных источников с использованием двухтемпературного эталона рассмотрена в работе [3], конструкция и результаты проверки эталона подробно описаны в работах [4–6].

Работы по эталонированию радиоисточников методом “черных” дисков в радиоастрономических обсерваториях (РАО) НИРФИ проводились с начала 60-х и были приостановлены в конце 80-х годов.

В 2002 году в РАО “Старая Пустынь” был восстановлен и модернизирован стенд для проведения абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения внеземных источников первоначально в частотных диапазонах 3 и 10 ГГц, в которых осенью 1952 года были проведены первые измерения плот-

ностей потоков радиоизлучения дискретных источников Кассиопея А, Телец А и Лебедь А [7]. Продолжение серии наблюдений на различных частотах с новым техническим оснащением важно для получения более точных данных о временных вариациях излучения остатков сверхновых Кассиопея А и Телец А, что имеет существенное значение с точки зрения исследований физических процессов в остатках сверхновых.

Настоящая работа состоит из трех частей.

В первой части приведено описание стенда для абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения РАО “Старая Пустынь” — параметры аппаратуры, антенной системы, калибровочного эталона и регистрирующих устройств, а также методика работы с двухтемпературным эталоном шумового радиоизлучения.

## **1. СТЕНД ДЛЯ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ В РАО “СТАРАЯ ПУСТЫНЬ”**

В 2002-м – начале 2003 года проведена подготовка к работе стенда для абсолютных измерений плотностей потоков мощных радиоисточников и проведены три полные серии измерений в диапазонах 3 и 10 ГГц. Стенд состоит из радиотелескопа РТ-7 с параболической антенной диаметром 7 м и отстоящей от него на 100 м 25-метровой вышки с установленным на ней двухтемпературным калибровочным эталоном. В калибровочных дисках эталона использован радиопоглощающий материал (РПМ) “Кварц-М” с коэффициентом отражения на рабочих частотах менее 1%.

На фото 1 показан общий вид стенда — радиотелескоп РТ-7 и калибровочная вышка с одним из дисков эталона в рабочем положении. На фото 2 показан момент замены одного диска на другой (вращение в плоскости, перпендикулярной лучу зрения). Фото 3 — вид эталона сбоку. На фото 4 — диск без радиопрозрачной передней стенки, для которой используется специальная ткань АНЗМ; виден РПМ “Кварц-М”. Зафиксирован мо-

мент установки термодатчиков и измерение температуры РПМ электронным термометром АТТ-2001. Фото 5 — вид технологического помещения радиотелескопа РТ-7 с пультом управления антенной, блоком управления радиометра РМ-3-10, блоком АЦП и портативной ЭВМ системы регистрации и обработки данных (РС Omnibook XE4100).

### 1.1. Приемная аппаратура

Основу приемной аппаратуры составляет модуляционный радиометр РМ-3-10, ВЧ блоки которого изготовлены нижегородским предприятием “Салют” по схеме работы [8]. Приемник состоит из блока управления и двух высокочастотных (ВЧ) блоков, соединяемых многожильным кабелем длиной 30 м от серийного радиометра ПК7-17 (рис. 1). На схеме ВЧ блока приняты следующие обозначения: М — модулятор, Ц — циркулятор, МШУ — малошумящий усилитель, Ф — фильтр, Д — детектор, САтт — согласующий аттенюатор, ЭАтт — электронный аттенюатор, ГОН — генератор опорного напряжения, СД — синхронный детектор, СФ — синхронный фильтр, ИнтУ — интегрирующее устройство, УсМ — усилитель модуляции, “термостат.” — термостабилизатор ВЧ блока. В составе блока управления: а) элементы низкочастотной схемы с усилителем постоянного тока, потенциометрами сдвига нулевого уровня (См“0”) и плавной регулировки усиления (пл. Ус), аттенюаторами регулировки усиления (3, 6 и 12 дБ), выключателем и переключателем фазы 0- $\pi$  модулятора, переключателем постоянной времени  $\tau$ ; б) переключатель приемных каналов, в) встроенный АЦП, г) блоки питания 5,  $\pm 15$  В.

Входные устройства, осуществляющие согласование с антенной, модуляцию, селективное усиление и детектирование СВЧ сигнала, имеют следующие основные технические характеристики:

— центральные частоты:  $2829 \pm 1$  МГц и  $8834 \pm 3$  МГц (погрешность определения рабочей частоты не более 0,2%);

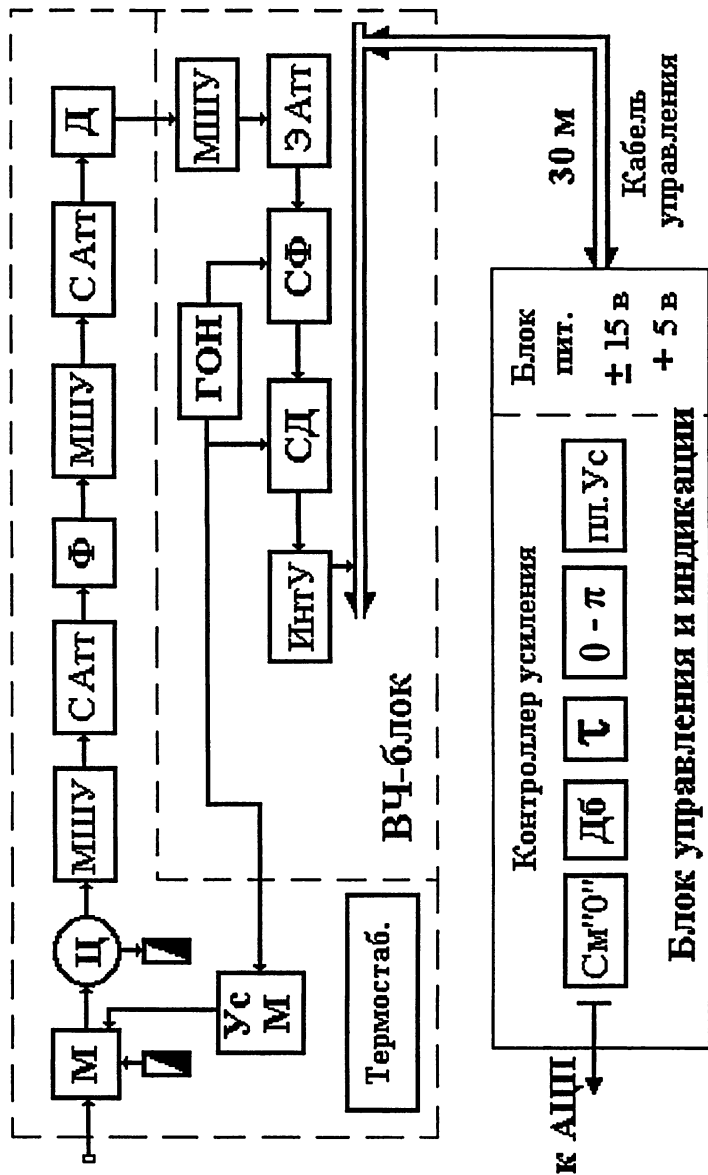


Рис.1

- длины волн — 10,6 и 3,4 см соответственно;
- полосы пропускания — 83 и 240 МГц соответственно;
- входной импеданс тракта — 50 Ом;
- флуктуационный порог чувствительности при постоянной времени 1 с:

0,07 К на волне 3,4 см,

не больше 0,1 К на волне 10,6 см;

- коэффициент усиления по СВЧ тракту — не менее 60 дБ;
- коэффициент внеполосного затухания не хуже 30 дБ;
- общая термостабилизация: температура ВЧ блока  $37^\circ \pm 0^\circ,3$ .

Выходные устройства радиометров, осуществляющие обработку сигнала после квадратичного детектора: усиление, синхронную фильтрацию, синхронное детектирование, предварительное аналоговое интегрирование, генерацию опорного сигнала с возможностью программного управления усилением, фазой опорного сигнала, постоянной интегрирования, имеют следующие основные технические характеристики [9]:

- количество шин управления — 6;
- максимальный коэффициент усиления —  $6 \times 10^4$ ;
- количество шагов изменения коэффициента усиления — 8;
- шаг изменения коэффициента усиления — 3 дБ;
- входное сопротивление — 10 кОм;
- стабильность нулевого уровня — 0,2% (в интервале температур  $-10^\circ$ –  $+40^\circ$  С);
- стабильность коэффициента усиления — 1%;
- значения постоянной времени интегрирования — 1 и 4 с;
- стабильность постоянной времени интегрирования — 0,15%;
- значение изменения фазы опорного сигнала —  $180^\circ$ ;
- номинальное значение выходного сигнала —  $\pm 1$  В;
- максимальное значение выходного сигнала —  $\pm 10$  В;
- дифференциальное выходное сопротивление  $< 50$  Ом;
- напряжение питания —  $\pm 12$  В.

Устройство управления радиометрами, позволяющее осуществлять дистанционное управление усилением, фазой опорного

сигнала, постоянной интеграции, одновременно является также источником питания.

- Напряжение питания — 220 В.
- Количество каналов управления — 6.
- Количество шин управления — 6.
- Выходное напряжение для регистрации на встроенный АЦП —  $\pm 1$  В.
- Выходное напряжение для регистрации на самописец —  $\pm 0,01$  В.

В процессе проведения регулярных наблюдений радиоисточников возможны изменения в АЧХ ВЧ блоков для улучшения чувствительности и сдвига центральной частоты для отстройки от помех, особенно на волне 3,4 см.

## 1.2. Система калибровки по двухтемпературному эталону шумового радиоизлучения

Система калибровки состоит из двухтемпературного эталона шумового радиоизлучения, установленного на калибровочной вышке, и системы дистанционного управления перемещением дисков.

Два “черных” диска установлены в термокамерах с возможностью их нагрева до определенной температуры, превышающей температуру окружающей среды. Датчик системы нагрева первого диска выставлен на температуру  $(51 \pm 2)^\circ \text{C}$ , основное рабочее состояние первого диска — нагрев (“горячий” диск). Датчик системы нагрева второго диска выставлен на температуру  $(30 \pm 2)^\circ \text{C}$ , основное рабочее состояние второго диска — температура окружающей среды (“холодный” диск). В качестве “горячего” этот диск должен использоваться при низких внешних температурах для лучшего сохранения равномерности распределения температуры по излучающей поверхности.

Передняя стенка термокамеры изготовлена из радиопрозрачной специальной ткани типа АНЗМ, при транспортировке



и длительном перерыве в работе термокамера закрывается пенопластовыми крышками.

Излучающие диски изготовлены из РПМ “Кварц-М”, имеющем пирамидальную структуру на однородной подложке толщиной 3 см, высота пирамидок — 5 см; рабочий диапазон длин волн от миллиметров до 30 см. Коэффициент отражения — менее 1% на частотах 3 и 10 ГГц.

Стандартный блок РПМ “Кварц-М” — сплошная жесткая плитка с размерами 15 × 15 см, поэтому в рабочем теле дисков между блоками оставлены зазоры, а сами блоки перфорированы для лучшей циркуляции воздуха, нагнетаемого вентилятором.

Измерение температуры РПМ производится электронным термометром АТТ-2001, в нагреваемом диске термодатчики (термопары DP-27) устанавливаются в центре и на краю, в “холодном” — один в центре. Приборные контакты термодатчиков выведены за стенки термокамеры для возможности быстрого подключения к измерительному прибору.

Калибровочный эталон смонтирован на двуплечем рычаге с возможностью поворота на  $180^\circ$  в плоскости, перпендикулярной электрической оси антенны. Диск в рабочем положении поднят над точкой пересечения осей вращения антенны на высоту  $10^\circ 50'$ . Диск в нерабочем положении находится за экраном.

Управление эталоном — дистанционное от пульта в технологическом помещении. Положение дисков фиксируется сигнальными лампами, предусмотрен режим остановки дисков в произвольном положении для длительной записи сигнала от фона за дисками. Время замены дисков при калибровке — около 30 сек.

Расстояние до диска в рабочем положении от точки пересечения осей вращения антенны равно  $101,3 \pm 0,1$  метра. Диаметр внешней апертуры термокамеры дисков — 56 см; угловой размер дисков  $\Delta\theta_d = 19',05$ .

Погрешность установки диска в рабочее положение после вращения, в том числе из-за качания вышки,  $\pm 1'$ .

### 1.3. Антенная система

Антенная система радиотелескопа РТ-7 в рабочих диапазонах длин волн 3 и 10 см имеет следующие характеристики.

Диаметр зеркала — 7 м, облучение — однозеркальное, поляризация облучателей — вертикальная. Ширина диаграммы направленности (ДН) антенны на уровне половинной мощности:

— на волне 10,6 см:

в дальней зоне по азимуту —  $58',1$ , по высоте —  $57',6$ ;

в ближней зоне по азимуту —  $61',96 \pm 0',33$ , по высоте —  $61',53 \pm 0',19$ , средняя —  $61',74 \pm 0',25$ , несимметрия 0,7%;

— на волне 3,4 см:

в дальней зоне по азимуту —  $18',1$ , по высоте —  $17',6$ ;

в ближней зоне по азимуту —  $20',85 \pm 0',17$ , по высоте —  $19',58 \pm 0',13$ ; среднее значение —  $20',22 \pm 0',15$ , несимметрия 5,6%.

Эффективная площадь в обоих диапазонах около  $20 \text{ м}^2$ .

Для юстировки электрической оси антенны (точной установки облучателя относительно геометрической оси антенны) облучатели устанавливаются на юстировочном кресте с возможностью передвижения в вертикальной и горизонтальной плоскостях на  $\pm 20 \text{ мм}$  (соответствует смещению оси ДН на  $\pm 20'$ ) с дискретом 1 мм.

Для перефокусировки на диск в ближнюю зону антенны облучатели устанавливаются на выдвигном кронштейне системы передвижения. Максимальный ход — 300 мм, дискрет (точность фиксации положения облучателя) — 1 мм, регулируемая скорость движения — 15, 100 мм/мин и плавная регулировка. Расчетное смещение облучателя из точки фокуса при наблюдении диска — 110 мм. Управление дистанционное от пульта в технологическом помещении. На рис. 2 показан фокальный блок антенны РТ-7, видны облучатель на 3,4 см, ВЧ блок радиометра РМ-3 в термостабилизирующей камере, юстировочный крест, мотор с редуктором и выдвигной кронштейн системы движения облучателя.

Распределение энергии вдоль оси антенны (“фокальные пятна”) на двух длинах волн показано на рис. 3; отсутствие модуляции, вызываемой переотражением сигнала от зеркала, указывает на хорошее согласование облучателей. На осях абсцисс отложены значения выноса несущего кронштейна по шкале блока индикации, максимумы фокальных пятен сдвинуты относительно друг друга примерно на (100–110) мм. Потери сигнала при данной точности фокусировки — не более 0,05%.

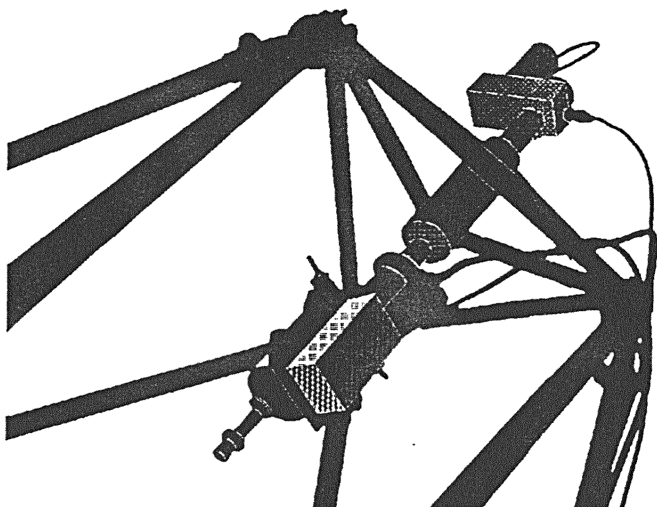
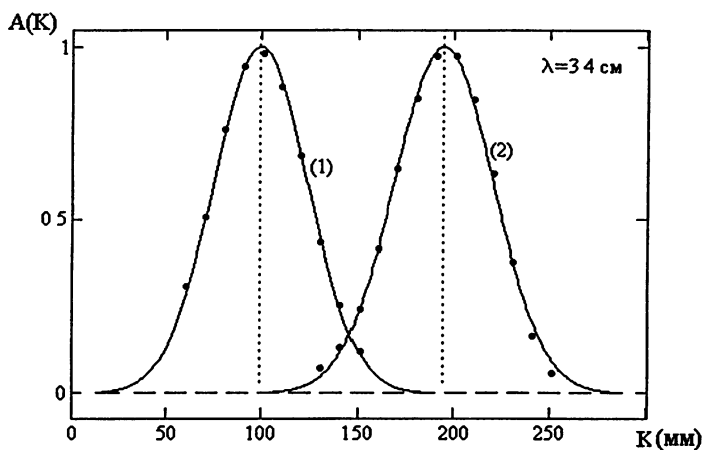
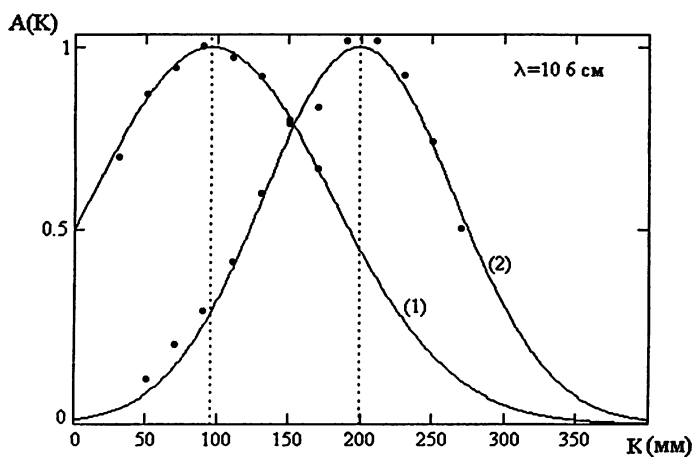


Рис. 2.

Величина ошибки наведения антенны в заданную точку по экспериментальным данным составляет около 2,5 по каждой координате. Потери сигнала при данных ошибках сопровождения составят  $\sim 1\%$  в диапазоне 10 см и  $\sim 4\%$  в диапазоне 3 см. Величина соответствующей поправки к результатам измерений определялась по специально разработанной методике, более точно учитывающей характер движения антенны при сопровождении источника излучения (см. Часть 2 настоящей работы).



Фокальные пятна (1) - по генератору, (2) - по Солнцу



Фокальные пятна (1) - по генератору, (2) - по Кассиопее А.

Рис. 3.

## 1.4. Система регистрации

Система регистрации сигнала и обработки данных состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для измерительных систем фирмы "National Instrument" с сетевым модулем FP-1000 RS 232\RS-485, на который подается сигнал с выходных каскадов радиометра, и ЭВМ PC Omnibook XE4100, для которой разработано математическое и программное обеспечение измерений. Могут использоваться два модуля АЦП с различным разрешением: FP-AI-V5B ( $\pm 5$  В) и FP-AI-V1 (0–1 В).

Обработка данных ведется с помощью стандартной программы Mathcad 2000. Prof.

Подробно программное обеспечение измерений и обработки данных описано в Части 3 этой работы.

## 2. ДВУХТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭТАЛОН ШУМОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Конструкция и принцип действия нагреваемого эталона ("черного" диска) рассмотрены в работах [3–5].

Эталон имеет следующие основные параметры: внешний диаметр излучателей 56 см, максимальная температура нагрева плюс  $55^{\circ}$  С, оптимальная рабочая температура плюс  $40^{\circ}$  С при работе на открытом воздухе при  $0^{\circ}$  С.

Наибольшую трудность при калибровке по двухтемпературному эталону представляет задача высокоточного определения разности температур дисков. При нагреве одного из дисков до  $50^{\circ}$  С и работе в обычных для средних широт условиях при внешней температуре ( $-10^{\circ}$ – $+30^{\circ}$ ) разность температур дисков  $\Delta T_d$  составляет  $20$ – $60^{\circ}$  С, т. е. в 5–10 раз меньше, чем при калибровке по одному диску. Поэтому для достижения погрешности измерений  $\Delta T_d = T_r - T_x$  менее 1% необходимо знать разность температур с погрешностью примерно  $0,3^{\circ}$  С, а следовательно, температуру каждого диска с погрешностью около  $0,1^{\circ}$  С.

Измерение температуры “холодного” диска с такой точностью не представляет особой сложности, хотя температура в термокамере чаще всего не совпадает с температурой окружающей среды. Определить температуру “горячего” (нагреваемого) диска с требуемой точностью достаточно сложно. Рассмотрим примененные на практике способы определения температуры нагреваемого диска и разности температур двух дисков.

## 2.1. Определение температуры нагреваемого диска калибровочного эталона

Конструкция нагреваемого диска показана на рис. 4.

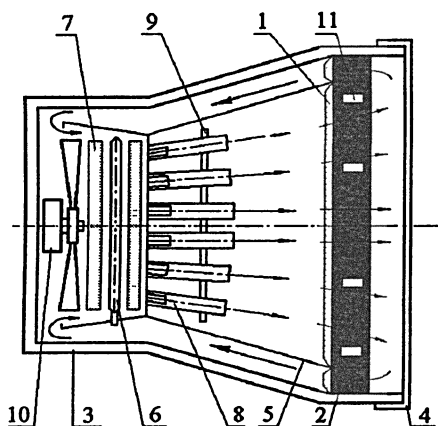


Рис. 4.

1 — металлический отражатель; 2 — РПМ; 3 — термокамера; 4 — передняя стенка термокамеры, выполненная из радиопрозрачного термоизоляционного материала; 5 — направляющий кожух; 6 — нагреватель; 7 — коробка теплообменника; 8 — эластичные трубки; 9 — подвижная пластина; 10 — вентилятор; 11 — датчики температуры.



Φοτο 1

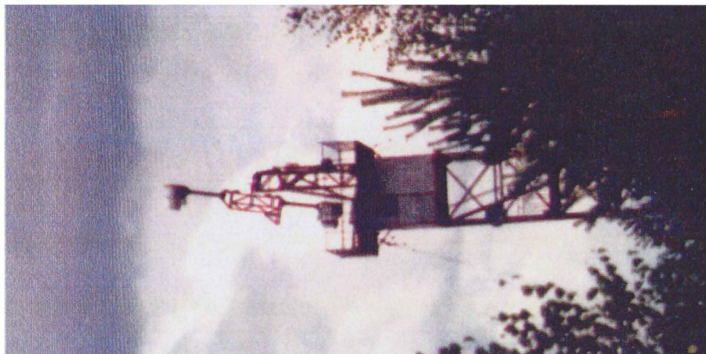


Фото 3

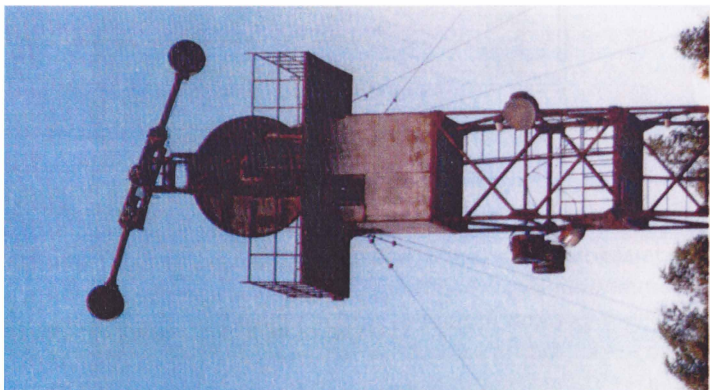


Фото 2





Фото 4



Фото 5

Равномерность распределения температуры по поверхности и объему нагреваемого диска обеспечивается нагнетанием воздуха с помощью вентилятора в направляющий кожух, где поток воздуха последовательно проходит через теплообменник, трубки распределителя и рабочее тело излучателя (РПМ). В обратном направлении поток воздуха движется в зазоре между кожухом и стенкой термокамеры, выполненной из металла частично без изолирующего покрытия для возможности точного определения площади излучающей поверхности. Из-за неабсолютной герметичности термокамеры и отсутствия термоизоляции внешней стенки происходят потери тепла в системе. Это приводит к разнице температуры диска в центре и на краях до нескольких градусов в зависимости от внешних условий. Неравномерность распределения температуры по поверхности диска приводит к ошибке определения средней температуры диска, если температура измеряется в одной-двух точках.

В связи с этим потребовалось исследовать неравномерность распределения температуры по поверхности нагреваемого эталона и разработать методику определения его средней температуры.

Основное соотношение для вычисления плотности потока излучения  $S_\nu$  исследуемого радиоисточника имеет вид [2]:

$$S_\nu = \frac{2k}{\lambda^2} \frac{\Delta n_{\text{ист}}}{\Delta n_{\text{д}}} F_{\text{д}} \{ \bar{T}_{\text{г}} - T_{\text{х}} \} \exp(\gamma_{\text{ист}}) K_1 K_C (1 - 0,2r^2)(1 + \delta_N), \quad (1)$$

где  $F_{\text{д}} = \int_{\Omega_{\text{д}}} \frac{F}{F_{\text{max}}} d\Omega$ ,  $F/F_{\text{max}}$  — нормированная диаграмма на-

правленности антенны,  $\Omega_{\text{д}}$  — телесный угол диска,  $\lambda$  — рабочая длина волны,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  дж/град — постоянная Больцмана,  $T_{\text{х}}$  — температура не нагретого диска,  $T_{\text{г}}$  — температура нагреваемого эталона,  $\Delta n_{\text{ист}}$  — выходной сигнал от радиоисточника относительно фона (опорной области),  $\Delta n_{\text{д}}$  — разность выходных сигналов при приеме излучения от двух дисков калибровочного эталона,  $\gamma_{\text{ист}}$  — коэффициент поглощения радио-

волн в атмосфере на рабочей частоте на высоте источника,  $r^2$  — коэффициент отражения радиопоглощающего материала дисков (коэффициент 0,2 учитывает “дочернение” диска за счет отражения излучения земли [2]),  $K_1$  — коэффициент учета протяженности источника,  $K_C$  — коэффициент учета ошибок сопрохождения источника,  $(1 + \delta_N)$  — коэффициент учета падения усиления антенны из-за перефокусировки в зону Френеля.

В случае неравномерности распределения температуры нагреваемого эталона и постоянной температуре  $T_x$  “холодного” диска, в соотношении (1) средняя температура нагреваемого диска равна

$$\bar{T}_\pi = \frac{1}{F_\pi} \int_{\Omega_\pi} T_r F_n d\Omega, \quad (2)$$

т. е. температура диска усредняется по диаграмме направленности антенны. Реально подобную операцию можно провести, измерив распределение температуры диска в дискретных точках. Тогда соотношение для усредненной по диаграмме направленности температуры нагреваемого диска  $\bar{T}_\pi$  в (2) примет вид:

$$\bar{T}_\pi = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n T_{ij} \exp \left\{ -\ln 2 \frac{x_i^2 + y_j^2}{R_{\text{эфф}}^2} \left( \frac{\theta_\pi}{\theta_{0,5}} \right)^2 \right\} / (nF_\pi), \quad (3)$$

где

$$F_n = \exp \left\{ -\ln 2 \left( \frac{\theta}{\theta_{0,5}} \right)^2 \right\} \rightarrow \exp \left\{ -\ln 2 \frac{x_i^2 + y_j^2}{R_{\text{эфф}}^2} \left( \frac{\theta_\pi}{\theta_{0,5}} \right)^2 \right\} —$$

нормированная диаграмма направленности антенны, которая аппроксимирована функцией Гаусса;  $\theta_\pi = 9',52$  — угловой радиус диска;  $x_i$  и  $y_j$  — координаты точек измерения температуры на диске, нормированные к  $R_{\text{эфф}}$  — эффективному радиусу диска в единицах измерения ( $x_i$  и  $y_j$ );  $T_{ij}$  — температура диска в точках с координатами  $x_i$  и  $y_j$ ;  $\theta_{0,5}$  — ширина диаграммы направленности антенны на уровне половинной мощности;  $n$  — количество точек, в которых измерялась температура.

Необходимость введения  $R_{\text{эфф}}$  определяется тем обстоятельством, что апертура диска имеет форму круга, а при замене интеграла суммой с дискретным количеством элементов общая площадь дискретных элементов не совпадает с площадью круга. Потребовалось ввести некий эффективный радиус диска, измеряемый в условных единицах  $(x_i, y_j)$ , который определяется при равенстве усредненной температуры  $\bar{T}_d$ , рассчитанной по формуле (3) при постоянном значении  $T_{ij} = T_1$ , значению этой температуры  $T_1$ .

Для измерения распределения температуры нагреваемого диска, его поверхность была разделена на 137 ячеек, кратно размеру апертуры инфракрасного датчика. В каждой ячейке с помощью инфракрасного термометра была измерена температура с погрешностью  $0^{\circ},1$  С. Таким образом, была получено распределение температуры по поверхности диска рис. 5. В данном эксперименте в диске использовался РПМ Б-4 ("болото"), пористый и хорошо продуваемый. Видно, что распределение температуры близко к равномерному, есть слабый градиент от низа диска к верху, спад на краю не превышает нескольких процентов.

Разность температур дисков, вычисленная при помощи соотношения (3) для ДН на волне 3,4 см, с учетом неравномерности нагрева, уменьшилась по сравнению с этой разностью, вычисленной без учета неравномерности нагрева на 1,5%. При прямом усреднении без учета диаграммы направленности (или для широкой диаграммы направленности) поправка возрастает до 2,5%. Погрешность определения усредненной температуры горячего эталона составляет менее  $0^{\circ},1$  С. Разность температур дисков определяется, в основном, с погрешностью измерения температуры холодного диска  $T_x$ . При разности температур дисков около  $40^{\circ}$  С, погрешность измерения этой величины менее 0,3%.

В этом эксперименте дополнительную погрешность вносит процедура калибровки показаний инфракрасного термометра,

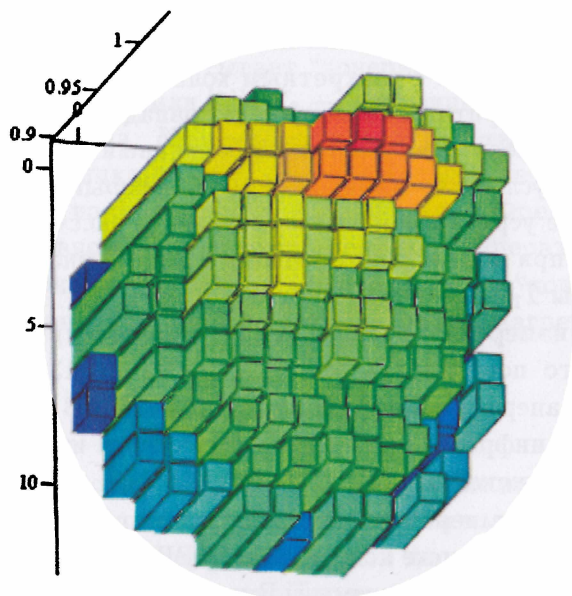


Рис. 5

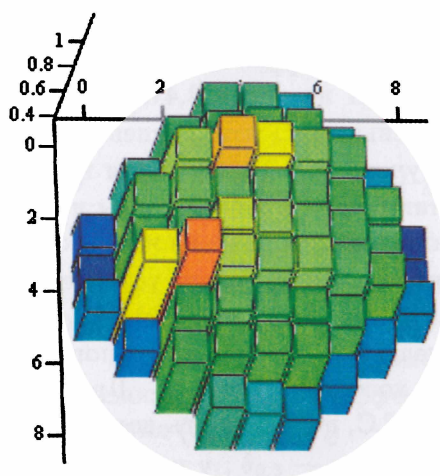


Рис. 6

поскольку эти показания искажались стенкой термокамеры, изготовленной из полиэтиленовой пленки. Кроме того, регулярные измерения распределения температуры в полевых условиях оказались проблематичными из-за длительности процесса измерений, необходимости замены передней стенки термокамеры и нестабильности окружающей температуры при ветре и дожде.

Наиболее точные измерения температуры нагреваемого диска возможны "точечным" зондом на рабочих частотах, поскольку определяется яркостная температура общего объема РПМ. Подобные исследования были проведены на обеих рабочих частотах, в качестве зондов применялись облучатели антенн, имеющие линейные размеры, примерно равные рабочей длине волны.

На рис. 6 и 7 приведены измеренные зондами распределения температуры по поверхности диска на рабочих длинах волн 3,4 и 10,6 см. Калибровка записи проводилась по "холодному" диску с радиопрозрачной стенкой, "черному" телу при комнатной температуре и "черному" телу при температуре примерно  $-2-0^{\circ}\text{C}$ .

На волне 10,6 см (рис. 7) для иллюстрации погрешности измерений показаны две реализации распределения температуры, нормированные к  $44^{\circ},9$  (центр); в обоих случаях средняя температура диска составила  $42^{\circ},7\text{C}$  при показаниях термодатчиков  $+51^{\circ},3$  в центре диска у металлического отражателя и  $+36^{\circ},6\text{C}$  на краю у внешней стенки. То есть, кроме понижения температуры к краю, существенен также градиент температуры РПМ вдоль направления движения потока нагретого воздуха из-за практического отсутствия теплоизоляционных качеств радиопрозрачной передней стенки (ткани АНЗМ).

Средняя температура диска на волне 3,4 см составила примерно  $37^{\circ},0\text{C}$  в центре диска после часового прогрева, т. е. на данной волне излучает поверхностный слой РПМ и требуется большее время для вывода эталона в рабочий режим. Заметен единичный выброс в распределении температуры, вызванный,

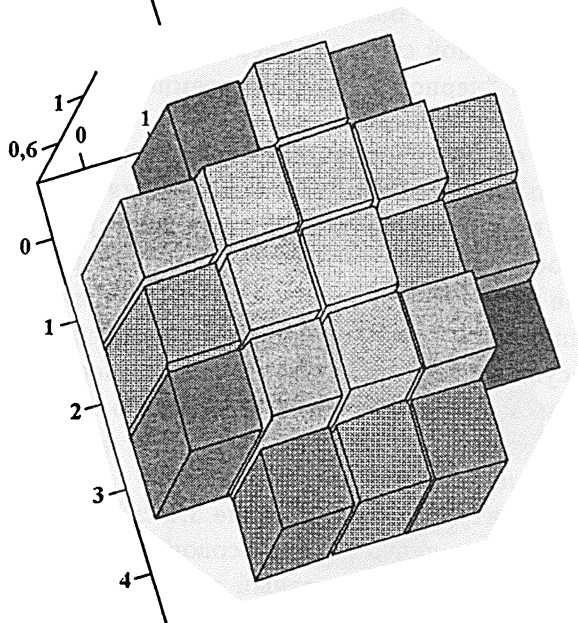
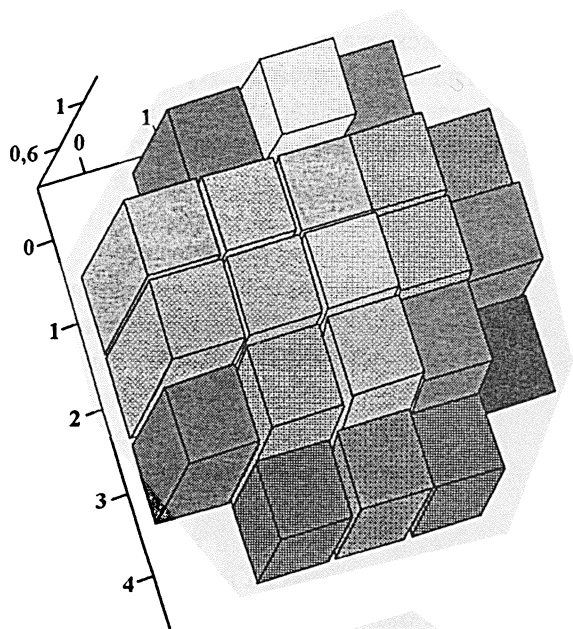


Рис. 7



по-видимому, дефектом в перфорации РПМ; в данном случае диск изготовлен из жесткого РПМ “Кварц” с зазорами между перфорированными плитками. На обеих длинах волн заметен вертикальный градиент температуры.

Таким образом, при прецизионных абсолютных измерениях потоков радиоисточников с помощью двухтемпературного эталона описанной конструкции необходимо проводить измерение распределения температуры по нагреваемому диску и вычислять среднюю температуру по разработанной методике для калибровок при различных внешних условиях. Однако, проведение регулярных измерений за короткие промежутки времени в изменяющихся погодных условиях осуществлять практически крайне сложно. Поэтому была разработана более удобная в практической реализации методика измерения разности температур дисков.

## 2.2. Определение разности температур дисков калибровочного эталона

Для решения этой проблемы был разработан способ определения  $\Delta T_d$  по данным калибровочных измерений, когда наряду с сигналами от дисков измеряется сигнал от фона за дисками. Известно, что при калибровке по “черному” диску в системе антенна – диск возникает дополнительный сигнал, принимаемый антенной и обусловленный дифракцией излучения земли на диске, так называемая дифракционная поправка.

На рис. 8 схематически показана запись калибровочных сигналов, где антенные температуры, обусловленные излучением фона за диском и дифракционным излучением, обозначены как  $T_e$  и  $T_\xi$  (считаем, что все излучение поступает в ДН антенны из телесного угла диска). Сигнал, принятый антенной от одиночного кронштейна, эквивалентного кронштейну, на котором крепится диск, обозначен как  $T_o$  (так называемый “сигнал эквивалента”). Приращение антенной температуры при измерении сигнала от источника ведется от сигнала эквивалента, чтобы

исключить дополнительный сигнал, идущий вне апертуры диска: в этом случае упрощается соотношение для расчетов  $\Delta T_D$ .

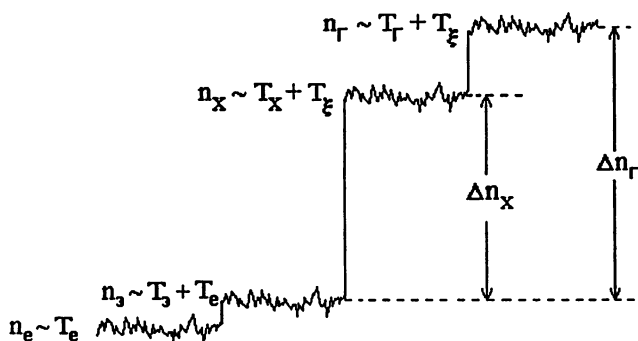


Рис. 8.

При калибровке по одному диску величина дифракционного излучения рассчитывалась для различных значений отношения диаметра диска к длине волны и высоты расположения диска над землей. Земная поверхность считалась “черным” телом с температурой окружающей среды, что является достаточно грубым приближением. То есть в первом приближении дифракционную температуру можно рассчитать по стандартной методике определения дифракционной поправки. Наличие двух эталонов позволяет исключить  $T_\xi$ , если температуры обоих дисков известны с требуемой точностью, а кроме того измерить  $T_\xi$ .

Из данных калибровочных измерений величину  $T_\xi$  можно получить следующим образом. Температура нагреваемого диска  $T_r$  по показаниям встроенного термометра известна с погрешностью от десятых долей до единиц градусов в зависимости от внешних условий. Поэтому приближенно значение  $T_\xi$  определяется по соотношению выходных сигналов  $\Delta n_r \sim T_r - T_e + T_\xi$  и  $\Delta n_x \sim T_x - T_e + T_\xi$  как

$$T_\xi = m \Delta T_D / (1 - m) - (T_x - T_e), \quad (4)$$

где  $m = \Delta n_x / \Delta n_r$ .

Величина собственного излучения атмосферы  $T_e$  зависит от величины поглощения, она не превышает нескольких градусов в зените в наших рабочих диапазонах и определяется достаточно точно по метеоданным или прямыми измерениями поглощения.

На волне 10,6 см величина  $T_\xi$  была рассчитана для значения  $T_r$ , взятого при показаниях термодатчиков, соответствующих показаниям при калибровке с помощью зонда. Значение дифракционной температуры было определено как  $22^\circ,0$  с погрешностью не более  $2^\circ$ . Расчетная величина равна  $25^\circ$ . Можно считать, что измеренное значение достоверно, поскольку расчеты делались, во-первых, при приближении абсолютно черной земли, во-вторых, для плоского диска, а термокамеры эталона имеют форму цилиндра с усеченным конусом сзади, что дает более узкую ДН системы антенна – диск и, следовательно, меньший угол захвата земной поверхности.

По соотношению (4) величина  $T_\xi$  может быть измерена с погрешностью, определяемой, в основном, погрешностью  $T_e$ , если проводить измерения при резких суточных колебаниях внешней температуры и принимать за  $T_r$  наибольшее за сутки значение температуры “холодного” диска. Для подобной калибровки требуется высокая чувствительность и стабильность усиления радиометра. Однако, в этом случае необходимо учитывать изменение поглощения в атмосфере при изменении внешней температуры, которое, как показывает практика, может быть существенным. Соотношение для расчета дифракционной температуры примет вид

$$T_\xi = \frac{1}{1-m} \left[ (m \Delta T_0^r - \Delta T_0^x) + m e^{-\gamma r} (T_0^r + B_r) - e^{-\gamma x} (T_0^x + B_x) \right], \quad (5)$$

где  $\Delta T_0^{r,x}$  — разность температур окружающей среды  $T_0^{r,x}$  и “холодного” диска в термокамере при двух разнесенных во времени замерах,  $\gamma_{r,x}$  — поглощение в атмосфере при разных внешних температурах,  $B = bH S(\gamma)$ ,  $b$  — градиент температуры

тропосферы с высотой,  $H$  — эффективная длина пути атмосферы в поглощении,  $S(\gamma) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\gamma^k}{k \cdot k!}$ .

На волне 3,4 см расчетная величина  $T_{\xi}$  не превышает 5–6°, если считать землю абсолютно черным телом, а значит реально еще меньше. Погрешность её определения примерно 2°. Из-за малости этой температуры её расчеты по соотношению (5) для проведенных к настоящему времени измерений дали недостоверные результаты, т. е. ошибки измерений превосходят определяемую величину. Поэтому с достаточной точностью на волне 3,4 см можно считать величину  $T_{\xi}$  равной 5°, а её погрешность  $\pm 2^\circ$ .

Исходя из вышеизложенного в дальнейшем считаем, что дифракционная температура известна с необходимой точностью. Измерения  $T_{\xi}$  необходимо проводить в каждой серии наблюдений радиостанций, особенно, при смене сезонов, так как в зависимости от покрытия земной поверхности (снег, трава, листва и т. д.) меняется её коэффициент отражения, а следовательно, и  $T_{\xi}$ .

При известных, рассчитанных или измеренных, значениях  $T_x$ ,  $T_e$  и  $T_{\xi}$  можно рассчитать величину разности температур “горячего” и “холодного” дисков по следующему соотношению:

$$\Delta T_{\text{д}} = \frac{1-m}{m} T_x + \frac{1-m}{m} (T_{\xi} - T_e). \quad (6)$$

Величина коэффициента  $(1-m)/m$  в наших экспериментах на обеих частотах лежит в пределах 0,11–0,16, т. е. погрешности слагаемых в соотношении (6) уменьшаются в 7–10 раз. Таким образом погрешность определения  $\Delta T_{\text{д}}$  зависит, в основном, от погрешности определения разности  $(T_{\xi} - T_e)$ . Эта погрешность согласно вышесказанному не превышает 2–4°, что позволяет считать погрешность определения разности температур дисков по данной методике не более 0°,4. Средняя величина  $(T_{\xi} - T_e)$  на волне 10,6 см равнялась примерно +12°, на волне 3,4 см (–11°), т. е. в 25–30 раз меньше  $T_x$ . Естественно, относительная

погрешность определения  $\Delta T_d$  будет зависеть от абсолютного значения разности, наибольшего в холодные сезоны года.

Разработанная методика применялась в калибровках при определении  $\Delta T_d$  на обеих рабочих частотах. Погрешность калибровки не превышала 1%. Следует заметить, что при данной методике определения разности температур дисков по данным измерений рассчитывается прямое значение искомой величины и нет необходимости вводить поправки на коэффициент отражения РПМ.

## ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ результатов калибровок по двухтемпературному эталону по описанной методике и по одному диску по традиционной методике показал, что погрешность калибровки по двухтемпературному эталону в 3–5 раз меньше, особенно при нестабильном поглощении в атмосфере. Кроме того, применение разработанного эталона позволяет измерить часть поправочных коэффициентов, что также повышает точность и надежность результатов экспериментов по определению абсолютных значений плотностей потоков радиоизлучения внеземных источников. Преимущества двухтемпературного эталона будут более заметны при переходе на более низкие частоты, где для малых размеров дисков и низком их расположении над землей учесть дифракционные поправки с необходимой точностью практически невозможно.

Тем не менее, очевидна сложность работы с эталоном данной конструкции, особенно при определении средней температуры нагреваемого диска. Опыт создания двухтемпературного эталона и работы с ним может служить основой для разработки “горячих” дисков более совершенной конструкции с учетом всех выявленных особенностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий В. С., Цейтлин Н. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1961. Т. 4, № 3. С. 393.
2. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1976.
3. Дугин Н. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 65, № 2. С. 144.
4. Бахарев Н. В., Дугин Н. А., Корелов В. Т. Двухтемпературный эталон шумового радиоизлучения // Патент № 1827030 от 13.10.92.
5. Дугин Н. А., Дмитренко Л. В., Корелов В. Т. Двухтемпературный эталон шумового радиоизлучения // Препринт НИРФИ № 341. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1992. 14 с.
6. Dugin N. A. Application of two-temperature black body standard for absolute measurements of microwave radio emission intensity. Тезисы доклада, 2-я конф. ISEM-93, Пекин, 1993.
7. Плечков В. М., Разин В. А. Результаты измерений интенсивности радиоизлучения дискретных источников на волнах 3,2 и 9,7 см // Труды пятого совещания по вопросам космогонии, 9–12 марта 1955 г. Радиоастрономия. — М.: АН СССР, 1956. С. 430–435.
8. Петухов Б. А. Входной блок радиотермометра // Сб. тр. конф. “Методические вопросы определения температуры биологических объектов радиофизическими методами”, Звенигород-84. — М., 1985. С. 123.
9. Сырейщиков В. П. Схемотехнические решения построения блоков НЧ как метод повышения качества радиометров // Второй региональный научный семинар “Распространение микроволн в природных средах”. — Нижний Новгород, 2003. С. 30.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Стенд для абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения космических источников в РАО “Старая Пустынь” .....	4
1.1. Приемная аппаратура .....	5
1.2. Система калибровки по двухтемпературному эталону шумового радиоизлучения .....	8
1.3. Антенная система .....	10
1.4. Система регистрации .....	13
2. Двухтемпературный эталон шумового радиоизлучения .....	13
2.1. Определение температуры нагреваемого диска калибровочного эталона .....	14
2.2. Определение разности температур дисков калибровочного эталона .....	25
Выводы.....	29
Литература .....	30

Дугин Николай Александрович  
Кузнецова Ирина Павловна  
Разин Владимир Андреевич

Абсолютные измерения плотностей потоков радиоизлучения  
космических источников с калибровкой по двухтемпературному  
чернотельному эталону.

Часть 1.

Измерительный стенд. Двухтемпературный эталон.

---

Подписано в печать 01.03.04г. Формат 60 × 84/16.  
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 2,0 усл. п. л.  
Тираж 50. Заказ 5534.

---

Отпечатано в НИРФИ  
Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25