

09;12

Измерение поглощения рефлекторной антенны на терагерцовых частотах по методу сбалансированного радиометра

© С.В. Шитов, А.В. Уваров, А.Б. Ермаков, А.Н. Выставкин

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
e-mail: sergey@hitech.cplire.ru

(Поступило в Редакцию 22 марта 2011 г.)

Измерены собственные шумы образца панели главного зеркала субмиллиметрового телескопа при комнатной температуре. Использован модуляционный радиометр на основе гетеродинного приемника со сверхпроводниковым смесителем на входе и антенным переключателем балансной конструкции: шумовая температура приемника составила 570 К в двухполосном режиме при частоте гетеродина 842 GHz. Коэффициент поглощения алюминиевой панели, вычисленный по интенсивности теплового излучения, составил $0.31 \pm 0.07\%$. Для проверки были измерены образцы фосфорной бронзы и нержавеющей стали, для которых было получено поглощение $0.41 \pm 0.07\%$ и $1.30 \pm 0.07\%$ соответственно, что близко к данным, полученным ранее для этих материалов с радиометрами на прямых детекторах. Широкий динамический диапазон гетеродинного приемника упростил калибровку радиометра; чувствительному элементу не требуется охлаждение ниже температуры жидкого гелия. Сбалансированный переключатель новой конструкции позволил кардинально снизить влияние фона и производить прецизионные измерения при комнатной температуре.

Введение

Поверхность панелей радиотелескопов субмиллиметровых волн должна иметь точность много лучше длины принимаемых волн — типично около 10 мкм. Однако зеркальная полировка таких панелей иногда нежелательна, так как возникает опасность случайной фокусировки инфракрасного излучения Солнца на элементах приемной системы. Матовая (шероховатая) поверхность, полученная за счет специальной обработки, приводит к увеличению диссипативных потерь и, как следствие, к появлению дополнительных шумов в приемной системе. Например, техническое задание для главного 12-метрового рефлектора антенны международного проекта „АЛМА“ [1] устанавливает предельный уровень таких потерь на уровне 1% во всем частотном диапазоне 787–950 GHz. Измерение малых потерь или их достоверная оценка „сверху“ на этих частотах является непростой задачей. Уместно упомянуть, что уровень потерь является одним из ключевых параметров при выборе степени охлаждения главного зеркала двенадцатиметрового телескопа космического базирования российского проекта „Миллиметрон“ [2]. Степень охлаждения разумно выбирать на основе измерений шумов такой антенны или образцов ее рефлектора.

Основываясь на флуктуационно-диссипативной теореме (ФДТ) [3], коэффициент поглощения отражателя (коэффициент черноты) может быть получен на основе измерений тепловой эмиссии такого отражателя. Низкие уровни излучения можно измерить с помощью радиометров на основе криогенных болометров [4], [5]. Отметим, что на частотах f в районе одного терагерца и при температуре чернотельного калибратора порядка 10^2 К квантовыми поправками в ФДТ можно пренебречь, так

как $k_B T \gg hf$. При этом можно использовать следующую упрощенную формулу, связывающую эквивалентную температуру шумов T_N , коэффициент поглощения A отражателя и его физическую температуру T_{PH}

$$T_N = T_{PH} A. \quad (1)$$

Величина N_N при комнатной температуре и коэффициенте поглощения 1%, согласно (1), составляет около 3 К. Отсюда можно заключить, что для измерения отражения на уровне $0.5 \pm 0.1\%$ флуктуационная чувствительность используемого радиометра должна быть на порядок лучше измеряемых шумов или около 0.3 К.

Известны методы, не требующие предельно высокой чувствительности измерительного оборудования. Например, тестируемая на отражение плоская поверхность может быть включена в резонатор, и ее потери могут быть вычислены из эффективной добротности такого резонатора [6–8]. Оба упомянутые выше метода имеют недостатки. Болометры обладают невысоким динамическим диапазоном, что затрудняет их точную калибровку; они требуют относительно сложной системы криостатирования на температурах, как правило, значительно ниже температуры жидкого гелия. Резонансный метод ограничен точностью механической юстировки и трудностями учета рассеяния негауссовых компонент поля, что приводит к неконтролируемым потерям, которые слабо зависят от свойств исследуемого образца и увеличиваются с ростом частоты. Для резонансного метода требуется относительно мощный и спектрально чистый генератор терагерцового диапазона, что является еще одной технической проблемой.

Известно, что смеситель субмиллиметрового диапазона длин волн на туннельных переходах типа

сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (СИС-смеситель) практически не насыщается излучением черного тела комнатной температуры. Это делает возможной калибровку радиометра, используя чернотельные излучатели с температурой жидкого азота (около 80 К) и комнатной температуры (около 300 К) (см., например, [9]). В настоящей работе описан эксперимент с применением СИС-приемника, работающего в режиме сбалансированного модуляционного радиометра. Обсуждается как сама методика, так и ее точность, обусловленная качеством термостатирования лабораторной зоны, рассеянием фонового излучения комнатной температуры, а также конструкцией чернотельных излучателей.

Методика

Метод переключаемой диаграммы направленности широко используется в радиометрии: интенсивность принимаемого сигнала определяется путем сравнения ее с калиброванным излучением или с излучением фона. Такой приемник иногда называют модуляционным радиометром; модуляция позволяет снизить влияние дрейфа коэффициентов пропускания всех элементов системы и обнаруживать сигналы малой интенсивности на фоне статистически стабильных фоновых шумов. Поиск решения поставленной задачи велся на пути создания лабораторной системы, которая действовала бы аналогичным образом, но роль слабого сигнала выполнял бы не удаленный объект на фоне неба или подстилающей поверхности, а образец отражательной панели на фоне излучения черного тела заданной температуры.

Предположенное решение проиллюстрировано на рис. 1, оно может быть классифицировано как разновидность сбалансированного модуляционного радиометра. Тепловая эмиссия от холодного чернотельного излучателя 4 принимается по двум одинаковым каналам 5 и 6 (рис. 1, *a*), один из которых обогащается шумами, возникающими при отражении чернотельного излучения от образца панели 7 (рис. 1, *b*). Учитывая поглощение и отражение фонового излучения T_{BR} , можно записать интенсивность обогащенного излучения T_{EX} , следующим образом:

$$T_{EX} = T_{BR}(1 - A) + T_{PH}A. \quad (2)$$

При этом предполагается, что интенсивность шума такого отражения не зависит от направления (от угла) распространения измеряемого излучения или по крайней мере, такая интенсивность при экспериментальных углах отражения близка к случаю практического радиотелескопа (углы отражения до 30°). Переключая вход радиометра (входной луч узконаправленной антенны) с опорного канала фонового излучения 5 на канал обогащенного фонового излучения 6, получаем разностный сигнал или сигнал контраста T_{SW} , который характеризует искомые шумы отражателя. Коэффициент поглощения A влияет на измеренное значение разностного

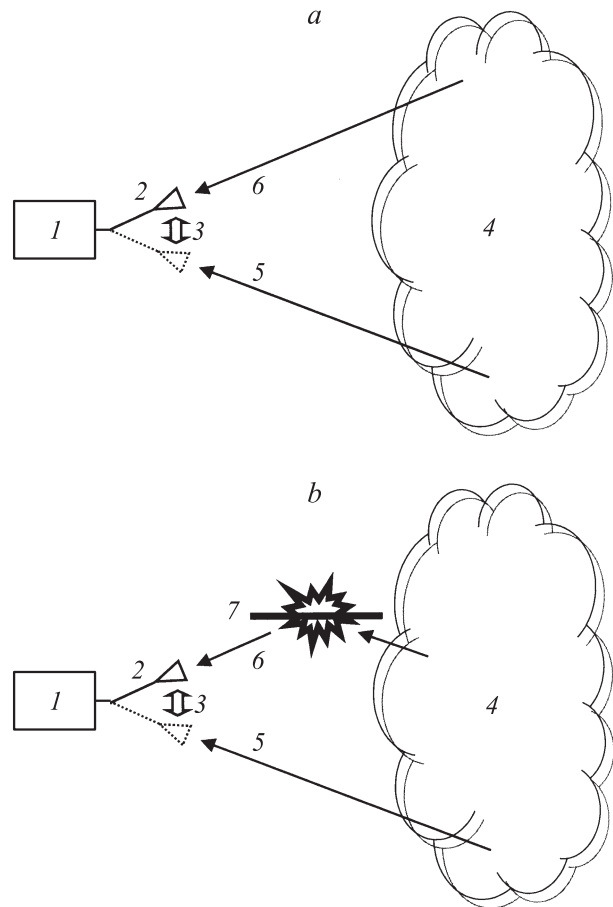


Рис. 1. Принцип обнаружения собственного теплового излучения отражателя *a*: 1 — приемник; 2 — рупорная антенна; 3 — устройство диаграммного переключения (антенный переключатель); 4 — однородное ХЧТ (холодный фон); 5 и 6 — направления приема диаграммного модулятора, с которых приходит одинаковое излучение холодного фона *b*: 7 — исследуемый отражатель, излучающий комбинацию отраженного фона и собственного шума с направления приема 6. При этом уровень фона с направления 5 остается неизменным.

сигнала T_{SW} в соответствии со следующей формулой:

$$\begin{aligned} T_{SW} &= T_{EX} - T_{BR} = [T_{BR}(1 - A) + T_{PH}A] - T_{BR} \\ &= (T_{PH} - T_{BR})A. \end{aligned} \quad (3)$$

Из (3) следует, что для получения максимально возможного сигнала контраста фон должен быть как можно более холодным. При температуре рефлектора $T_{PH} = 300$ К, поглощении $A = 1\%$ и фоне $T_{BR} = 100$ К формула (3) дает сигнал контраста $T_{SW} = 2$ К.

Схема измерений на рис. 1 не проста для реализации в лабораторных условиях: для поворота луча радиометра потребуются система движущихся и неподвижных зеркал, которые имеют собственный шум, сравнимый с искомым, а холодное черное тело (ХЧТ) должно иметь большую апертуру и высокую однородность. Как следует из рис. 1, выделение разностного сигнала от

исследуемого объекта возможно, когда переключатель каналов сбалансирован — в отсутствие объекта контраст равен нулю.

Перечислим ряд соображений по построению такого сбалансированного измерителя. В каждом из плеч между чернотельным излучателем и входом приемника должны быть использованы плоские зеркала с избыточной апертурой, гарантирующие одинаково полную передачу сигнала. Отклонение луча зрения приемного элемента может быть реализовано с помощью вращающегося обтюлятора-отражателя, как показано на рис. 2 и 3. Подвижное зеркало обтюлятора 1 и неподвижное зеркало 2 должны быть изготовлены из одного материала и находиться при одной температуре. В соответствии с формулой (1) зеркала добавляют одинаковый шум — каждое в свое плечо переключателя. В предложенной схеме для проверки баланса радиометра (рис. 2) неподвижный луч узконаправленной антенны принимает от двух одинаковых чернотельных излучателей 6 и 3 излучение опорного фона, отраженное либо от зеркала 1, либо от зеркала 2 соответственно, как показано на рис. 2, *a* и *b*. Идеальный баланс может быть нарушен из-за несимметричного отражения и рассеивания паразитного теплового фона T_p .

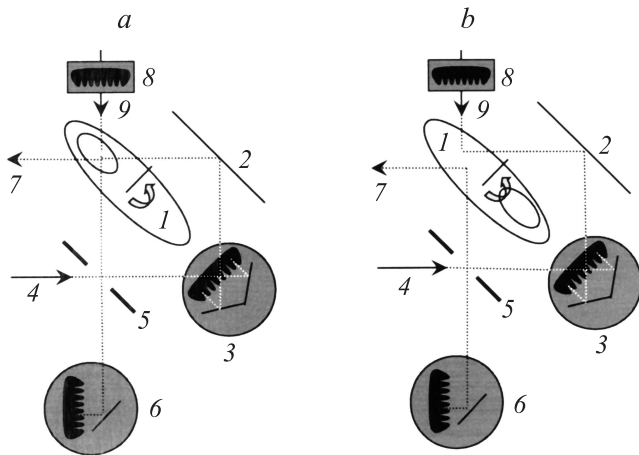


Рис. 2. Схема антенного переключателя для проверки баланса (вид в плане). Пути распространения излучения показаны пунктирными линиями и стрелками. В позиции *a* обтюратор (1) открыт в сторону плоского зеркала (2), откуда приходит опорный сигнал с холодного черного тела (3), имеющего температуру около 80 К. Рассеяние паразитного фонового излучения комнаты с направлением (4) на черном теле (3) после прохождения через открытую апертуру (5), предназначенную для установки тестового образца, может явиться потенциальным источником дополнительного шума в опорном плече, особенно при недостаточной черноте тела (3). В позиции *b* плоское зеркало обтюлятора (1) является отражателем сигнала измерительного плеча, который приходит от второго такого же ХЧТ (6) в сторону входа приемника (7). Дополнительный холодный поглотитель (8), помещенный в пенопластовую кювету, блокирует паразитное фоновое излучение комнаты с направления (9).

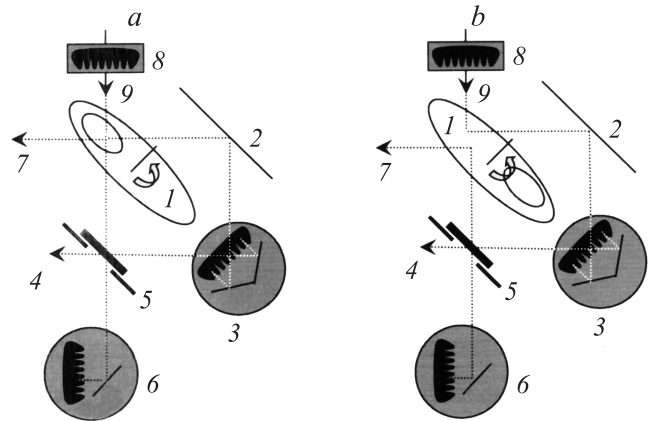


Рис. 3. Схема антенного переключателя при измерении образца антенной панели (вид в плане, обозначения такие же, как на рис. 2). Излучение ХЧТ (3) направляется на вход приемника (7) по двум разам путем одинаковой длины с помощью уголкового отражателя. В позиции (*a*) обтюратор (1) открыт в сторону плоского зеркала (2), откуда приходит опорный сигнал, имеющий температуру около 80 К. В позиции (*b*) плоское зеркало обтюлятора (1) является отражателем измеряемого сигнала, который приходит, отразившись от образца измеряемой панели (5). Дополнительный холодный поглотитель (8), помещенный в пенопластовую кювету, как и на рис. 2, блокирует паразитное фоновое излучение комнаты с направлением (9). Образец панели (5) блокирует направления (4) и (9) в области апертуры образца, а черное тело (6) не используется.

Рассмотрим факторы дисбаланса подробнее. Создание ХЧТ с высокой чернотой и стабильностью и его калибровка являются серьезными инженерно-физическими задачами. Для лабораторных целей часто используют упрощенные конструкции в виде ящика из пенопласта (вывод излучения в любую сторону, в том числе через стенку) или широкогорлый сосуд Дьюара (вывод излучения вверх), наполненные жидким азотом. Поглощающий (чернотельный) материал погружается в жидкий азот, и его физическая температура предполагается равной температуре кипения азота при данном атмосферном давлении (около 77 К в нормальных условиях). Следует учитывать, что тепловое излучение при комнатной температуре T_{RM} (около 300 К) может проникать на поверхность холодного поглотителя под различными углами и затем рассеиваться, отражаясь в направлении приемника, увеличивая эффективную температуру ХЧТ. Этому способствует не только конечная чернота используемого материала, но и практически плоская поверхность раздела воздух—(жидкий азот). Для значения диэлектрической постоянной жидкого азота 1.538 [10] коэффициент отражения на разделе воздух—жидкий азот R_{AN} составляет около 1.1% для нормального падения, диэлектрическими потерями жидкого азота мы пренебрегаем. Схемы, изображенные на рис. 2 и 3, предполагают использование ХЧТ с вертикальным выходом излучения из сосуда Дьюара — нормально к границе

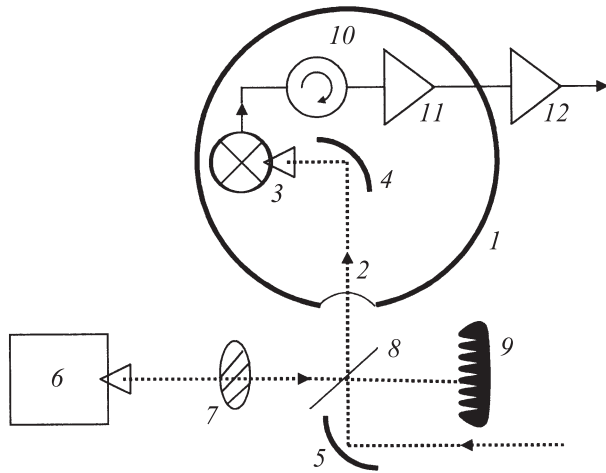


Рис. 4. Схема экспериментального гетеродинного СИС-приемника: 1 — криостат с жидким гелием и вакуумным подвалом, 2 — радиопрозрачное входное окно; 3 — СИС-смеситель волноводного типа с входным рупором при температуре 4.2 К; 4 и 5 — фокусирующие эллиптические зеркала; 6 — генератор гетеродина (фокусирующие элементы не показаны); 7 — перестраиваемый поляризационный аттенуатор; 8 и 9 — пленочный диплексер и поглотитель; 10 — циркулятор ПЧ; 11 и 12 — охлаждаемые до 4.2 К и при комнатной температуре усилители ПЧ с полосой 4–8 GHz. Пунктирными линиями со стрелками показаны путь и направление распространения входного сигнала, мощности гетеродина и выходного сигнала ПЧ.

воздух–(жидкий азот). В горизонтальном направлении излучение перенаправляется за счет плоского зеркала, установленного под углом 45° к горизонту. Легко понять, что паразитное излучение, падающее под заметными углами к нормали жидкого азота, не может попасть в приемник, и в то же время излучение с малых углов затенено 45-градусным зеркалом.

Шумы устройств, расположенных между входом приемника и ХЧТ, с эффективной температурой T_{IN} , например, шумы, вносимые пленочным диплексером 8 (рис. 4), могут излучаться в сторону ХЧТ и отражаться от него обратно в сторону входа приемника. Выражение для *эффективной* температуры излучения T_{BRE} ХЧТ с учетом конечной степени его черноты A_{BB} , зеркального и диффузного отражения фона можно записать в виде комбинации отдельных вкладов:

$$T_{RME} = T_{RM}[(1 - R_{AN})^2(1 - A_{BB})](1 - A_M)^2, \quad (4.1)$$

$$T_{INE} = T_{IN}[R_{AN} + (1 - R_{AN})^2(1 - A_{BB})](1 - A_M)^2, \quad (4.2)$$

$$T_C = T_{BB}A_{BB}(1 - R_{AN})(1 - A_M), \quad (4.3)$$

$$T_M = T_{RM}A_M[1 + R_{AN}(1 - A_M) + (1 - R_{AN})^2(1 - A_{BB})(1 - A_M)], \quad (4.4)$$

$$T_{BRE} = T_{RME} + T_{INE} + T_C + T_M. \quad (4.5)$$

В комбинации (4.5) содержатся 4 независимых вклада. Вклад (4.1) T_{RME} — комнатный фон направления 4 (см. рис. 2, 3), испытавший два отражения от 45-градусного зеркала, два прохода через поверхность жидкого азота и одно отражение от поглотителя. Вклад (4.2) — излучение поглотителя 9, T_{IN} — отраженное диплексером 8 (см. рис. 4). Здесь учтены прямое отражение от поверхности азота, отражение от холодного поглотителя, а также от границы раздела и зеркала — дважды. Вклад (4.3) — шум холодного поглотителя с учетом его черноты, уменьшенный на потери отражения на границе раздела и на потери зеркала. Вклад (4.4) — шумы 45-градусного зеркала в виде суммы двух потоков: прямого (в сторону переключателя) и отраженного от ЧТ. Отраженный поток формируется на разделе воздух–азот и на поверхности холодного поглотителя; фактически эти дополнительные отражения увеличивают коэффициент черноты зеркала. Заметим, что и охлажденный поглотитель, и зеркало описаны в (4.1)–(4.3) как нешумящие отражающие аттенуаторы по отношению к сторонним компонентам фонового излучения. Оценка по формулам (4.1)–(4.5) для следующих параметров $T_{BB} = 77$ К, $T_{RM} = 295$ –300 К, $A_{BB} = 98$ –99.5%, $R_{AN} = 1.1$ %, $A_M = 0.5$ –1% дает значение $T_{BRE} = 79.5$ –85 К, что заметно выше собственной температуры поглотителя (77 К).

Несмотря на то что мы называем паразитный фон „комнатным“, на практике он может варьировать в широких пределах — от 300 К (черное тело комнатной температуры) до 4 К (многократное отражение в холодной полости криостата). Величина таких помех зависит от оптического согласования фона не только в области ЧТ-поглотителей, но и на входе в криостат, в области диплексера. Если же предположить в (4), что уровень окружающего (комнатного и т.п.) фона может быть снижен и лежать в диапазоне $T_{RM} = 4$ –80 К, то отличия в излучении черных тел с различающейся чернотой практически исчезнут: они станут ниже чувствительности радиометра. Желаемая ситуация означает охлаждение всех поверхностей установки до примерно 80 К. Еще одним аргументом в пользу полного охлаждения переключателя является возможность устранения захвата фонового шума комнаты T_{RM} , диаграммным модулятором-обтюратором. Модуляция паразитного фона может быть принята за сигнал контраста образца, что приведет к серьезной систематической ошибке.

На рис. 3 схематично показаны пути распространения излучения при измерении образца. В этой конфигурации используется излучение одного чернотельного источника с исходной температурой поглотителя 77 К, которое распределяется между двумя плечами антенного переключателя с помощью уголкового зеркала из полированного алюминия. Из рис. 2 и 3 видно, что длина пути входного излучения одинакова для обоих положений антенного переключателя, что благоприятно для получения точной балансировки. Важным фактором является равенство шумового фона, падающего на

ХЧТ 3 при переключении плеч. Два элемента тракта — дополнительный поглотитель 8 и диплексер входного тракта гетеродина с прозрачностью 73.5% — создает паразитный фон $T_p = 79\text{--}80\text{ К}$, близкий по интенсивности к собственному фону ХЧТ. Как обсуждалось выше, проникновение такого излучения не приводит к дисбалансу переключателя, и им можно пренебречь. Образец вносит одно дополнительное отражение (добавляет шум) в левое плечо антенного переключателя, что соответствует исходному замыслу с рис. 1.

Экспериментальная установка

Радиометр создан на основе гетеродинного приемника. В его состав входят: малошумящий СИС-смеситель, помещенный в вакуумный гелиевый криостат с радио-прозрачным окном (рис. 4), антенный переключатель и несколько чернотельных излучателей (калибраторов). СИС-смеситель представляет собой один из вариантов, разработанных в рамках международного проекта „ALMA“ для диапазона № 10 [1]. В смесителе использован СИС-переход резонансного типа, изготовленный на основе эпитаксиальной структуры NbN/AlN/NbN [9]; смесительная камера имеет волноводную конструкцию. Для инъекции мощности гетеродина в сигнальный тракт использован диплексер из полиимидной пленки ($\epsilon = 3.1$) толщиной $25\ \mu\text{м}$, имеющий на частоте 840 GHz расчетный коэффициент отражения 26.5% и расположенный вне криостата. Эллиптические зеркала, изготовленные из алюминия, обеспечивают каустику квазиоптического пучка диаметром около 20 mm как в сечении входного окна криостата, так и в области чернотельных излучателей. Частота переключения луча радиометра составляет около 5 Hz. Малошумящий УПЧ с полосой 4–8 GHz и усилением около 30 dB (аналогичный [11]) и входной циркулятор ПЧ охлаждены в криостате до температуры 4.2 K и имеют шумы, приведенные к выходу СИС-смесителя, 4–10 K. Выходной сигнал смесителя усиливается в сумме на 86 dB и регистрируется прецизионным измерителем мощности с частотой 20–40 отсчетов в секунду.

Измеренная шумовая температура приемника составила $565 \pm 10\text{ К}$ в двухполосном режиме. В этих измерениях использовался чернотельный излучатель из СВЧ-поглотителя марки Eccosorb AN-72 [12] в сигнальном плече переключателя, температура холодного излучателя предполагалась равной $T_C = 80 \pm 2\text{ К}$. Такой же поглощающий материал, но при комнатной температуре ($T_H = 300 \pm 5\text{ К}$), помещался в опорное плечо радиометра. Сигнал относительного контраста Y вычислялся как отношение выходной мощности радиометра при горячем и холодном излучениях на входе $Y = P_H/P_C$ по формуле $T_N = (T_H - T_C Y)/(Y - 1)$. Отметим, что шумовая температура приемника T_N , скорректированная на шумы, вносимые диплексером 8, и приведенная к входному окну криостата 2 (рис. 4), составила $330 \pm 8\text{ К}$

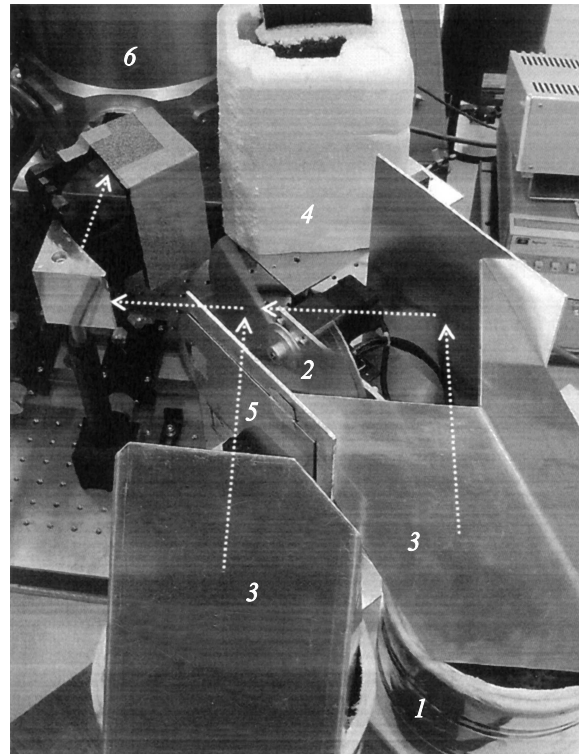


Рис. 5. Антенный переключатель экспериментального балансного радиометра в составе испытательного стенда. На переднем плане — два сосуда Дьюара (1) с поглотителями, погруженными в жидкий азот ($T = 77\text{ К}$). Пути и направления распространения чернотельного излучения от охлаждаемых поглотителей показаны пунктирными стрелками; поглотители „переключаются“ подвижным зеркалом обтюлятора (2), которое перенаправляет излучение от двух одинаковых плоских зеркал из алюминия (3). Дополнительный поглотитель (4) предотвращает проникновение в систему фонового излучения комнаты. Апертура (5) в данной конфигурации заблокирована образцом. СИС-смеситель расположен внутри криостата (6). Детали схемы показаны на рис. 2 и 3.

на частоте гетеродина $842 \pm 1\text{ GHz}$. Данная частота была выбрана экспериментально из соображений наилучшей временной стабильности гетеродина, в качестве которого использована лампа обратной волны (ЛОВ) без системы ФАПЧ.

Два одинаковых чернотельных излучателя представляют собой сосуда Дьюара с горлом диаметром 200 mm, наполненные жидким азотом, в который погружен поглотитель. Излучение отражается в горизонтальном направлении плоскими зеркалами из полированного листового алюминия. На рис. 5 приведено фото экспериментального радиометра. В процессе исследования был апробирован также вариант ХЧТ большой апертуры, который мог бы заменить собой (объединить) пару равноценных излучателей, изображенных на рис. 2 и 3. Размер пенопластовой коробки с жидким азотом был выбран достаточно большим, чтобы одновременно перекрыть апертуры обоих плеч радиометра. Излучение

выходило горизонтально через радиопрозрачную стенку, которая непрерывно обдувалась потоком воздуха комнатной температуры, чтобы предотвратить конденсацию влаги и избежать дополнительных СВЧ-потерь. В качестве чернотельного вещества использовались два материала: микроволновый поглотитель Eccosorb AN-72 (губка) [12] и ТК-РАМ (пластиковые микропирамидки) [13]. Черное тело в коробке из пенопласта показало свою работоспособность на частотах около 840 GHz, однако систематические измерения были проведены с использованием двух раздельных черных тел (рис. 2, 3, 5).

Для управления экспериментом использовался многофункциональный программный комплекс лабораторной автоматизации „ИРТЕКОН“ [14], работающий с операционной системой „Windows XP“. Для работы с аналоговым источником смещения СИС-смесителя использовалась измерительная карта „National Instruments“ PCI-6229; были задействованы также интерфейсы в стандартах GPIB и USB для блока питания и управления ЛОВ 6, измерителем мощности ПЧ, YIG-фильтром и поляризационным аттенуатором 7 (рис. 4), а также обтюратором 1 (рис. 2). „ИРТЕКОН“ осуществлял автоматический сбор, обработку и интерпретацию (математическое преобразование) данных с измерителей постоянных и переменных токов в соответствии со сценариями пользователя, которым задаются шаги и диапазоны сканирования, времена измерений и их последовательность, число усреднений и другие параметры для каждого из устройств. Двулопастный обтюратор-переключатель вращался с частотой 2.5 Hz и обеспечивал переключение плеч с частотой 5 Hz; значение мощности в канале ПЯ измерялось с помощью ваттметра E4419 фирмы „Agilent“ со скоростью 40 отсчетов в секунду. Система была настроена таким образом, что значение сигнала разбаланса антенного переключателя было положительным, если интенсивность сигнала была выше в левом (измерительном) плече. Два значения выходной мощности P_H и P_C регистрировались для каждого цикла обтюратора в течение примерно 0.05 s в фазе с полностью открытой или полностью закрытой апертурой обтюратора; сигнал контраста Y усреднялся среди 10 последовательных отсчетов. Такой процесс соответствует эффективному времени интегрирования 0.5 s. Функции синхронного детектора и интегратора были реализованы программными средствами. На мониторе в реальном времени выводилась кривая зависимости сигнала контраста Y от времени; после окончания измерений вычислялось среднее значение контраста и другие статистические параметры.

Калибровка радиометра

Измерялся сигнал контраста R_{HC} от двух чернотельных излучателей известного (калиброванного) уровня 300 и 80 K $P_{HC} = P_H - P_C$ и сравнивался с контрастом измеряемого образца R_{SW} . Для определения температу-

ного контраста образца T_{SW} использовалась формула

$$T_{SW} = T_{HC} \frac{P_{SW}}{P_{HC}}. \quad (5)$$

В соотношении (5) $T_{HC} = T_H - T_C = 220$ K — это разница термодинамических температур холодного и горячего черных тел, которые считаются известными с точностью их физических температур и коэффициентов черноты, что отражено в формуле (1). Для перевода полученного сигнала контраста образца в его температурный вклад нет необходимости знать ни истинную мощность P_{SW} или P_{HC} , ни шумовую температуру приемника — эти значения неявно присутствуют в величине относительного контраста Y , получаемого при калибровке. Формулу (5) можно переписать, используя значения относительного контраста Y_{SW} и Y_{HC} , взятые в линейных единицах,

$$T_{SW} = \frac{T_{HC}(Y_{SW} - 1)}{Y_{HC} - 1}. \quad (6)$$

Отметим, что общепринятая методика измерения шумовой температуры гетеродинных приемников на основе СИС-переходов основана на использовании чернотельного источника комнатной температуры. Это связано с достаточной высокой мощностью насыщения СИС-смесителей вообще. Оптимальная точка смещения СИС-смесителя на основе эпитаксиальных пленок нитрида ниобия (NbN) составляет 4.5 mV и находится на достаточно широком линейном участке вольт-амперной характеристики (ВАХ). Это дает нашему эксперименту заметное преимущество по мощности насыщения относительно других типов СИС-смесителей. Предположив гипотетически, что при калибровке имеет место небольшое насыщение — перепад мощности P_{HC} занижен, то вычисленный контраст образца T_{SW} окажется завышенным, а значение эмиссии окажется оценкой *сверху*.

Пример калибровки приведен на рис. 6, ошибка измерения уровней составила 10^{-2} dB. Погрешность T_{HC} обусловлена неточностью используемых значений комнатной температуры и температуры холодного поглотителя, что составляет ± 5 K. Это приводит, согласно (5), к погрешности $T_{SW} \pm 2.5\%$, оставаясь заметно меньше, чем среднестатистическая девиация измеренного сигнала (до 20%), определяемая шумами радиометра вблизи порога чувствительности. Для нашей конкретной конфигурации было экспериментально получено $Y_{HC} = 1.25 \pm 0.015$ dB ($Y_{HC} = 1.334$ dB), как показано на рис. 6, что дало шумовую температуру $T_N = 565 \pm 10$ K.

В процессе наладки было обнаружено, что сигнал опорного плеча заметно „горячее“. Этот паразитный эффект был устранен с помощью пенопластовой кюветы 8 с холодным поглотителем (77 K), блокирующим комнатный фон в направлении 9, как показано на рис. 2, 3 и 5. Поглотитель 8 устранил попадание на крыльчатку обтюратора комнатного фона. На рис. 7 показан результат проверки балансировки радиометра с помощью двух разных холодных поглотителей AN-72

и ТК-РАМ в опорном и измерительных плечах. После перемены места нагрузок, которые отличались исключительно материалом поглотителя, разностный сигнал поменял свой знак, что однозначно говорит о разном коэффициенте черноты указанных материалов.

Можно подумать, что неодинаковость амплитуд отклика (рис. 7) является свидетельством систематического сдвига нуля радиометра. Детальный же анализ показал, что данный эффект можно объяснить, используя базовые формулы (4.1)–(4.4). Главную роль здесь играет учет отражения фона T_{RM} , поступающего с направления 4 на ХЧТ 3 при открытой апертуре образца, как показано на рис. 2. Смещение шумовой дорожки возникает из-за ненулевого отражения ХЧТ-опорного плеча, куда поступает горячий фон 300 К, а интенсивность фона в сигнальном плече оказывается близкой к 80 К, поэтому отражением ХЧТ можно пренебречь. Используя систему уравнений (4) и экспериментальные значения „смещения нуля“, были вычислены собственные коэффициенты черноты поглотителей A_1 и A_2 :

$$1 - A_1 = 0.12 - 0.16\%$$

(уровень отражения $(-29) - (-27.5)$ dB),

$$1 - A_2 = 0.4 - 0.5\%$$

(уровень отражения $(-24) - (-23)$ dB).

Отметим, что отражение от поверхности жидкого азота учтено в (4.1)–(4.4), поэтому полученные значения

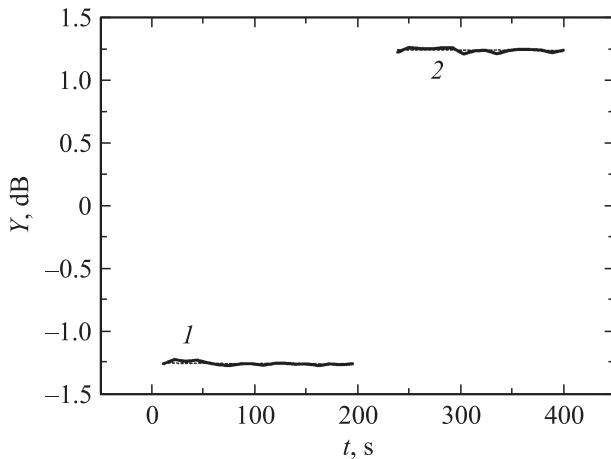


Рис. 6. Калибровка СИС-радиометра на частоте 842 GHz: представлен сигнал контраста, сбалансированного радиометра в зависимости от времени. Ступенчатое изменение уровня контраста Y , с отрицательного значения (дорожка 1) на положительное (дорожка 2), соответствует взаимной перестановке местами холодного поглотителя (77 К) в измерительном плече и поглотителя комнатной температуры (295 К) в опорном плече. Уровень контраста, определенный по статистическому среднему (пунктирные прямые), составляет по модулю с учетом стандартного отклонения 1.25 ± 0.015 dB, что соответствует шумовой температуре приемника 565 ± 10 К, а с учетом коррекции на шумы, вносимые пленочным диплексером — 330 ± 8 К.

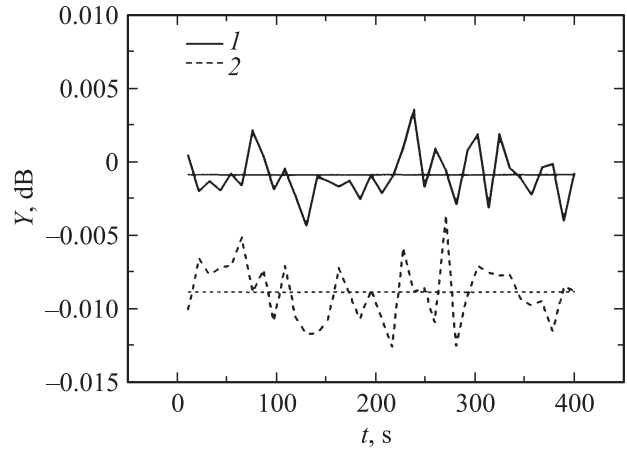


Рис. 7. Эффект смещения нуля балансного радиометра за счет проникновения в опорное плечо радиометра фоновое излучение, отраженного от двух поглотителей со слегка разным коэффициентом черноты. Дорожка 1 характеризует отражение фонового излучения от охлажденных до 77 К поглотителей: марки Eccosorb AN-72 (губка) в опорном плече и поглотителя из микропирамид ТК-РАМ в сигнальном плече переключателя. Дорожка 2 измерена для случая, когда поглотители поменяли местами. Вычисленный коэффициент отражения составил 0.12–0.16%, или $(-29) - (-27.5)$ dB, для AN-72 и 0.4–0.5%, или $(-24) - (-23)$ dB для ТК-РАМ. Горизонтальные линии характеризуют статистическое среднее контраста Y для обоих измерений (детали см. на рис. 3).

черноты A_1 и A_2 относятся именно к поверхности охлажденного (погруженного) материала, включая эффект диффузного рассеивания. В расчете предполагалось, что отражение от ХЧТ полностью диффузное, т. е. отраженное излучение в области рабочих частот изотропно и не зависит от направления падающего излучения, что характерно для пористых (рассеивающих) микроволновых поглотителей.

Результаты и их обсуждение

Балансный радиометр оказался прибором, удобным для сравнения коэффициента черноты поглощающих материалов. Эксперименты по балансировке радиометра стимулировали изучение свойств ряда материалов, применяемых для конструирования черных тел на миллиметровых и сантиметровых волнах. Практический интерес представляет влияние стенок из пенопласта в первую очередь из-за вариаций плотности материала, а также из-за наличия внутренней структуры (зернистости) и конечной влажности такой радиопрозрачной стенки. Отражение на разделе диэлектриков воздух–пенопласт и пенопласт–азот составило около 1%, а наличие диффузного рассеяния излучения комнаты и его поглощение, в особенности в теплой части пенопластовой стенки толщиной 20 мм, дало 4–10% потерь, что заметно повышает эффективную температуру ХЧТ. Основываясь

на полученных данных, мы не можем рекомендовать кюветы для точных радиометрических измерений на терагерцовых частотах.

Для измерения поглощения металлических панелей использовались два пучка, излученные соседними (равновесными) областями одного ХЧТ, как показано на рис. 3, что наиболее близко к искомой конфигурации с рис. 1. Для образцов отражающих материалов было проведено по 3 измерения, каждое длительностью около 400 с, как показано на рис. 8. Оценить качество измерений и понять имеющийся потенциал можно, рассчитав теоретическую предельную чувствительность модуляционного радиометра δT с учетом эффективных шумов на входе $T_N + T_{BG}$ и дрейфа коэффициента усиления $\Delta G/G$, используя формулу

$$\delta T = \sqrt{(T_N + T_{BG})^2 \frac{\alpha^2 \Delta F}{\Delta f} + \Delta T_C^2 \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2} \quad (7)$$

[15], [16] для следующих значений — $T_N = 570$ К, $T_{BG} = 80$ К, $\Delta F = 1$ Hz, $\Delta f = 8$ HGz коэффициента модуляции $\alpha = 2$ (меандр). Для нашего случая опорный источник слабансирован, поэтому $\Delta T_C = 0$. Если пренебречь медленным дрейфом коэффициента пропускания, положив $\Delta G = 0$, что правомерно при условии $f_M \gg f_D$, по формуле (7) получим флуктуационную чувствительность $\delta T = 0.015$ К.

Из экспериментальных данных, представленных на рис. 8, получено, что среднестатистическая девиация сигнала контраста составляет 0.001 dB, что по температурной шкале эквивалентно 0.15 К. Объяснить экспериментальное значение флуктуационной чувствительности, которое на один порядок больше теоретической, можно с помощью формулы (7), предположив возмож-

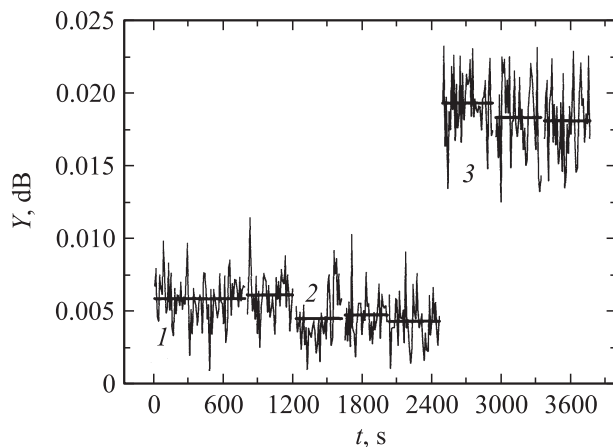


Рис. 8. Экспериментальные данные по измерению эмиссии отражающих поверхностей на частоте 842 GHz. 1 — дорожка контраста Y для листа фосфорной бронзы, 2 — для тестовой антенной панели и 3 — для листа нержавеющей стали. Каждый образец измерялся в общей сложности по 1200 с в серии из 3-х измерений по 400 с каждое. Горизонтальные линии — статистическое среднее для каждого 400-секундного измерения.

ность „быстрой“ нестабильности коэффициента пропускания $\Delta G/G = 2.3 \cdot 10^{-4}$ вследствие кипения жидкого азота, которое представлено волнообразным движением (вибрацией) поверхности раздела воздух–азот, а также газовыми пузырьками в толще жидкого азота. Конечная чернота охлажденного поглотителя, расположенного на дне сосуда Дьюара на глубине несколько сантиметров, и отражение от границы раздела воздух–азот создают условия для интерференции волн с нормальным падением, что приводит к периодичной частотной зависимости эффективного коэффициента черноты. Механическое движение поверхности азота приводит к изменению фазы интерферирующих волн, из-за чего минимумы и максимумы коэффициента черноты меняют свое положение на шкале частот случайным образом, изменяя спектральную плотность фона, а в интеграле — детектируемую мощность чернотельного излучения в полосе приема. Описанный процесс определяет нестабильность опорного фона и в определенных условиях предел чувствительности радиометра.

Используя найденное выше значение отражения поглотителя AN-72 (-27 dB в логарифмических единицах) и коэффициент отражения поверхности жидкого азота (-19.5 dB), был проведен численный эксперимент по интерференции электромагнитных волн в среде с параллельными слабо отражающими границами. Внутри полосы ПЧ был получен ряд максимумов на уровне -16.5 dB и минимумов на уровне -24 dB, этот перепад эквивалентен локальным изменениям эффективной черноты в 1.6%. Перевод в температурную шкалу при базовой температуре ЧТ 80 К дает вариации фона в 1.3 К, что значительно больше измеренных флуктуаций радиометра. Ясно, что вариации фона, улавливаемые приемной системой, будут заметно меньше вычисленного значения 1.3 К, так как представляют собой интеграл (усреднение) по полосе ПЧ (4–8 GHz), а также по поверхности азота, попадающей в апертуру пучка диаметром около 20 mm. Точный расчет представляет непростую задачу, так как требуется знание спектра и амплитуды колебаний поверхности азота. В случае если спектральные компоненты таких колебаний сравнимы с частотой переключения радиометра (5 Hz), представляется логичным ассоциировать кипение азота со значительной, если не с доминирующей, частью флуктуаций нашего лабораторного радиометра. Здесь мы приходим к выводу, известному из практической радиометрии: для получения предельной чувствительности охлаждаемых радиометров присутствие в области сигнального тракта криогенной жидкости (жидкий азот или гелий) нежелательно. Тем не менее полученная чувствительность радиометра $\delta T = 0.15$ К оказалась достаточной для решения поставленных задач.

Детальный анализ экспериментальных данных показал, что сигнал контраста образца панели радиотелескопа АЛМА, изготовленного из алюминия со специальной матовой поверхностью, составил (0.00434 ± 0.001) dB или 0.65 ± 0.15 К, что соответствует тепловой эмис-

Термодинамическая температура шума и поглощение для некоторых материалов и их комбинаций

Материал или комбинация	Параметры на частоте 842 GHz	
	шум; К	поглощение; %
Алюминиевая панель со специальной матовой обработкой (ALMA) при комнатной температуре	0.9 ± 0.15	0.31 ± 0.07
Фосфорная бронза, катаный лист с зеркальной поверхностью при комнатной температуре	1.25 ± 0.15	0.41 ± 0.07
Нержавеющая сталь, катаный лист с матовой поверхностью при комнатной температуре	4.0 ± 0.15	1.30 ± 0.07
Губчатый СВЧ-поглотитель Eccosorb AN-72, погруженный в жидкий азот, и одно алюминиевое зеркало комнатной температуры. Сквозь поверхность азота	78.9	99.9
Пластиковые микропирамидки ТК-РАМ, погруженные в жидкий азот, и одно алюминиевое зеркало комнатной температуры. Сквозь поверхность азота	79.2	99.6
Ящик из пенопласта, наполненный жидким азотом, поглотитель AN-72. Сквозь стенку	85–100	–
Только стенка ящика с жидким азотом из пенопласта, толщина 2 см	–	4–10

сии 0.9 К при физической температуре 290 К и поглощению около 0.31%. Для фосфорной бронзы было измерено 0.88 К, 1.2 К и 0.41% соответственно. Для нержавеющей стали эти значения составили 2.8 К, 3.8 К и 1.30%. Вычисленное среднестатистическое отклонение дало абсолютную точность коэффициента отражения $\pm 0.07\%$, что соответствует относительной точности $\pm 20\%$ для алюминиевого образца. При пассивном охлаждении алюминиевой панели в условиях открытого космоса до температуры около 40 К ее тепловую эмиссию можно оценить как 0.15 К. Экспериментально полученные данные по тепловой эмиссии сведены в таблицу.

Заключение

Точность и надежность полученных данных определяется в значительной степени учетом систематических

погрешностей и флуктуаций, главными источниками которых является проникновение постороннего излучения комнатной температуры (около 300 К) и процесс кипения жидкого азота. Было продемонстрировано, что влияние постороннего излучения можно устранить с помощью правильно подобранных поглотителей, а остальные эффекты могут быть отнесены к недостаточной черноте используемых антенных нагрузок. Эффект остаточного дисбаланса хорошо описывается (качественно и количественно) открытой апертурой на месте измеряемого образца, через которую попадает и рассеивается на черном теле излучение комнаты. Из согласия результатов моделирования и эксперимента можно сделать вывод, что в системе отсутствовали неучтенные паразитные фоновые эффекты. В перспективе снижение постороннего фонового излучения до уровня 80 К может привести к кардинальному устранению паразитных эффектов, которые даже в нашем случае малы и близки к предельной чувствительности радиометра, которая, вероятнее всего, ограничена флуктуацией холодного опорного фона из-за нестабильности поверхности жидкого азота.

Проведенные измерения тепловой эмиссии ряда материалов позволяют сделать вывод о высокой эффективности метода при его относительной простоте. Статистическая ошибка измерения составила ± 0.15 К. Поглощение образца антенной панели, вычисленное из интенсивности добавленного теплового излучения, составило $0.31 \pm 0.07\%$ в районе частоты 842 GHz, что надежно меньше 1% и удовлетворяет спецификации антенны ALMA.

Чувствительность метода может быть улучшена путем устранения флуктуаций источников опорного фона 80 К и применения системы стабилизации гетеродина. Предложенный метод может найти применение при сертификации панелей антенн терагерцового диапазона для российских и международных проектов наземной и космической радиоастрономии, таких как „Миллиметрон“, PATAN, ALMA и др.

Авторы благодарят Д. Инатани (Junji Inatani) за предложенную тему исследования, Т. Коджима (Takafumi Kojima) и Й. Узава (Yoshinori Uzawa) за помощь в проведении эксперимента, Х. Мацуо (Hiroshi Matsuo) за плодотворные дискуссии, В. Шен (Wenlei Shen), М. Такеда (Masanori Takeda) и З. Ванг (Zhen Wang) за техническую поддержку.

Настоящая работа поддержана ALMA-J Project Office (Япония) и программой по развитию научного приборостроения РАН.

Список литературы

- [1] Интернет-ресурс, <http://www/alma.nrao.edu/>
- [2] Интернет-ресурсы, <http://asc-lebedev.ru/?dep-20;> <http://www.laspace.ru/rus/millimetron.php>
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Физматлит, 2001. Ч. 1. Изд. 5-е. 616 с.

- [4] *Lange A.E., Hayakawa S., Matsumoto T.* et al. // *Appl. Optics*. 1987. Vol. 26, N 2. P. 401–409. DOI: 10.1364/AO.26.000401.
- [5] *Bock J.J., Parikh M.K., Fisher M.L.* et al. // *Appl. Optics*. 1995. Vol. 34, N 22. P. 4812–4816. DOI: 10.1364/AO.34.004812.
- [6] *Schwab R., Heidinger R.* // *Proc. 21st Infrared and Millimeter Waves Conf. Berlin, 16–20 July 1996*. Report ATh7.
- [7] *Kasperek W., Fernandez A., Hollmann F.* et al. // *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*. 2001. N 11. P. 1965–1707.
- [8] *Tretyakov M.Yu., Parshin V.V., Koshelev M.A.* et al. // *J. Mol. Spectr.* 2006. Vol. 238. P. 126–132.
- [9] *Uzawa Y., Wang Z., Saito A.* et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2003. Vol. 13, N 2. P. 692–695.
- [10] *Hosking M.W., Tonkin B.A., Proykova Y.G.* et al. // *Supercond. Sci. Technol.* 1993. N 6. P. 549–552. DOI: 10.1088/0953-2048/6/7/018.
- [11] *Кузьмин С.Е., Радзиховский В.Н., Пилипенко А.М.* // *Техника и приборы сверхвысоких частот*. 2008. № 1. Интернет-ресурс: http://www.nbu.gov.ua/Portal/natural/tpsvc/texts/2008_1/23-24.pdf
- [12] *Emerosn & Cuming Microwave Products, Inc.*, Randolph, MA, USA. Интернет-ресурс: <http://www.eccosorb.com>
- [13] *Thomas Keating Ltd.*, Billingshurst, U.K. Интернет-ресурс: <http://www.terahertz.co.uk/>
- [14] *Ermakov A.B., Shitov S.V., Baryshev A.M.* et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2001. Vol. 11, N 1. P. 840–843.
- [15] *Интернет-ресурс*. Единое окно доступа к общеобразовательным ресурсам: http://window.edu.ru/window_catalog/files/r44719/mich402.pdf
- [16] *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* *Радиотелескопы и радиометры*. М.: Наука, 1973. 432 с.