

УДК 621.382.2

ФЛУКТУАЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

© 2009 г. Р. В. Ожегов, О. В. Окунев, Г. Н. Гольцман,
Л. В. Филиппенко, В. П. Кошелец

Поступила в редакцию 16.07.2008 г.

Исследована зависимость флукутационной чувствительности сверхпроводящего интегрального приемника (СИП) от шумовой температуры приемника и величины входного сигнала. Измерена рекордная флукутационная чувствительность приемника (13 ± 2 мК), полученная при шумовой температуре приемника 200 К, ширине полосы промежуточных частот 4 ГГц и постоянной времени 1 с. При уменьшении входного сигнала наблюдалось улучшение флукутационной чувствительности; предложено объяснение полученного эффекта: причиной является уменьшение влияния нестабильностей источников питания приемника и усилительного тракта при снижении входного сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий терагерцового диапазона частот способствовало началу активного применения разработанных устройств в различных областях. Особенно заметно внедрение терагерцовых приемников в медицине, интроскопии промышленных конструкций, воздушной и морской навигации в условиях плохой видимости, пожарной охране, службах экологического мониторинга и системах безопасности. Приемники этого диапазона частот позволяют существенно увеличить чувствительность и информативность применяемых технологий.

Использование систем тепловидения ИК-диапазона волн широко развито, однако в ряде случаев ИК-тепловизоры малоэффективны вследствие значительного поглощения ИК-излучения одеждой человека и его поверхностными тканями, различными материалами и взвесьями в атмосфере. В настоящее время также развиты методы получения изображений в диапазоне радиочастот. Излучение радиочастот обладает гораздо большей проникающей способностью, тем не менее, и оно не позволяет получать изображения с хорошим пространственным разрешением, поскольку разрешение подобного прибора определяется рабочими длинами волн и по порядку величины совпадает с ними. Использование терагерцового диапазона частот дает возможность, сохранив характерную для радиочастот прозрачность материалов, и получить хорошее пространственное разрешение.

В настоящее время тепловизоры миллиметрового диапазона разрабатываются в ряде компаний (например, Millivision, ThermoTrex Corp, TRW Space & Electronics Group, DERA Malvern, Air Force Res. Lab.) Основными достижениями на сегодняшний момент являются разработка и создание опытных серий ска-

нирующих приборов с полупроводниковыми болометрами и диодами Шоттки в качестве чувствительных элементов. Изображения получаются с температурным разрешением >2 К и пространственным разрешением ~ 2 мм. При этом основным недостатком является то, что приходится работать в диапазоне длин волн 3...8 мм, в котором низкое пространственное разрешение и недостаточная температурная чувствительность.

Для получения терагерцовых изображений мы предлагаем использовать технологию, основанную на работе сверхпроводящего интегрального приемника (СИП), разрабатываемого в ИРЭ РАН совместно с Институтом космических исследований Голландии (SRON) [1–3]. В одной микросхеме этого приемника интегрированы квантовый смеситель на основе квазичастичной нелинейности туннельного перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС-перехода), планарная сверхпроводящая приемная антенна и криогенный генератор на вязком течении джозефсоновских вихрей (flux flow oscillator, FFO) [4–6]. При подаче постоянного питания от батарей микросхема работает в качестве полноценного гетеродинного приемника терагерцового диапазона частот, не требующего дополнительного СВЧ-оборудования. В настоящее время подобный приемник с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) гетеродина является одним из основных инструментов проекта TELIS, направленного на исследование атмосферы Земли с борта высотного аэростата [3, 7].

Ранее СИП не использовали для получения радиоизображений в терагерцовом диапазоне частот. Тем не менее такие характеристики СИП, как низкая шумовая температура, большой рабочий диапазон частот и узкая линия генерации гетеродина, делают его, пожалуй, наилучшим инструментом для

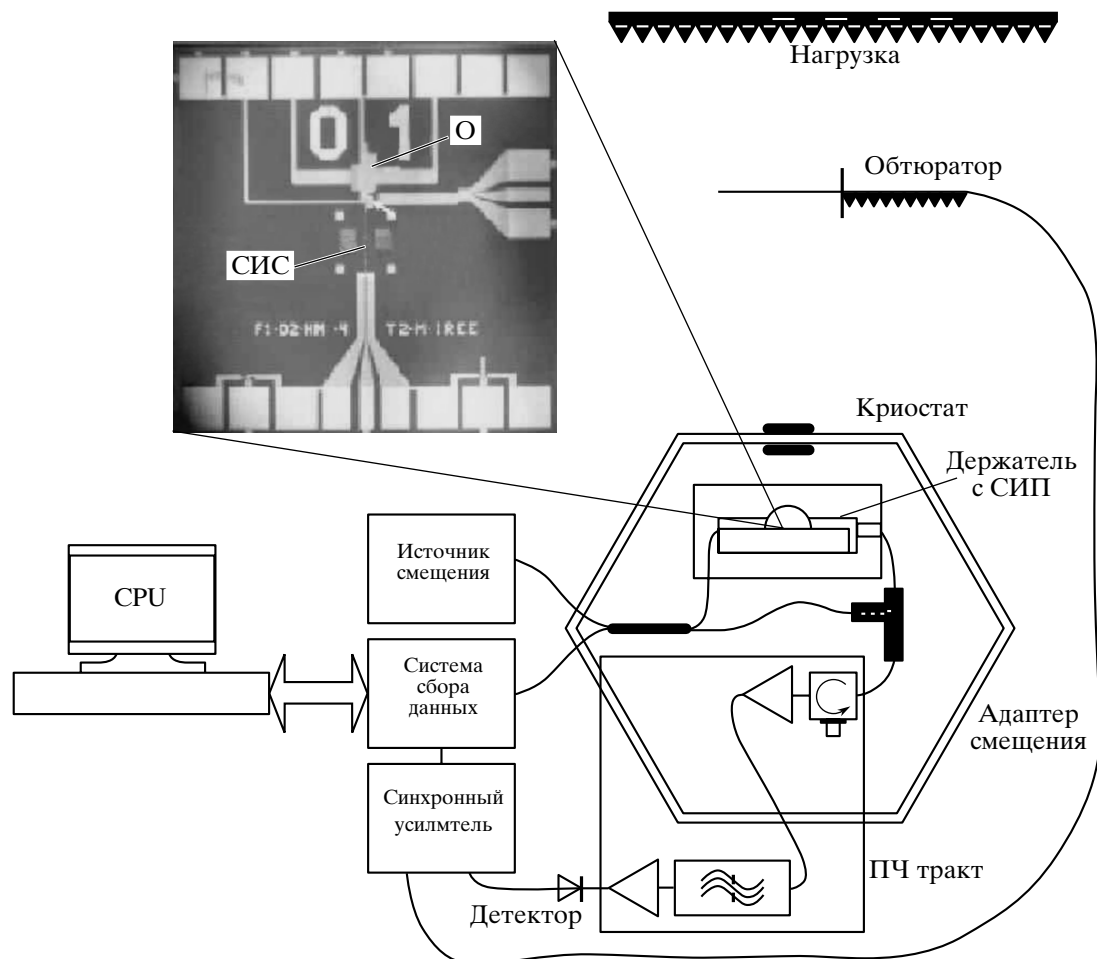


Рис. 1. Блок-схема установки для изучения флуктуационной чувствительности СИП.

получения терагерцовых изображений. Основными достоинствами разрабатываемой системы получения терагерцовых изображений является высокая температурная чувствительность, высокое пространственное разрешение, возможность регистрации спектральных особенностей наблюдаемых объектов, а следовательно, и возможность определять материал, из которого изготовлен наблюдаемый объект, с целью распознавания потенциально опасных материалов (пластиковое оружие, взрывчатка, наркотики).

В данной работе авторы исследовали влияние шумовой температуры и стабильности характеристик СИП на его флуктуационную чувствительность¹. Стоит отметить, что определяющую роль в формировании стабильности приемника играет стабильность сверхпроводникового генератора гетеродина, FFO. Отметим, что для проекта TELIS созданы специальные алгоритмы автоматического выбора рабочей точки и ее поддержания с помощью широ-

кополосной системы ФАПЧ. Используемая система позволяет существенно повысить стабильность FFO.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Блок-схема установки для изучения флуктуационной чувствительности СИП представлена на рис. 1. Основным элементом измерительной установки является сверхпроводящий интегральный приемник, который объединяет на одной микросхеме с размерами $4 \times 4 \times 0.5 \text{ мм}^3$ малошумящий СИС-смеситель, интегрированный с квазиоптической антенной, сверхпроводниковый генератор на потоке джозефсоновских вихрей (FFO) и гармонический смеситель для фазовой стабилизации частоты этого генератора. В настоящее время СИП является достаточно развитым инструментом, обладающим низкой шумовой температурой в большом диапазоне частот ($T_R < 200 \text{ К}$ в диапазоне частот 500...700 ГГц) с возможностью перестройки частоты гетеродина.

Измерения проводили в двух близких по конструкции системах, (далее подробно описана одна

¹ В англоязычной терминологии NETD – noise equivalent temperature difference.

из них). Сверхпроводниковый интегральный приемник располагали на гиперполусферической линзе, изготовленной из высокорезистивного кремния. Линза крепится в специальном держателе, на котором установлена плата сопряжения приемника с элементами систем управления и сбора данных. Держатель устанавливали на холодную плату в вакуумном объеме гелиевого криостата. Характеристики СИП существенно ухудшаются в условиях влияния внешнего магнитного поля. Для устранения этого влияния использовали специальный экран, состоящий из двух оболочек: сверхпроводника (свинец) и криопермалоя. Применение такой системы экранов позволяет снизить влияние внешних магнитных полей до требуемого приемником уровня. В дополнение к вышеуказанным свойствам эта система служит также и радиационным экраном криостата. Во избежание насыщения смесителя тепловым фоном на входное окно экрана устанавливается инфракрасный фильтр “Zitex” толщиной 390 мкм. Такой же фильтр установлен и на экране азотной температуры криостата. В качестве входного вакуумного окна криостата используется тefлон толщиной 2 мм.

Для изучения флуктуационных свойств поле зрения приемника перекрывалось обтюратором с лопастями, яркостная температура в терагерцовом диапазоне которых была равна комнатной температуре. За обтюратором помещалась согласованная нагрузка (в интересующем нас диапазоне частот материал, из которого изготовлена эта нагрузка, ведет себя как абсолютно черное тело) с варьируемой температурой. Представленная схема позволяет измерять и шумовую температуры, и флуктуационную чувствительность приемника. Для получения изображений система должна быть снабжена квазиоптическим объективом, представляющим собой систему параболических зеркал, и механическим сканером, осуществляющим развертку по плоскости объекта.

Для разделения управляющего смесителем напряжения и сигнала на промежуточной частоте используется адаптер смещения. Низкочастотный разъем адаптера смещения соединен с системами управления и сбора данных. Сигнал на промежуточной частоте смесителя с выхода адаптера смещения подается через циркулятор на малозумящий усилитель, находящийся при гелиевых температурах. Далее сигнал промежуточной частоты (ПЧ) поступает через усилитель, находящийся при комнатной температуре, быстродействующий детектор и синхронный детектор к системе сбора данных. При этом были использованы две пары охлаждаемых и комнатных усилителей. Диапазон рабочих частот для первого набора усилителей составлял 1.2...1.7 ГГц, для второго 4...8 ГГц. Общий коэффициент усиления тракта ПЧ в обоих случаях ~ 65 дБ.

Система сбора данных [9] соединена с компьютером интерфейсной шиной USB. Информация обрабатывается и представляется пользователю при помощи оригинального программного обеспечения.

Данная схема приемника может быть использована как для получения изображений в терагерцовом диапазоне частот, так и для тестирования СИП: определения рабочих зон и шумовой температуры.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках данного исследования интегральный приемник включен в схему радиометра. Предельная флуктуационная чувствительность приемника определяется выражением [8]

$$\Delta T_H = \alpha \frac{T_R}{q} \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{T_S}{T_R} \right)^2 + \frac{T_S}{T_R}}, \quad (1)$$

где ΔT_H – флуктуационная чувствительность супергетеродинного приемника, T_R – шумовая температура приемного устройства, T_S – яркостная температура наблюдаемого объекта, q – радиометрический выигрыш, α – безразмерный коэффициент порядка единицы, величина которого меняется от 2 до 4 и зависит от выбора схемы приемника. Для схемы модуляционного радиометра с прямоугольной модуляцией и синусоидальной демодуляцией, используемой в данной работе, коэффициент $\alpha = \pi$.

Шумовая температура радиометра, предназначенного для наблюдения космических объектов, обычно существенно превышает температуру наблюдаемого объекта, в этом случае хорошим приближением формулы (1) является выражение (2):

$$\Delta T_H = \alpha \frac{T_R}{q}. \quad (2)$$

Для случая тепловизора, предназначенного для получения изображений с температурами, близкими к 300 К, возможна ситуация, когда шумовая температура по величине либо сопоставима, либо меньше температуры наблюдаемого объекта. В такой ситуации температура объекта определяет тепловую чувствительность приемника. В предельном случае, когда шумовая температура приемника существенно ниже температуры объекта, формула (1) переходит в следующее выражение

$$\Delta T_H = 0.612 \alpha \frac{T_S}{q}. \quad (3)$$

Для изучения зависимости флуктуационной чувствительности от шумовой температуры СИП использовался тракт ПЧ с диапазоном рабочих частот 1.2...1.7 ГГц. В тракт ПЧ помещали полосовой фильтр с шириной полосы пропускания 200 МГц. Выбор определенного значения шумовой температуры приемника достигали изменением рабочего

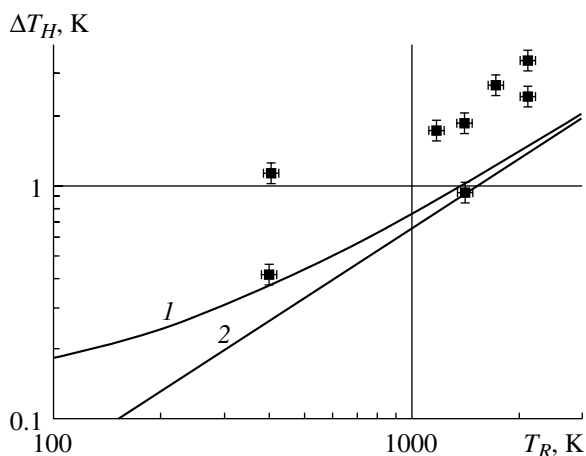


Рис. 2. Зависимость флуктуационной чувствительности от шумовой температуры. Кривые 1, 2 построены для значения параметра $q = 1.4 \times 10^4$ (ширина полосы тракта промежуточных частот В 200 МГц, постоянная времени усреднения $\tau = 1$ с). Кривая 2 построена при комнатной температуре ($T_S = 300$ К). Точки – эксперимент, линии – расчет.

режима FFO (меняли рабочую частоту и уровень нагрузки смесителя). Сигнал с быстродействующего детектора поступал на синхронный детектор, синхронизированный с частотой обтюлятора. Выход-

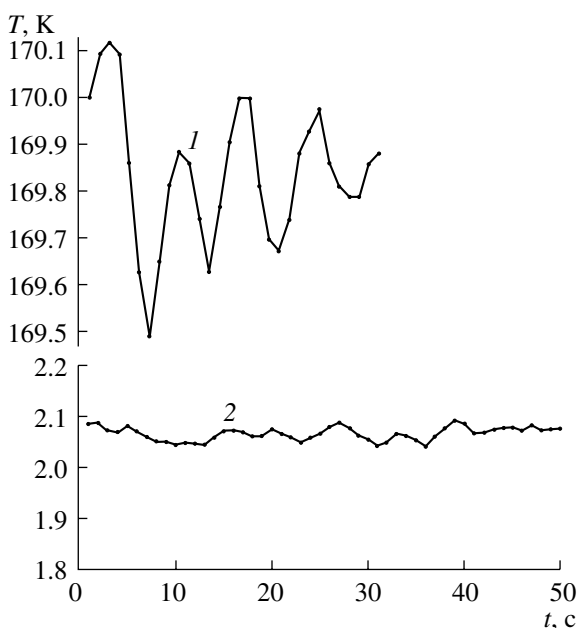


Рис. 3. Временные зависимости сигнала T , выраженного в единицах температуры, при использовании согласованной нагрузки на входе различной температуры. Для кривой 1 разница температур между лопастями обтюлятора и согласованной нагрузкой было 170 К, при этом стандартное отклонение составляет 146 мК, для кривой 2 разница температур была 2 К, что позволило получить стандартное отклонение 13 мК.

ной сигнал синхронного детектора усреднялся с постоянной времени τ . За флуктуационную чувствительность принималось стандартное отклонение сигнала, выраженное в единицах температуры. Все экспериментальные данные получены без использования ФАПЧ FFO.

На рис. 2. представлены измеренные значения флуктуационной чувствительности в зависимости от шумовой температуры приемника. Погрешность измерения флуктуационной чувствительности определялась временем накопления сигнала и не превышала 7%. Погрешность измерения шумовой температуры не превышала 10%. Сплошными линиями 1, 2 представлены теоретические зависимости, построенные соответственно по выражениям (1) и (2).

Измерения проводили при различных величинах входного сигнала. Большой разброс значений флуктуационной чувствительности экспериментальных точек не связан с погрешностью эксперимента. В ходе проведения эксперимента было выяснено, что с уменьшением входного сигнала наблюдается улучшение чувствительности приемника. Более детальные объяснения этого факта приведены ниже. В случае больших шумовых температур вообще было невозможным уменьшить входной сигнал так, чтобы достичь предельной флуктуационной чувствительности приемника. Однако в ряде случаев достижение предельной флуктуационной чувствительности было возможно, что и продемонстрировано на рис. 2. При этом кривая 2 служит предельным случаем, ниже которого значения ΔT быть не могут.

Для демонстрации предельной флуктуационной чувствительности использовали тракт промежуточной частоты с полосой усиления 4...8 ГГц. При этом выбирали рабочую точку с лучшей шумовой температурой – в рамках данного эксперимента 200 К на частоте гетеродина 500 ГГц. Измерения проводили с использованием ФАПЧ FFO. Величину сигнала определяли разницей между физическими температурами лопастей обтюлятора и согласованной нагрузки. Учитывая линейные свойства СИС-смесителя, выходной сигнал может быть выражен в единицах температуры. На рис. 3 представлены временные зависимости сигналов при разнице температур нагрузки и лопастей обтюлятора 170 К и 2 К. Стандартное отклонение линии при большом сигнале (170 К) составляет 146 мК, при малом сигнале (2 К) – 13 мК. Погрешность измерения флуктуационной чувствительности не превышало 14% и составляла 2 мК.

В используемом приемнике мы вплотную приблизились к предельному значению шумовой температуры, ниже которого чувствительность приемника становится в основном зависимой от яркостной тем-

пературы объекта наблюдения (см. формулу (3)). Дальнейшее улучшение чувствительности системы возможно лишь путем увеличения радиометрического выигрыша. Для этого необходимо увеличить либо полосу усиления тракта промежуточной частоты, либо время накопления.

Получаемая в эксперименте флуктуационная чувствительность полностью соответствует теоретическим предсказаниям. Различия двух представленных на рис. 3, можно объяснить следующими соображениями. В данном случае имеем амплитудно-модулированный сигнал, который можно представить в следующем виде:

$$U(t) = U_0(1 + \delta U \sin(\Omega t)), \quad (4)$$

где Ω – круговая частота модуляции сигнала, U_0 – среднее значение величины сигнала, δU – глубина модуляции сигнала (этот коэффициент соответствует относительной величине полезного сигнала).

Предположим, что тракт промежуточной частоты обладает нестабильностью, связанной с нестабильностью либо питания усилителей, либо рабочей точки смесителя, либо мощности гетеродина. На самом деле причин нестабильности может быть гораздо больше, мы не будем пока обсуждать источник этой нестабильности и ограничимся рассмотрением результата ее действия. Коэффициент преобразования тракта ПЧ $G(t)$ в таком случае может быть записан в виде

$$G(t) = G_0(1 + \delta G \sin(\omega t)), \quad (5)$$

где G_0 – среднее значение коэффициента усиления, который связан с потерями преобразования смесителя и коэффициентом усиления тракта промежуточной частоты, δG – глубина модуляции коэффициента усиления нестабильностью, определяющая относительную величину нестабильности.

Результатом действия синхронного детектора на сигнал является выражение

$$U_{\text{вых}}(t) = G(t)U(t)\sin(\Omega t). \quad (6)$$

Раскрывая это выражение, следует учесть действие фильтра низких частот, задающего постоянную времени синхронного детектирования. Для этого необходимо пренебречь всеми гармониками выходного сигнала, частоты которых отличны от нуля; в результате остается лишь пара гармоник:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{G_0 U_0}{2} \{ \delta U + \delta G(\omega = \Omega) \cos(\Omega - \omega)t + \delta U \delta G(\omega = 0) \sin(\omega t) \}. \quad (7)$$

В выражении (7) первое слагаемое, стоящее в фигурных скобках, соответствует полезному сигналу, а второе и третье слагаемые описывают проявление нестабильности сигнала. Следует учесть, что в реальном эксперименте нестабильности могут иметь

достаточно широкий спектр. Вклад второго слагаемого существен при частотах нестабильности близких к частоте модуляции сигнала. Для подавления этого паразитного вклада следует увеличивать частоту вращения обтюлятора, для избежания влияния $1/f$ шума, имеющегося в спектре нестабильностей коэффициента усиления тракта ПЧ. В эксперименте использовалась частота модуляции 400 Гц. Вклад третьего слагаемого существен при частотах нестабильности, близких к нулю, при этом величина паразитного вклада пропорциональна величине полезного сигнала ΔU . Демонстрацией вклада третьего слагаемого служат данные, представленные на рис. 3. Стандартное отклонение сигнала является функцией величины сигнала: разности температур между лопастями обтюлятора и согласованной нагрузкой. С уменьшением величины сигнала стандартное отклонение также уменьшается. При снижении сигнала с 170 К до 2 К чувствительность приемника улучшается более чем в 10 раз. Наилучшее значение, достигнутое в эксперименте, составляет 13 мК. Проявление аномальной зависимости ΔT_H от уровня сигнала свидетельствует о том, что стабилизация FFO при помощи ФАПЧ не является окончательным решением в достижении предельной чувствительности приемника. К настоящему времени до сих пор не ясен паразитный вклад стабильности источников питания смесителей, и стабильности коэффициента усиления тракта промежуточных частот. Обозначенный вопрос требует дополнительного изучения. Однако, стоит отметить, что приемник с флуктуационными характеристиками, полученными в рамках данной работы, может иметь широкое практическое применение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа дает общее представление о возможностях применения СИП в системах построения радиоизображений терагерцового диапазона частот. Описанная концепция приемника требует использования сложной сканирующей системы для построения изображений. Дальнейшее развитие СИП в направлении матричного приемника с большим количеством приемных элементов, позволит существенно улучшить чувствительность и уменьшить время получения кадра изображения.

Представленные результаты для флуктуационной чувствительности в 13 ± 2 мК при постоянной времени в 1 с являются рекордными для приборов подобного класса и позволяют надеяться на скорое использование предлагаемой системы в тепловизионных системах реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. № 9. P. 1273.
2. *Koshelets V.P., Shitov S.V.* // Supercond. Sci. Tech. 2000. V. 13. P. R53.
3. *Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 10–11. С. 935.
4. *Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K.* // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. № 6. P. 3302.
5. *Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K.* // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. № 11. P. 3 284.
6. *Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Ermakov A.B. et al.* // IEEE Trans. 2005. V. AS-15. № 2. Pt. 1. P. 964.
7. http://www.sron.nl/index.php?option=com_content&task=view&id=71&Itemid=130
8. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973.
9. *Ожегов Р.В., Гронский П.В., Муратова Т.В.* // ПТЭ. 2008. № 3. С. 177.