

УДК 621.3.091.1

А.В. Убайчин, Е.В. Рогожников

Антенны с управляемой диаграммой направленности в задаче повышения чувствительности радиометрических систем

Описан способ увеличения чувствительности радиометров, использующих метод дифференциальных измерений, за счет упрощения конструкции входной СВЧ-части на примере модифицированного нулевого радиометра. Показана эффективность способа для реализации радиометрической системы бортового базирования. Проведен анализ предложенной структурной схемы устройства, рассмотрен алгоритм ее работы и управления.

Ключевые слова: нулевой радиометр, метод дифференциальных измерений, микроволновая радиометрия, пассивные СВЧ-устройства.

Радиометрические исследования являются одними из важнейших способов получения информации о состоянии окружающей среды из космоса [1, 2]. Неуклонный рост потребности к повышению качества данных, полученных радиометрическими методами, обуславливает все большие требования к техническим свойствам радиометров, таким как чувствительность, динамика измерений, абсолютная точность, надежность и массогабаритные параметры. Улучшение перечисленных характеристик свойственно процессу совершенствования широкого класса радиоизмерительной аппаратуры, однако в радиометрах, в силу специфики исследуемых радиотепловых сигналов и схемотехнического исполнения, повышение качества аппаратуры достигается лишь при совместном улучшении группы параметров.

Активно разрабатываются и применяются новые системные решения в создании перспективных средств радиометрической аппаратуры, позволяющие вывести основные технические характеристики радиометров на новый уровень [3, 4]. Несмотря на множество схемотехнических исполнений различных типов радиометров [5], дифференциальный метод измерений (его частный случай – нулевой метод) обуславливает наличие отдельных функциональных блоков, ограничивающих предельные технические характеристики радиометров. Примером функционального блока, ухудшающего потенциальные технические характеристики, является СВЧ-переключатель, устанавливаемый на входе приемника. Ослабление сигнала на входе радиометра приводит к увеличению шумовой температуры приемника, что сказывается на ухудшении флуктуационной чувствительности. Последние модели выпускаемых промышленностью СВЧ-переключателей для S -диапазона обладают уровнем собственных потерь 1...2,5 дБ. Реализация широкополосных СВЧ-переключателей на более высоких частотах (30...300 ГГц) с приемлемым уровнем ослабления затруднительна [6].

В работе приводится способ повышения чувствительности в модифицированных нулевых радиометрах с комбинированной импульсной модуляцией за счет реализации метода нулевых измерений без использования СВЧ-переключателя.

При создании радиометров бортового базирования на основе классических схемотехнических исполнений [7, 8] разработчикам приходится решать многокритериальную противоречивую задачу создания прибора, обладающего приемлемой долговременной стабильностью или высокой чувствительностью, динамикой, надежностью, низкими массогабаритными параметрами.

Например, в составе спутника «Метеор-3» использован компенсационный радиометр с долговременной стабильностью 25 с [9]. Реализованная в данном техническом решении долговременная стабильность не позволяет проводить непрерывные измерения с длительностью более 25 с, что сказывается на эффективности использования спутниковой аппаратуры. Процесс калибровки обуславливает наличие дополнительных технических средств в модуле полезной нагрузки спутника, что негативно влияет на массогабаритные параметры и надежность.

По сравнению с классическими схемами эффективным решением данной проблемы является применение радиометра, описанного в [3, 10]. Данный тип радиометров уступает компенсационному радиометру по сложности исполнения входной СВЧ-части – измерение шумовой температуры

антенны модифицированными нулевыми радиометрами реализуется при помощи СВЧ-переключателей, направленных ответвителей, генераторов СВЧ-шума. Усложнение входной части компенсируется значительным улучшением чувствительности [11].

При реализации модифицированного метода приема [11] использование СВЧ-переключателя можно избежать в случае применения пространственно разнесенных опорных источников шумового сигнала. Для реализации этого подхода требуется изменение пространственной ориентации диаграммы направленности антенны, что осуществляется, например, её механической перестройкой, как это показано на рис. 1.

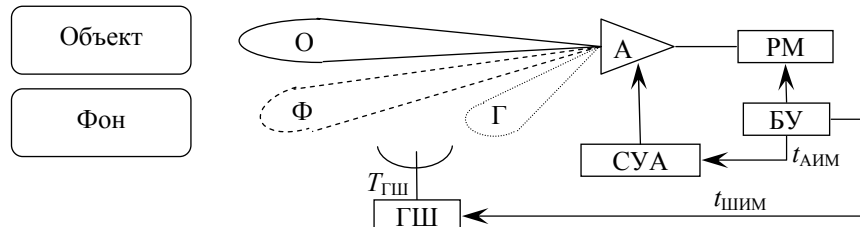


Рис. 1. Изменение пространственной ориентации приемной антенны

На рис. 1: антенна (А) с изменяемой диаграммой направленности (главный лепесток имеет положения «О» и «Ф», отмечен пунктиром, боковой лепесток с пространственным положением «Г» отмечен прерывистой линией), радиометр на основе модификации нулевого метода измерений (РМ), блок управления (БУ), система управления антенной (СУА), генератор шума (ГШ).

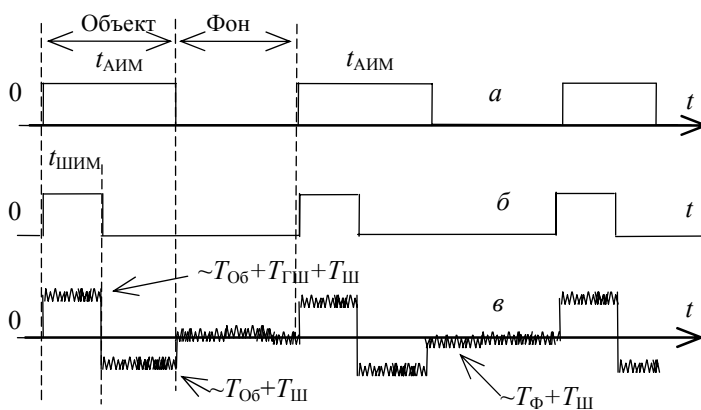


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы радиометра

Управление работой системы производится по сигналам амплитудной и широтно-импульсной модуляции (рис. 2).

На рис. 2 $T_{Ш}$ – шумовая температура приемника радиометра, $T_{Об}$ – шумовая температура объекта, $T_{Ш}$ – сигнал генератора шума, $T_{Ф}$ – шумовая температура фонового излучения. Во время сигнала $t_{АИМ}$ (рис. 2, диаграмма а) антенна направлена на объект (рис. 1 положение «О» главного лепестка диаграммы направленности антенны). На вход радиометра поступает сигнал $T_{Об}+T_{Ш}$. Во время сигнала

$t_{ШИМ}$ (рис. 2, диаграмма б) включается генератор шума и на вход радиометра поступает сигнал, пропорциональный $\sim T_{Об}+T_{ГШ}+T_{Ш}$. Во время отсутствия сигналов $t_{АИМ}$ и $t_{ШИМ}$ антенна направлена в область фонового излучения (см. рис. 1 положение «Ф» главного лепестка антенны), тогда на вход радиометра поступает сигнал, пропорциональный $\sim T_{Ф}+T_{Ш}$. Анализ временных диаграмм, представленных на рис. 2, показывает, что модификация нулевого метода измерений [11] реализуется без применения СВЧ-переключателя с представленным (см. рис. 2) способом модуляции при выполнении условия $T_{Ф}>T_{Об}$.

Эффективность использования данного способа реализации модификации нулевого метода измерений иллюстрируется понижением шумовой температуры приемника в отсутствие СВЧ-переключателя.

Состав приемной части радиометрической системы представлен на рис. 3.

Приемная часть состоит из антенны (А), фидера (Ф), маломощного усилителя (МШУ), усилителя высоких частот (УВЧ), полосового фильтра (ПФ), квадратичного детектора (КД), низкочастотного блока обработки сигналов (НЧБ).

Рассчитаем приведенную ко входу приемника эффективную температуру $T_{ш}$ собственных шумов. Согласно [12] шумы усилительной части приемника $T_{ш,пр}$ рассчитываются по формуле

$$T_{ш,пр} = T_{ш,МШУ} + \frac{T_{ш,УВЧ}}{G_{МШУ}}, \quad (1)$$

где $T_{ш,МШУ}$ и $T_{ш,УВЧ}$ – шумовые температуры усилителей МШУ и УВЧ приемника, определяемые как $(F_{ш} - 1)T$, где $F_{ш}$ – коэффициент шума усилителей; T – температура рабочей среды радиометра; $G_{МШУ}$ – коэффициент усиления малошумящего усилителя. Для усилителей (МШУ – СМА-62+ и УВЧ – GVA-63+) при температуре окружающей среды $T = 300$ К: $T_{ш,МШУ} = 56,6$ К, $T_{ш,УВЧ} = 298,5$ К, $G_{МШУ} = 14,1$. После подстановки этих значений в формулу (1) получим $T_{ш,пр} = 77,7$ К.

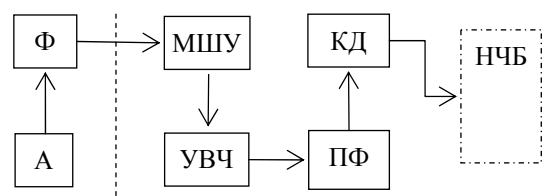


Рис. 3. Структура нулевого модифицированного радиометра

Во входном блоке радиометра при распространении сигнала через СВЧ-узлы, обладающие потерями, возникают новые шумы, которые пропорциональны величине потерь и определяются из следующей формулы (в случае, если узлы находятся при одной и той же температуре):

$$T_{ш,вх} = (1 - \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n) T_0, \tag{2}$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – коэффициенты передачи отдельных узлов входного тракта, T_0 – термодинамическая температура входного узла (расчетное значение 290 К). Если передача сигнала происходит без потерь, т.е. $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 1$, то, как следует из (2), входной тракт не вносит дополнительных шумов. В рассмотренном радиометре (см. рис. 3) основные потери возникают при передаче сигнала через СВЧ-переключатель – сигнал ослабляется на -2 дБ (на примере использования НМС253LC4 $\alpha_1 = 0,794$). Тогда, подставляя данные величины в (2), получим $T_{ш,вх} = 107,02$ К.

Таким образом, полная эффективная температура собственных шумов будет равна $T_{ш} = T_{ш,пр} + T_{ш,вх} = 184,722$ К. Максимальная флуктуационная чувствительность модифицированного нулевого радиометра с приведенным выше типом модуляции (конфигурации входной СВЧ-части) описывается формулой [13]:

$$\Delta T_{\max} = \frac{\sqrt{2(T_{оп,1} + T_{ш})^2 + \frac{T_{оп,2}^2}{4}}}{\sqrt{2\Delta f \tau R}}, \tag{3}$$

где τ – постоянная времени синхронного фильтра; R – количество усредненных цифровых кодов длительности $t_{шум}$ в цифровом устройстве НЧБ на интервале одного измерения; $T_{оп1}$ и $T_{оп2}$ – шумовые температуры опорных источников шума. Принимая условия: $\Delta f = 50$ МГц, $\tau = 1$ мкс, $R = 100$, $T_{оп1} = 300$ К, $T_{оп2} = 50$ К (что соответствует динамическому диапазону измерений 50...300 К) и подставляя в (3), получим $\Delta T_{\max} = 0,686$ К.

При реализации радиометра по описанному выше способу с применением антенны с перестраиваемой диаграммой направленности, позволяющему не устанавливать СВЧ-переключатель на входе радиометра, шумовая температура системы понижается и, учитывая (2), принимает значение $T_{ш} = T_{ш,пр} = 77,7$ К. Уменьшение шумовой температуры приемника повышает флуктуационную чувствительность, которая с учетом (2) и условия отсутствия СВЧ-переключателя по (3) принимает значение: $\Delta T_{\max 1} = 0,535$ К.

Заключение. Использование разработанной входной СВЧ-части позволяет повысить флуктуационную чувствительность радиометрических систем, использующих дифференциальный метод измерений. В рассмотренной радиометрической системе на расчетном примере флуктуационная чувствительность повышена на 22 %.

Несмотря на эффективность способа, существуют ограничения по его применимости. Так, например, подразумевается, что на вход антенны поступает постоянный сигнал фонового излучения и генератора шума (см. рис. 1), что накладывает дополнительные требования к диаграмме направленности антенны. Описанный способ механической перестройки диаграммы направленности антенны ограничивает частоту модуляции в радиометре, что отрицательно сказывается при наблюдении быстроменяющихся радиотепловых портретов. Физические ограничения, связанные с временами переходных процессов в радиоизмерительном тракте и частотой модуляции нулевых радиометров, описаны в [11]. Понижение влияния данных эффектов при увеличении динамики работы разработанной схемы видится в использовании цифровых сигнальных процессоров и фазированных антенных решеток для электронного управления диаграммой направленности антенны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №13-07-98009 р_сибирь_a.

Литература

1. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А. Портрет Земли из космоса. Глобальное радиотепловое поле // Природа. – 2006. – № 9. – С.20–35.
2. Гельцер А.А. Экспериментальная оценка ослабления радиоволн зимним лиственным лесом / А.А. Гельцер, Н.А. Кузнецова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2–2. – С. 26–28.
3. Filatov A.V. A microwave four-channel null *L*-band radiometer / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin, D.E. Paraev // Instruments and Experimental Techniques. – 2012. – V. 55. – № 1. – С. 59–64.
4. Алексеев П.В. Микроволновый сканирующий радиометр интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА) // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 5. – С. 68–77.
5. Camps A., Tarongi J.M. Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times // Remote Sensing. – 2010. – Vol. 2. – P. 1826–1843
6. Гошин Г.Г. О применении метода электродинамического подобия при моделировании широкополосных устройств СВЧ / Г.Г. Гошин, А.В. Фатеев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9–2. – С. 180–181.
7. Анализ СВЧ-радиометрических данных *L*-диапазона, полученных в эксперименте на РС МКС / А.Б. Аквилонова, М.Т. Смирнов, О.О. Кузнецов, А.А. Халдин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 2. – С. 252–262.
8. Космические радиометры *L*-диапазона / Н.А. Арманд, М.Т. Смирнов, Ю.Г. Тищенко и др. // Космонавтика и ракетостроение. – 2008. – № 2. – С. 39–43.
9. Микроволновый радиометр-спектрометр с предельными характеристиками для изучения Земли из космоса в диапазоне 6...220 ГГц / Ю.Б. Хапин, А.В. Кузьмин, А.Г. Семин, Е.А. Шарков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 4. – С. 64–75.
10. Filatov A.V. The dynamic properties of a digital radiometer system and its operating efficiency / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin. – Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 54, № 10. – P. 1–6.
11. Филатов А.В. Радиометрические системы нулевого метода измерений / А.В. Филатов. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 276 с.
12. Алмазов–Долженко К.И. Шумовые параметры шестиполосников / К.И. Алмазов–Долженко, С.В. Пантыкин // Радиотехника. – 2009 – № 6. – С. 32–34.
13. Филатов А.В. Двухканальный микроволновый радиометр повышенной точности / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, Н.О. Жуков // Радиотехника. – 2011. – № 1. – С. 47–55.

Убайчин Антон Викторович

Науч. сотрудник СКБ «Смена» ТУСУРа
Тел.: +7-952-883-67-67.
Эл. почта: dualog@mail.ru

Рогожников Евгений Викторович

Науч. сотрудник СКБ «Смена» ТУСУРа
Тел.: +7-952-883-67-67.
Эл. почта: dualog@mail.ru

Ubaichin A.V., Rogozhnikov E.V.

Using a tunable antenna diagram at the radiometers sensitivity enhancement

A new method of radiometer sensitivity enhancement is described. The effect is achieved by simplifying of radiometers input microwave part. Simplifying process is used only for differential type of radiometers. All scientific results are shown at particular case of differential type radiometers – null type radiometers. The calculated efficiency is shown for on-board null radiometer used in remote sensing.

Keywords: null radiometers, method of differential measurement, microwave radiometry, passive microwave devices.