

## Микроволновый радиометр на основе метода нулевых измерений для бортовых систем дистанционного зондирования природных сред

А. В. Убайчин

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия  
E-mail: ubaychin@tpu.ru*

В статье описан новый тип микроволновых радиометров на основе метода нулевых измерений, обладающих упрощённой конструкцией. Показана разработанная структурная схема предложенного нулевого радиометра. Приведён оригинальный способ использования собственных шумов малошумящего усилителя для формирования опорной точки передаточной характеристики. Описан алгоритм уравнивания энергии сигнала антенны внутренними опорными генераторами шума при реализации метода нулевых измерений. Приведена математическая модель, описывающая передаточную характеристику с учётом вклада потерь в элементах и узлах входной высокочастотной части. На основе такой математической модели показана инвариантность результатов измерений к изменениям собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приёмника. Исследовано влияние вклада потерь в элементах и нестабильности узлов входной высокочастотной части в ошибки измерений. Показано устранение влияния потерь входной высокочастотной части на результаты измерений при калибровке по двум эталонным источникам шумового сигнала. Приведены результаты численной оценки ошибок измерений в зависимости от величины потерь во входной высокочастотной части и точности её термостатирования. На рассмотренном примере реализации предложенного нулевого радиометра показано, что максимальная ошибка измерений, связанная с вкладом потерь во входной высокочастотной части и дрейфом собственных шумов опорного малошумящего усилителя, в два раза меньше точности термостатирования.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, нулевой метод измерений, микроволновая радиометрия, радиометрические методы, ошибки измерений, научное приборостроение

Одобрена к печати: 20.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-9-16

### Введение

Пассивные методы дистанционного зондирования успешно применяются для исследования параметров атмосферы (Саворский и др., 2018), толщины и структуры льдов (Бордонский и др., 2014), пассивного радиовидения (Soldatov et al., 2012), глобального спутникового мониторинга земной поверхности и ряда других актуальных научно-прикладных задач. Каждое из описанных выше направлений исследований обладает своей спецификой и накладывает дополнительные требования к применяемой инструментальной базе. В задачах полевых исследований природных сред это в первую очередь требования к обеспечению долговременной стабильности измерений и устойчивости к изменяющимся факторам внешней среды. В системах с автономным питанием (набирающее популярность направление исследований с борта малых беспилотных летательных аппаратов и спутников) это необходимость повышенной надёжности, пониженного энергопотребления и т.д. Все направления объединяет требование к заданной точности и, как следствие, достоверности результатов измерений.

Для решения задачи повышения достоверности пассивных дистанционных исследований за счёт улучшения стабильности радиометрических измерений на методическом уровне применяют метод нулевых измерений (Николаев, Перцов, 1964). По сравнению с компенсационным и дифференциальным методами использование нулевого метода позволяет устранить влияние дестабилизирующих факторов радиометрических измерений. К основным дестабилизирующим факторам относят дрейф собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приёмника.

Характерной особенностью нулевых радиометров является использование принципа уравнивания входного сигнала антенны энергией активного опорного генератора шума (Убайчин, 2012). Существующие бортовые микроволновые радиометрические системы на основе метода нулевых измерений (Абдирасул уулу и др., 2016, Camps, Tarongi, 2010) используют активный генератор шума на лавинно-пролётном диоде, работающий в режиме обратного пробоя. Реализация обратного пробоя требует сравнительно высокого напряжения питания активного опорного генератора шума, что приводит к усложнению системы электропитания, ухудшает массогабаритные параметры, повышает энергопотребление и т.д. Стабильность генерируемой мощности активных опорных генераторов шума определяет стабильность передаточной характеристики нулевого радиометра. Это накладывает дополнительные требования к точности поддержания температуры и напряжения питания опорных генераторов шума (Убайчин, 2012). Для управления мощностью активного генератора шума в антенном канале радиометра используют направленный ответвитель, СВЧ-переключатели, аттенюаторы и другие дополнительные элементы высокочастотного и низкочастотного радиоизмерительного тракта. Их использование усложняет конструкцию, увеличивает потери во входных высокочастотных элементах радиометра, требует применения температурной стабилизации, что в совокупности приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик и снижению эффективности исследований.

В связи с этим актуальна задача создания новых микроволновых радиометрических систем с пониженным энергопотреблением и массогабаритными параметрами, обладающих сравнительно упрощённой конструкцией, устойчивых к основным дестабилизирующим факторам радиометрических измерений и позволяющих реализовать заданную абсолютную точностью и флуктуационную чувствительность.

В представленной статье рассмотрен микроволновый радиометр, обладающий упрощённой конструкцией, пониженным энергопотреблением и обеспечивающий устойчивость к изменяющимся факторам внешней среды на уровне существующих микроволновых радиометров, реализованных на основе метода нулевых измерений.

### Структурная схема и принцип работы нулевого радиометра

На *рис. 1* представлена структурная схема предложенного микроволнового радиометра на основе метода нулевых измерений. Он состоит из антенны А с шумовой температурой  $T_A$ , СВЧ-переключателя ПК с конфигурацией «один полюс на три направления», радиометрического приёмника РП с собственными шумами  $T_{ш}$ , коэффициентом передачи  $G$  и шириной полосы пропускания  $\Delta f$ , включающего в себя малошумящий усилитель МШУ, полосовой фильтр ПФ, широкополосный усилитель ШПУ и квадратичный детектор КД, усилителя постоянного тока УПТ, аналого-цифрового преобразователя АЦП, управляющего микроконтроллера МК, термостатированной опорной согласованной нагрузки ОСН с шумовой температурой  $T_{СН}$ , опорного малошумящего усилителя ОМШУ и согласованной нагрузки СН.

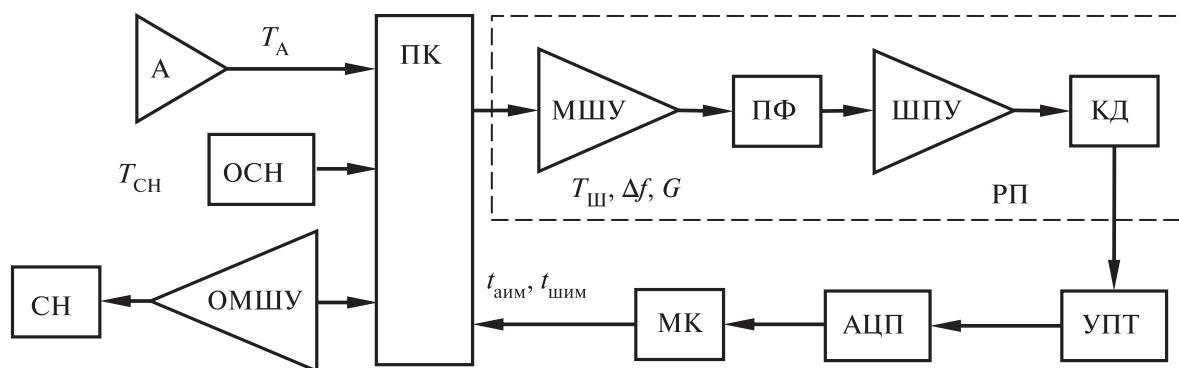
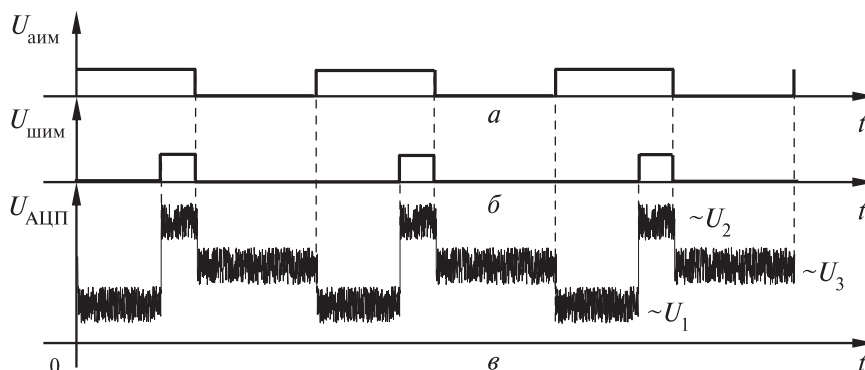


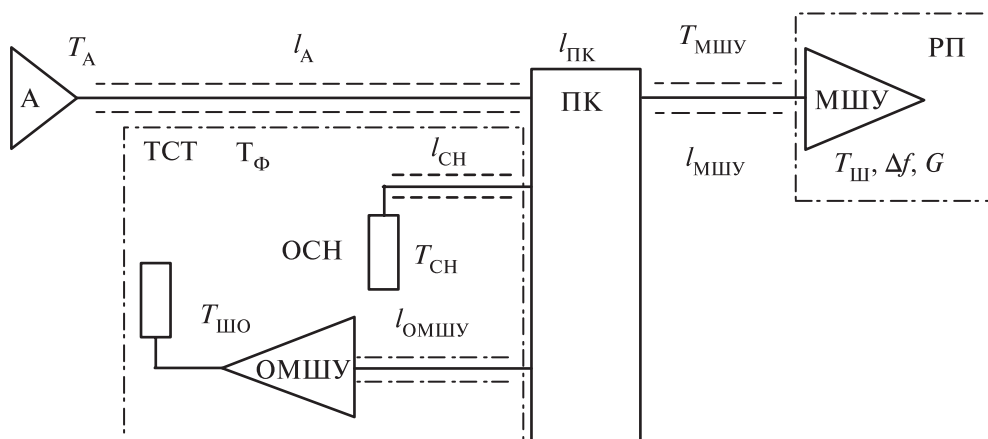
Рис. 1. Структурная схема предложенного нулевого радиометра

Принцип работы предложенного нулевого радиометра заключается в следующем. Под действием управляющих сигналов амплитудной ( $t_{\text{аим}}$ ) и широтно-импульсной ( $t_{\text{шим}}$ ) модуляций на вход радиометрического приёмника поочередно подключаются ОМШУ, ОСН и антенна. При этом на входе аналого-цифрового преобразователя формируется импульсно-модулированный сигнал. Эпюры управляющих сигналов  $t_{\text{аим}}$ ,  $t_{\text{шим}}$  и модулированного сигнала на входе аналого-цифрового преобразователя показаны на *рис. 2* (а, б и в соответственно).



*Рис. 2.* Эпюры управляющих сигналов  $t_{\text{аим}}$  (а),  $t_{\text{шим}}$  (б) и модулированного сигнала на входе АЦП (в)

При низком уровне сигнала  $t_{\text{аим}}$  на вход радиометрического приёмника подключается антенна, при низком уровне сигнала  $t_{\text{шим}}$  и высоком уровне сигнала  $t_{\text{аим}}$  — ОМШУ, при высоком уровне сигнала  $t_{\text{шим}}$  — ОСН. Для подробного описания модулированного сигнала на входе АЦП (см. *рис. 2в*) обратимся к детализированной структурной схеме входной высокочастотной части предложенного нулевого радиометра. На *рис. 3* показана такая схема с учётом потерь в линиях передачи. Здесь  $l_A$  — потери в линии передачи между антенной и СВЧ-переключателем;  $l_{\text{ПК}}$  — потери в СВЧ-переключателе;  $l_{\text{МШУ}}$  — потери в линии передачи между СВЧ-переключателем и входом малошумящего усилителя;  $l_{\text{СН}}$  — потери в линии передачи между согласованной нагрузкой и СВЧ-переключателем;  $l_{\text{ОМШУ}}$  — потери в линии передачи между входом ОМШУ и СВЧ-переключателем;  $T_{\text{ШО}}$  — собственные шумы ОМШУ;  $T_{\text{МШУ}}$  — физическая температура линии передачи между СВЧ-переключателем и МШУ. Согласованная нагрузка, ОМШУ и линии передачи, соединяющие их с СВЧ-переключателем, находятся в термостате ТСТ с температурой  $T_{\text{Ф}}$ . Для упрощения расчётов в дальнейшем влияние потерь, возникающих в антенно-фидерной части, считаем пренебрежимо малым.



*Рис. 3.* Детализированная схема входной высокочастотной части предложенного нулевого радиометра

Обозначим через  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$  уровни амплитуд положительного, отрицательного импульсов и среднего уровня модулированного сигнала (см. рис. 2в), соответствующих подключению на вход приёмника ОМШУ, согласованной нагрузки и антенны. С учётом детализированной схемы входной высокочастотной части (см. рис. 3) и алгоритма функционирования получим:

$$U_3 = \left\{ \left[ T_A(1-l_A) + T_\Phi l_A \right] \cdot (1-l_{ПК}) + T_{ПК} l_{ПК} \right\} \cdot (1-l_{МШУ}) + T_{МШУ} l_{МШУ} + T_{Ш} \Delta f \cdot kG, \quad (1)$$

$$U_2 = \left\{ \left[ T_{СН}(1-l_{СН}) + T_\Phi l_{СН} \right] \cdot (1-l_{ПК}) + T_{ПК} l_{ПК} \right\} \cdot (1-l_{МШУ}) + T_{МШУ} l_{МШУ} + T_{Ш} \Delta f \cdot kG. \quad (2)$$

В нулевых радиометрах передаточная характеристика строится по двум опорам (Убайчин, 2012). Роль опор выполняют активные и пассивные генераторы шума. В представленном радиометре первая опора обеспечивается пассивным генератором шума — согласованной нагрузкой.

Вторая опора реализуется за счёт использования уровня собственных шумов ОМШУ, который подключён своим входом к входу СВЧ-переключателя. Выход ОМШУ подключён на согласованную нагрузку. В этом случае ОМШУ работает в согласованном режиме с заданными шумовыми параметрами. Тепловой низкотемпературный шум  $T_{ШО}$ , формируемый шумовой волной с входа ОМШУ, пропорционален его собственным шумам. Таким образом, ОМШУ используется как генератор низкотемпературного шума (Frater, Williams, 1981).

С учётом сказанного выше и детализированной структурной схемы входной высокочастотной части предложенного нулевого радиометра (см. рис. 2) получим выражение для оценки уровня  $U_1$ :

$$U_1 = \left\{ \left[ T_{ШО}(1-l_{ОМШУ}) + T_\Phi l_{ОМШУ} \right] \cdot [1-l_{ПК}] + T_{ПК} l_{ПК} \right\} \cdot (1-l_{МШУ}) + T_{МШУ} l_{МШУ} + T_{Ш} \Delta f \cdot kG. \quad (3)$$

Согласно реализации метода нулевых измерений (Убайчин, Филатов, 2014), изменение длительности сигнала широтно-импульсной модуляции осуществляется до тех пор, пока не выполнится равенство вольт-секундных площадей положительного и отрицательного импульсов. При этом выполняется условие нулевого баланса:

$$(U_2 - U_3)t_{ШИМ} = (U_3 - U_1) \cdot (t_{АИМ} - t_{ШИМ}). \quad (4)$$

Упрощая выражение (4) после подстановки значений, полученных в уравнениях (1), (2), (3), и решая относительно  $T_A$  получим:

$$T_A = \frac{T_{СН} t_{ШИМ}}{t_{АИМ}} + \left\langle 1 - \frac{t_{ШИМ}}{t_{АИМ}} \right\rangle \cdot \langle l_{ОШ} T_\Phi + T_{ШО}(1-l_{ОШ}) \rangle. \quad (5)$$

Выражение (5) связывает длительность сигнала широтно-импульсной модуляции и шумовую температуру антенны с учётом потерь в элементах входной высокочастотной части предложенного нулевого радиометра. Важным следствием выражения (5) является отсутствие в нём собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приёмника. Это указывает на инвариантность результатов измерений к изменениям собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приёмника, что свойственно нулевым радиометрам в целом (Убайчин, Филатов, 2014).

Вследствие того, что нулевой метод приёма инвариантен к общим составляющим в выражениях (2), (3) и (4), в выражение (5) не входят компоненты, вызванные ослаблением СВЧ-переключателя, если величина ослабления для каждого из входных сигналов одинакова. Уравнение (5) не содержит потери, обусловленные линией передачи между согласованной нагрузкой и СВЧ-переключателем, ввиду того что они находятся в термодинамическом равновесии друг с другом за счёт равной физической температуры, обеспечиваемой устройством термостатирования. Компоненты  $l_{МШУ}$ ,  $T_{ПК}$  и  $T_{МШУ}$  не входят в выражение (5), поскольку

вносят одинаковый вклад для каждого из сигналов уравнений (1), (2), (3) и, согласно представленной реализации, устраняются при вычитании в равенстве (4).

Второе слагаемое в выражении (5) является величиной, характеризующей вклад потерь в линии передачи между ОМШУ и СВЧ-переключателем в передаточную характеристику предложенного нулевого радиометра. Применение классической калибровки позволяет устранить влияние вклада, обусловленного  $l_{\text{ОМШУ}}$ , путём установления соответствия длительности  $t_{\text{шим}}$  «горячему» и «холодному» эталонам. После проведения калибровки шумовая температура антенны определяется по формуле:

$$T_A = t_{\text{шим изм}} \frac{T_{\text{эт.верхн}} - T_{\text{эт.нижн}}}{t_{\text{шим верхн}} - t_{\text{шим нижн}}},$$

где  $T_{\text{эт.верхн}}$ ,  $T_{\text{эт.нижн}}$  — шумовая температура «горячего» и «холодного» эталонов, определяющая соответственно верхнюю и нижнюю границу динамического диапазона измеряемых шумовых температур;  $t_{\text{шим верхн}}$ ,  $t_{\text{шим нижн}}$  — значения длительности сигнала широтно-импульсной модуляции при подключении на вход «горячего» и «холодного» эталонов.

В предложенном нулевом радиометре стабильность результатов измерений определяется точностью поддержания температуры термостата. При изменении температуры термостата происходит изменение передаточной характеристики, приводящее к ошибкам в измерениях, проводимых после калибровки. Ошибки вызваны перемещением опорных точек передаточной характеристики (шумовой температуры согласованной нагрузки), изменением вклада потерь и дрейфом шумов ОМШУ при установлении нулевого баланса. Потери в линиях передачи остаются постоянными при изменении температуры в пределах погрешности поддержания  $T_{\Phi}$  и выполняют роль весовых коэффициентов вклада изменений  $T_{\Phi}$  и  $T_{\text{ШО}}$  в результаты измерений.

Для оценки ошибки измерений в процессе работы предлагаемого нулевого радиометра проведено математическое моделирование с учётом заданной погрешности поддержания температуры термостата. В качестве ОМШУ выбран усилитель TAMP-1521GLN+. Расчётная центральная частота составляет 1,421 ГГц. При моделировании уровень  $T_{\text{ОШ}}$  принят равным собственным шумам TAMP-1521GLN+. В соответствии с технической документацией дрейф собственных шумов выбранного ОМШУ составляет 0,23 К при изменении его физической температуры на один градус. Результаты моделирования оценки ошибки измерений, вызванной  $l_{\text{ОМШУ}}$  и  $T_{\text{ОШ}}$ , в зависимости от точности поддержания температуры термостата представлены в *таблице*.

Модуль максимальной ошибки измерений, вызванной потерями во входной высокочастотной части и дрейфом уровня шумов опорного маломощного усилителя, при различных уровнях точности термостатирования

$l_{\text{ОМШУ}}$	Точность термостатирования, К							
	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 1,5$	$\pm 2$	$\pm 2,5$	$\pm 3$
0,010	0,003	0,025	0,124	0,248	0,371	0,495	0,619	0,743
0,025	0,003	0,026	0,130	0,259	0,389	0,518	0,648	0,778
0,050	0,003	0,028	0,139	0,278	0,417	0,556	0,695	0,834
0,100	0,003	0,032	0,158	0,316	0,474	0,632	0,79	0,948
0,200	0,004	0,039	0,196	0,392	0,588	0,784	0,98	1,176
0,300	0,005	0,047	0,234	0,468	0,702	0,936	1,17	1,404

Анализ результатов моделирования, приведённый в *таблице*, показал, что при использовании TAMP-1521GLN+ в качестве ОМШУ и с потерями в линии передачи между ним и СВЧ-переключателем не более 0,3 модуль максимальной ошибки измерений, вызванной дрейфом шумов ОМШУ и  $l_{\text{ОМШУ}}$ , в два раза меньше точности термостатирования.

## Заключение

Разработана структурная схема нулевого радиометра, в котором в качестве опорного источника низкотемпературного шума используется малошумящий усилитель, что обеспечивается подключением входа усилителя к входу радиометрического приёмника посредством СВЧ-переключателя. Применение шумов малошумящего усилителя в качестве опоры передаточной характеристики позволяет реализовать метод нулевых измерений без использования активных генераторов шума на лавинно-пролётных диодах. Этот факт обуславливает упрощение конструкции в предложенном нулевом радиометре.

Разработанная схема основывается на методе нулевых измерений, реализованном синхронным выполнением двух видов импульсной модуляции (Убайчин, Филатов, 2014). Использование этой реализации позволяет линейным образом связывать длительность сигнала широтно-импульсной модуляции с измеряемым сигналом антенны. При этом результаты измерений не зависят от изменений коэффициента передачи приёмника и дрейфа его собственных шумов.

Ошибка измерений в разработанном нулевом радиометре определяется точностью поддержания температуры элементов входной высокочастотной части и состоит из двух компонент. Первая компонента обусловлена изменением шумовой температуры согласованной нагрузки и принимает максимальное значение при увеличении длительности сигнала  $t_{\text{шим}}$  до  $t_{\text{аим}}$ . Максимальное значение первой компоненты ошибки равно точности поддержания температуры термостата. Вторая компонента обусловлена вкладом дрейфа шумов ОМШУ и потерь в линии передачи между ним и СВЧ-переключателем. Максимальное значение она принимает при уменьшении сигнала  $t_{\text{шим}}$  до нуля и, как следует из рассмотренного в *таблице* примера, не превышает половины значения первой компоненты при точности термостатирования не хуже  $\pm 3$  К и потерях в линии передачи между ОМШУ и СВЧ-переключателем до уровня 0,3 (1,5 дБ). Таким образом, значение ошибки измерений достигает максимума, равного точности термостатирования, у верхней границы динамического диапазона, а минимума — у его нижней границы и при соблюдении описанных выше условий не превышает половины значения точности термостатирования.

Предложенный нулевой радиометр найдёт широкое применение в бортовых исследовательских системах дистанционного зондирования, требующих обеспечения заданных массогабаритных параметров и низкого энергопотребления. Представленные результаты исследований послужат основой для последующего решения задачи оценки флуктуационной чувствительности и поиска способа устранения влияния потерь антенно-фидерного тракта на результаты измерений в предложенном нулевом радиометре.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-00045).

## Литература

1. Абдирасул уулу Т., Алексеев Е. В., Данилов Д. Н., Жук Г. Г., Таиходжаев А. С., Убайчин А. В., Филатов А. В. Бортовая микроволновая радиометрическая система с высокой динамикой измерения // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 4. С. 62–65.
2. Бордонский Г. С., Гурулев А. А., Орлов А. О., Цыренжапов С. В. Различие картин радарных и радиометрических измерений (на примере ледяного покрова эвтрофированного озера) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 228–240.
3. Николаев А. Г., Перцов А. Г. Радиотеплокация. М.: Сов. радио, 1964. 326 с.
4. Саворский В. П., Аквилонова А. Б., Ермаков Д. Е., Кибардина И. Н., Панова О. Ю., Смирнов М. Т., Турыгин С. Ю., Чернушич А. П. Моделирование спутниковой СВЧ-радиометрической информации, используемой для восстановления трёхмерных полей атмосферных параметров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 23–250.
5. Убайчин А. В. Линейность передаточной характеристики нулевых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией при высоком динамическом диапазоне измеряемых шумовых температур // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 9–3. С. 130–133.

6. Убайчин А. В., Филатов А. В. Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений. Томск: Изд-во ТУСУР, 2014. 154 с.
7. Camps A., Tarongi J. M. Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times // *Remote Sensing*. 2010. V. 2. P. 1826–1843.
8. Frater R. H., Williams D. R. An Active “Cold” Noise Source // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 1981. V. 29. Iss. 4. P. 344–347.
9. Soldatov D. P., Gladun V. V., Pirogov Yu. A., Pavlov P. A., Petukhov V. B., Tischenko D. A., Markelov V. V. Passive millimeter wave imaging system with tilt scanning // *Bulletin RAS: Physics*. 2012. V. 76. No. 12. P. 1371–1373.

## Microwave radiometer based on zero measurement method for onboard remote sensing of natural mediums

A. V. Ubaychin

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk 634050, Russia*  
*E-mail: dualog@mail.ru*

The article presents a new type of microwave radiometers based on zero measurements method with a simplified design. The developed block diagram of the proposed zero radiometer is shown. An original method for using the intrinsic noise of a low-noise amplifier to form the reference point of the transfer characteristic is given. An algorithm for equalizing the signal energy of the antenna with internal reference noise generators when implementing the zero-measurement method is described. A mathematical model describing the transfer characteristic, taking into account the contribution of insertion loss in the elements and modules of the microwave front end is given. Based on the above mathematical model, the invariance of the measurement results to changes in the intrinsic noise and the transmission coefficient of the radiometric receiver is shown. The influence of the contribution of insertion loss in the elements and the instability of the modules of the microwave front end to the measurement errors is investigated. The elimination of the effect of the insertion loss of the microwave front end on the measurement results during calibration using two standard noise signal sources is shown. The results of a numerical evaluation of measurement errors depending on the magnitude of insertion loss in the microwave front-end and the accuracy of its temperature control are presented. In the considered example of the implementation of the proposed zero radiometer, it is shown that the maximum measurement error associated with the contribution of insertion loss in the microwave front end and the drift of the self-noise of the reference low-noise amplifier is half the temperature accuracy.

**Keywords:** remote sensing, zero measurement method, microwave radiometry, radiometric methods, measurement errors, scientific instrumentation

Accepted: 20.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-9-16

### References

1. Abdirasul uulu T., Alekseev E. V., Danilov D. N., Zhuk G. G., Tashkhodzhaev A. S., Ubaichin A. V., Filatov A. V., Bortovaya mikrovolnovaya radiometricheskaya sistema s vysokoi dinamikoi izmereniya (On-board microwave radiometric system with high measurement dynamics), *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2016, No. 4, pp. 62–65.
2. Bordonskii G. S., Gurulev A. A., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V., Razlichie kartin radarnykh i radiometricheskikh izmerenii (na primere ledyanogo pokrova evtrofirovannogo ozera) (The difference between the pictures of radar and radiometric measurements (an example of ice cover of the eutrophic lake)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 228–240.
3. Nikolaev A. G., Pertsov A. G., *Radioteplotlokatsiya* (Radiometry), Moscow: Sovetskoe radio, 1964, 326 p.

4. Savorskii V. P., Akvilonova A. B., Ermakov D. E., Kibardina I. N., Panova O. Yu., Smirnov M. T., Turygin S. Yu., Chernushich A. P., Modelirovanie sputnikovoi SVCh-radiometricheskoi informatsii, ispol'zue-moi dlya vosstanovleniya trekhmernykh polei atmosferykh parametrov (Simulation of satellite microwave radiometric information used to restore three-dimensional fields of atmospheric parameters), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 235–250.
5. Ubaichin A. V., Lineinost' peredatochnoi kharakteristiki nulevykh radiometrov s kombinirovannoi impul'snoi modulyatsiei pri vysokom dinamicheskom diapazone izmeryaemykh shumovykh temperatur (Linearity of the transfer characteristic of zero radiometers with combined pulse modulation at a high dynamic range of measured noise temperatures), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2012, Vol. 55, No. 9–3, pp. 130–133.
6. Ubaichin A. V., Filatov A. V., *Mnogopriemnikovye mikrovolnovye radiometricheskie sistemy na osnove modifi-tsirovannogo metoda nulevykh izmerenii* (Multi-receiver microwave radiometric systems based on a modified zero measurement method), Tomsk: Izd. TUSUR, 2014, 154 p.
7. Camps A., Tarongi J. M., Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2, pp. 1826–1843.
8. Frater R. H., Williams D. R., An Active “Cold” Noise Source, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techni-ques*, 1981, Vol. 29, Issue 4, pp. 344–347.
9. Soldatov D. P., Gladun V. V., Pirogov Yu. A., Pavlov P. A., Petukhov V. B., Tischenko D. A., Markelov V. V., Passive millimeter wave imaging system with tilt scanning, *Bulletin RAS: Physics*, 2012, Vol. 76, No. 12, pp. 1371–1373.