

УДК 504.064.37

НУЛЕВОЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТР С УПРОЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ВХОДНОГО СВЧ-БЛОКА И С ПОВЫШЕННОЙ ФЛУКТУАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

Г. Г. Жук, аспирант кафедры Радиоэлектроники и систем связи (РСС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), Томск, Россия;
orcid.org/0000-0002-5661-1754, e-mail: g.g.zhuk@mail.ru

Приведены результаты разработки нулевого радиометра с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока путем исключения высокотемпературного опорного генератора шума. Целью работы является создание микроволнового нулевого радиометра с упрощенной конструкцией входной СВЧ-части приемника для уменьшения массы, габаритов и энергопотребления измерительного устройства без ухудшения его основных технических характеристик. Показано, что использование МШУ в качестве низкотемпературного генератора шума позволяет реализовать нулевой метод без использования высокотемпературных генераторов шума. Теоретическая оценка показала, что флуктуационная чувствительность нулевого микроволнового радиометра с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока в 1,4 раза выше, чем у исходного схемотехнического решения. При этом упрощение конструкции микроволнового нулевого радиометра ведет к уменьшению массогабаритных параметров и энергопотребления, что делает его перспективными для применения в малогабаритных беспилотных летательных аппаратах для дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: нулевой микроволновый радиометр, повышение флуктуационной чувствительности, высокотемпературный генератор шума, низкотемпературный генератор шума, транзисторный источник шума.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-90-32-40

Введение

В последние несколько десятилетий ученые по всему миру пытаются решить задачи по сохранению и мониторингу экологических систем Земли. Для этого в первую очередь необходимо производить постоянный ее мониторинг. Однако существуют определенные сложности мониторинга поверхности Земли из-за труднопроходимых или вовсе не проходимых мест, в связи с чем приходится применять средства дистанционного зондирования, базирующиеся на спутниках, самолетах или беспилотных летательных аппаратах. Применение радиометров в качестве бортовых инструментов для дистанционного зондирования обеспечивает эффективное получение информации о состоянии окружающей среды и позволяет проводить исследования подстилающей поверхности Земли.

Применение микроволновых радиометров в составе функциональных малогабаритных беспилотных летательных аппаратах (МБПЛА) становится все более актуальной задачей, так как это способствует увеличению разрешающей способности, а также значительно сокращает интервалы между измерениями. МБПЛА отличаются высокой мобильностью и маневренностью, что дает им ряд преимуществ по сравнению с самолетами и спутниками. При этом особенности конструкции и системы электропитания МБПЛА предъявляют особые требования к энергопотреблению и массогабаритным параметрам переносимых измерительных приборов. Ввиду этого возникает необходимость создания радиометра со сниженными массогабаритными параметрами без ухудшения надежности и долговременной стабильности его работы.

Выбор оптимального типа радиометра для применения в МБПЛА

В результате непрерывного развития средств микроволновой радиометрии появилось множество различных методов их построения, среди которых наибольшее применение получили компенсационный, модуляционный и нулевой методы измерений.

Для эффективного функционирования микроволновых радиометров приходится применять большое количество дополнительных систем стабилизации параметров приемника (системы температурной стабилизации, автоматической регулировки усиления, дополнительные каналы подшумливания и т.д.). Все это приводит к проблеме, связанной с большими массогабаритными показателями и высоким энергопотреблением существующих схемотехнических решений. Высокая потребность в применении дополнительных систем в первую очередь связана со стремлением повысить точность измерений, надежность, долговременную и температурную стабильность. Выбор наиболее подходящего типа радиометра, который будет использоваться как бортовое измерительное устройство в составе МБПЛА, необходимо начать с рассмотрения возможности упрощения его конструкции при одновременном сохранении или улучшении метрологических характеристик.

Компенсационные радиометры

Микроволновые компенсационные радиометры являются самыми распространенными и в теории обладают самым высоким уровнем флуктуационной чувствительности. Но из-за высокой зависимости результатов измерений от изменений коэффициента передачи и уровня собственных шумов не представляется возможным достичь теоретического уровня флуктуационной чувствительности [1, 2].

В различных научных источниках по разработке микроволновых радиометров сказано, что одним из главных параметров, определяющих их ценность на мировом рынке, является флуктуационная чувствительность. Она определяет минимальное приращение антенной температуры, при котором среднее значение выходного сигнала радиометра равно действующему значению его флуктуаций. Для расчета коэффициента флуктуаций классического компенсационного микроволнового радиометра используется формула [2]:

$$\Delta T = (T_{ш} + T_a) \sqrt{\frac{1}{\Delta f \tau} + \left(\frac{\Delta G}{G} \right)^2}, \quad (1)$$

где Δf – полоса пропускания после квадратичного детектора в низкочастотной части измерительного тракта; T_a – полная шумовая температура антенны; ΔG – значение изменения коэффициента передачи высокочастотной части; G – коэффициент усиления высокочастотной части приемника; τ – постоянная времени интегратора; $T_{ш}$ – шумовая температура приемника.

Микроволновые компенсационные радиометры имеют общие недостатки, которые не дают возможности применения их в составе МБПЛА для дистанционного зондирования. Одним из таких недостатков является изменение собственных шумов ($T_{ш}$) и коэффициента передачи измерительного тракта, что приводит к ухудшению точности результатов измерений в постоянно изменяющихся условиях окружающей среды. Снижения влияния этих двух ухудшающих факторов добиваются путем применения сложных систем температурной стабилизации. Помимо этого, для достижения необходимой точности применяют различные модификации компенсационных микроволновых радиометров, такие как внедрение дополнительных приемных каналов и систем подшумливания. Все это приводит к значительному увеличению потребления энергии, размеров и массы устройства.

Модуляционные радиометры

Главным достоинством модуляционного метода является то, что в нем удастся устранить влияние дестабилизации уровня собственных шумов радиометрического приемника на точ-

ность результатов измерений за счет постоянного сравнения сигналов антенны и опорного генератора шума [3].

Основная идея модуляционного (дифференциального) метода построения микроволновых радиометров заключается в применении на входе радиометрического приемника СВЧ-модулятора (переключателя) и дополнительного генератора шума для поочередного подключения антенны и опорного генератора шума [3, 4].

Формула для расчета параметра флуктуационной чувствительности модуляционного микроволнового радиометра имеет вид [3]:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{2((T_{ш} + T_a)^2 + (T_{ш} + T_{гш})^2)}{\Delta f_{\tau}}} + (T_a - T_{гш})^2 \left(\frac{\Delta G}{G} \right), \quad (2)$$

где $T_{гш}$ – шумовая температура опорного генератора шума.

Применение СВЧ-модулятора (переключателя) в модуляционных радиометрах приводит к снижению динамики измерений в два раза по сравнению с компенсационным радиометром.

На практике модуляционные радиометры получили широкое применение для решения многих задач в области экологического мониторинга, и уровень флуктуационной чувствительности полностью достигается в реальных условиях. Но стоит отметить, что способы повышения стабильности работы модуляционных радиометров и обеспечения заданной чувствительности (применение систем термостабилизации) приводят к усложнению конструкции, увеличению массогабаритных показателей, энергопотребления и повышению стоимости устройства. Все это накладывает ограничение на применение модуляционных радиометров в составе МБПЛА для дистанционного зондирования Земли.

Нулевые радиометры

Принцип нулевого метода измерений заключается в соблюдении условия, при котором разница между шумовыми сигналами, исходящими от опорного генератора шума и антенны, равна нулю $T_{гш} - T_a = 0$. В радиометрах, использующих нулевой метод измерений, так же, как и в модуляционных микроволновых радиометрах, выполняется поочередное подключение генераторов шума и антенны. Разница между нулевыми и модуляционными радиометрами в том, что в нулевых радиометрах различными способами (регулировкой $T_{гш}$, регулировкой усиления и т.д.) на выходе квадратичного детектора блока радиометрического приемника (РП) происходит выравнивание сигналов в равные по длительности интервалы амплитудно-импульсной модуляции АИМ. Признаком установления нулевого баланса является напряжение, равное нулевому значению на выходе микроволнового радиометра в оба полу периода АИМ [5].

Среди множества схем построения нулевых микроволновых радиометров выделяется схема нулевого радиометра с изменением длительности опорного сигнала. Она состоит (рисунок 1) из: блока автоматической температурной стабилизации, антенны (А), направленного ответвителя (НО), двух генераторов шума (ОГШ₁ и ОГШ₂), одного переключателя СВЧ-сигналов (ПК), усилителя высоких частот (УВЧ), квадратичного детектора (КД), усилителя низких частот (УНЧ), синхронного фильтра (СФ), фильтра высоких частот (ФВЧ), компаратора (К) и устройства управления (УУ).

В нулевых радиометрах с комбинированной импульсной модуляцией измерение сигналов антенны производится косвенно через измерение длительности управляющего сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Алгоритм работы нулевого радиометра, происходит согласно временным диаграммам, представленным на рисунке 2, где СВЧ-переключатель ПК2 под воздействием tАИМ выполняет поочередное подключение сигналов и на вход УВЧ. В полупериоды времени tАИМ, когда на вход приемника подключена антенна, под действием управляющих tШИМ через ПК1 и НО происходит добавление в тракт антенны. В результате чего на входе ПК2 в промежутке времени образуется сумма сигналов. Путем регулировки длительности tШИМ добиваются

такой формы сигнала в БНО, при которой после исключенной в нём постоянной составляющей с помощью ФВЧ среднее значение во втором полупериоде АИМ равно нулю. Индикатором нулевого баланса является нулевое напряжение во втором полупериоде АИМ при подключении ко входу приемника ОГШ1. После чего компаратор К определяет полярность этого напряжения и отправляет значение логического нуля или единицы на вход устройства управления, где происходит дальнейшая обработка полученных данных [6].

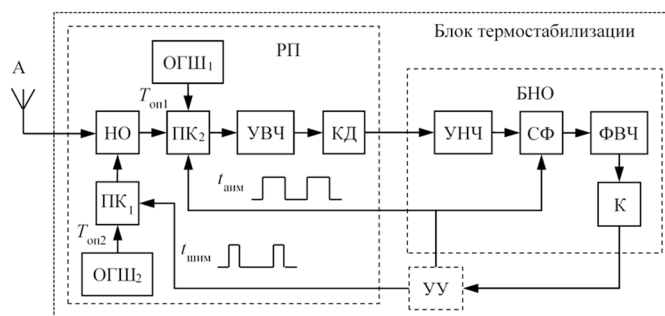


Рисунок 1 – Структурная схема микроволнового нулевого радиометра с изменением длительности опорного сигнала

Figure 1 – Block diagram of microwave zero radiometer with change in the duration of reference signal

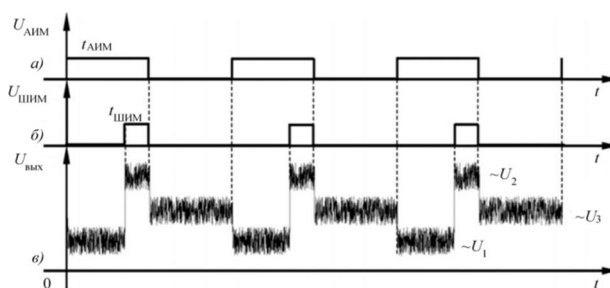


Рисунок 2 – Временная диаграмма выходных сигналов нулевого микроволнового радиометра с изменением длительности опорного сигнала, поясняющая принцип его работы

Figure 2 – Timing diagram of output signals of zero microwave radiometer with change in the duration of reference signal, explaining the principle of its operation

На рисунке 2 уровни U_1 , U_2 и U_3 соответственно равны

$$\begin{aligned} U_1 &= G\beta k K_u \Delta f (T_{ш} + T_a); \\ U_2 &= G\beta k K_u \Delta f (T_{ш} + T_a + T_{оп2}); \\ U_3 &= G\beta k K_u \Delta f (T_{ш} + T_{оп1}), \end{aligned} \quad (3)$$

где K_u – коэффициент усиления УПТ; $T_{ш}$ – шумы УВЧ.

Флуктуационная чувствительность нулевого микроволнового радиометра с изменением длительности опорного сигнала определяется по формуле:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{2(T_{оп1} + T_{ш})^2 + \frac{T_{оп2}^2}{4}}{\sqrt{2\Delta f \tau R}}}, \quad (4)$$

где R – число усредненных цифровых значений длительности ШИМ сигнала.

Комбинация широтно-импульсной и амплитудно-импульсной модуляций в нулевых микроволновых радиометрах дает возможность повысить их метрологические характеристики, уменьшить влияние основных дестабилизирующих факторов, действующих на точность результатов измерений (флуктуации собственных шумов и коэффициента усиления) и выразить шумовую температуру антенны косвенно через длительность ШИМ сигнала [6].

Для расчета зависимости флуктуационной чувствительности от температуры микроволновых радиометров, построенных на компенсационном, модуляционном и нулевом методах измерений, были введены следующие параметры: $T_{ш} = 150\text{ K}$, $T_{оп} = 350\text{ K}$ (для модуляционного радиометра), $T_{оп1} = 300\text{ K}$ и $T_{оп2} = 600\text{ K}$, $R = 5$ (для нулевого радиометра), $\Delta f = 100\text{ МГц}$, T_A изменяется в диапазоне $1 \dots 350\text{ K}$; $\tau = 1\text{ с}$; $\Delta G = 0,4\text{ дБ}$, $G = 80\text{ дБ}$.

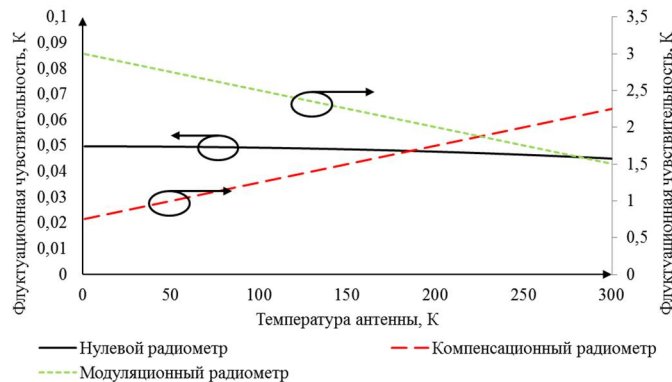


Рисунок 3 – График зависимости флуктуационной чувствительности от температуры антенны
Figure 3 – Graph of fluctuation sensitivity dependence on antenna temperature

Из графика, представленного на рисунке 3 видно, что наилучшим параметром флуктуационной чувствительности обладает нулевой радиометр. С учетом этого наиболее подходящей схемой для реализации микроволновой радиометрической системы бортового базирования является схема нулевого радиометра с изменением длительности опорного сигнала. Но сложность технической реализации и повышенные массогабаритные показатели приводят к необходимости создания нового нулевого микроволнового радиометра с пониженным потреблением энергии и более простой конструктивной реализацией без ухудшения их метрологических характеристик.

Микроволновый нулевой радиометр с низкотемпературным опорным генератором шума

Для упрощения конструкции нулевого микроволнового радиометра было предложено модернизировать схему, представленную на рисунке 1, а именно исключить СВЧ-переключатель, выполняющий коммутацию высокотемпературного генератора шума в такт антенны через направленный ответвитель, и сделать замену высокотемпературного генератора шума (на основе ЛПД, работающих в режиме обратного пробоя, либо на основе диодов Ганна) на генератор низкотемпературного шума, который будет реализован на основе МШУ, подключенного входом ко входу [5, 6].

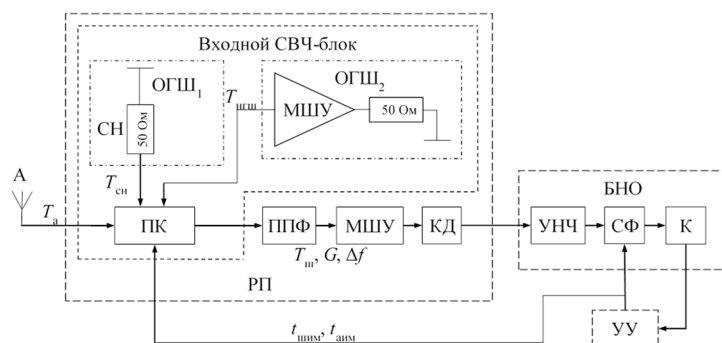


Рисунок 4 – Структурная схема микроволнового нулевого радиометра с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока
Figure 4 – Block diagram of microwave zero radiometer with simplified design of input microwave block

Предложенная схема построения нулевого микроволнового радиометра включает в себя антенну (А), радиометрический приемник (РП), блок низкочастотной обработки сигналов (БНО) и устройство управления (УУ).

Радиометрический приемник включает в себя СВЧ-модулятор (переключатель) (ПК), два генератора шума (ОГШ₁ и ОГШ₂), полосно-пропускающий фильтр (ППФ), малошумящий усилитель (МШУ) и квадратичный детектор (КД). Блок низкочастотной обработки сигналов (БНО) состоит из усилителя низких частот (УНЧ), синхронного фильтра (СФ) и компаратора (К). УУ реализовано на базе микроконтроллера, выполняющего функции управления системой и регистрации выходных сигналов компаратора.

Передаточная характеристика нулевых радиометров определяется двумя реперными точками посредством применения высокотемпературных и низкотемпературных ГШ. В разработанном нулевом радиометре также используются два эталонных генератора шума, где ОГШ₁ является пассивным элементом и выполнен с применением согласованной нагрузки (СН применяется в качестве высокотемпературного эталонного генератора шума).

ОГШ₂ реализован на основе МШУ, подключенного входом ко входу ПК, при этом выход МШУ нагружен СН. Только в этом случае МШУ работает в согласованном режиме с заданными параметрами шума. Тепловой шум ОГШ₂ пропорционален собственным шумам МШУ (МШУ применяется в качестве низкотемпературного эталонного генератора шума).

Алгоритм работы микроволнового радиометра с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока следующий. В начальный момент времени управляющие сигналы $t_{\text{АИМ}}$, $t_{\text{ШИМ}}$ находятся в высоком и низком состоянии соответственно. Низкое состояние сигналов $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$ приводит к коммутации в СВЧ-переключателе антенны ко входу МШУ ($U_{\text{ВЫХ}} = U_3$). Низкое состояние сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ и высокое состояние сигнала $t_{\text{АИМ}}$ вызывают подключение НГШ ко входу МШУ ($U_{\text{ВЫХ}} = U_1$). Высокий уровень сигналов $t_{\text{НГШ}}$ и $t_{\text{АИМ}}$ устанавливает подключение СН ко входу МШУ ($U_{\text{ВЫХ}} = U_2$).

На рисунке 5 уровни U_1 , U_2 и U_3 показывают результирующие сигналы на входе СФ в результате поочередного подключения ОГШ₁, ОГШ₂ и антенны ко входу малошумящего усилителя. С учетом алгоритма работы получаем выражения для U_1 , U_2 и U_3 :

$$U_1 = (T_{\text{НГШ}} + T_{\text{ш}}) \cdot \Delta f k G, \quad (5)$$

$$U_2 = (T_{\text{СН}} + T_{\text{ш}}) \cdot \Delta f k G, \quad (6)$$

$$U_3 = (T_a + T_{\text{ш}}) \cdot \Delta f k G. \quad (7)$$

где $T_{\text{НГШ}}$ – шумовая температура ОГШ₂; $T_{\text{СН}}$ – шумовая температура ОГШ₁; T_a – шумовая температура антенны.

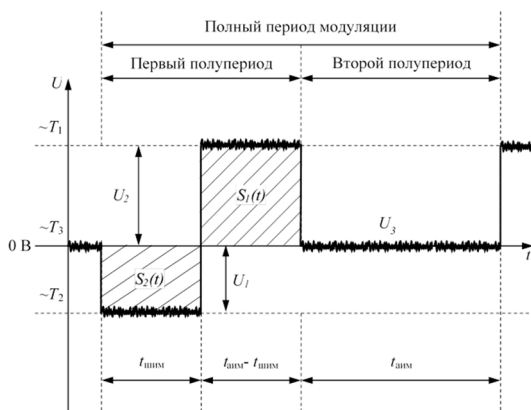


Рисунок 5 – Временная диаграмма огибающего модулированного сигнала на входе компаратора

Figure 5 – Timing diagram of modulated signal envelope at comparator input

Согласно реализации нулевого метода измерений длительность сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ изменяется до тех пор, пока области вольт-секундных площадей S_1 и S_2 не будут равны (рисунок 5), где $S_1 = U_2 - U_3$ и $S_2 = U_3 - U_1$. Только в таком случае и происходит выполнение условий нулевого баланса:

$$\Delta f k G(S_1) \cdot t_{\text{ШИМ}} = \Delta f k G(S_2) \cdot (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}). \quad (8)$$

Подставим уравнения (5), (6) и (7) в уравнение (8), получим:

$$((T_{\text{CH}} + T_{\text{Ш}}) \Delta f k G - (T_a + T_{\text{Ш}}) \Delta f k G) \cdot t_{\text{ШИМ}} = ((T_a + T_{\text{Ш}}) \Delta f k G - (T_{\text{НГШ}} + T_{\text{Ш}}) \Delta f k G) \cdot (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}). \quad (9)$$

Упростим выражение (9) относительно T_a :

$$T_a = T_{\text{НГШ}} + (T_{\text{НГШ}} - T_{\text{CH}}) \frac{t_{\text{АИМ}}}{t_{\text{ШИМ}}}. \quad (10)$$

Динамический диапазон измерений в предложенном нулевом микроволновом радиометре определяется шумовой температурой «горячего» и «холодного» эталонов $T_{a \text{ MAX}} = T_{\text{CH}}$ и $T_{a \text{ MIN}} = T_{\text{НГШ}}$ соответственно.

Уравнение (10) описывает связь между длительностью сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ и T_a . Одним из ключевых выводов из этого уравнения является то, что собственные шумы и коэффициент передачи радиометра не влияют на результаты измерений.

Расчет флуктуационной чувствительности предложенной схемы производился исходя из общей формулы для нулевых микроволновых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией, вывод которой подробно описан в [7]:

$$\Delta T_a = \frac{T_a}{\sqrt{2 \Delta f \tau R}} \frac{\sqrt{T_3(T_1 + T_2 + T_3) - T_1 T_2}}{T_1 - T_2}, \quad (11)$$

где $T_1 = U_1$, $T_2 = U_2$ и $T_3 = U_3$.

После подстановки (5), (6) и (7) в (11) получим:

$$\Delta T_a = \frac{T_a}{\sqrt{2 \Delta f \tau R}} \frac{\sqrt{(T_a + T_{\text{Ш}})(T_{\text{НГШ}} + T_{\text{Ш}} + T_{\text{CH}} + T_{\text{Ш}} + T_a + T_{\text{Ш}}) - (T_{\text{НГШ}} + T_{\text{Ш}})(T_{\text{CH}} + T_{\text{Ш}})}}{(T_{\text{НГШ}} + T_{\text{Ш}}) - (T_{\text{CH}} + T_{\text{Ш}})} \quad (12)$$

Упростим уравнение (12) и получим выражение для определения параметра флуктуационной чувствительности радиометра с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока:

$$T_a = \frac{\sqrt{T_a(T_{\text{НГШ}} + 4T_{\text{Ш}} + T_{\text{CH}} + T_a) + 2T_{\text{Ш}}^2 - T_{\text{CH}}T_{\text{НГШ}}}}{\sqrt{2 \Delta f \tau R}}. \quad (13)$$

По формуле (13) был построен график зависимости флуктуационной чувствительности микроволнового нулевого радиометра с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока от температуры. Для расчета были введены следующие параметры: $T_{\text{Ш}} = 150 \text{ K}$, $T_{\text{оп1}} = 350 \text{ K}$, $T_{\text{оп2}} = 300 \text{ K}$, $\Delta f = 100 \text{ МГц}$, T_a изменяется в диапазоне $1 \dots 300 \text{ K}$; $\tau = 1 \text{ с}$; $\Delta G = 0,4 \text{ дБ}$, $G = 80 \text{ дБ}$, $R = 5$.

График зависимости флуктуационной чувствительности от температур антенны представлен на рисунке 6.

Теоретический расчет флуктуационной чувствительности показал, что ΔT_a нулевого радиометра с низкотемпературным генератором шума повышается в 1,4 раза по сравнению с классическим вариантом реализации нулевого микроволнового радиометра с комбинированной импульсной модуляцией [8].

Уменьшение шумовой температуры ОГШ₂ влечет за собой уменьшение дисперсии вольт-секундных площадей при реализации нулевого метода, что определенно является положительным фактом. Помимо этого, повышение флуктуационной чувствительности происходит за счет повышения коэффициента передачи во входной СВЧ-части приемника, что приводит к уменьшению уровня собственных шумов радиометра.

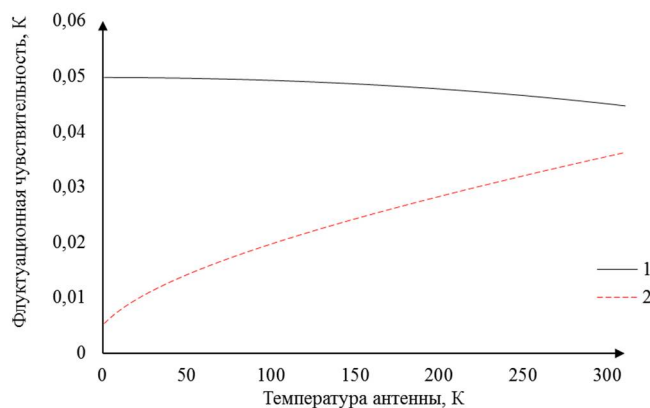


Рисунок 6 – Теоретический расчет флуктуационной чувствительности нулевого микроволнового радиометра:

- 1 – флуктуационная чувствительность нулевого радиометра, представленного на рисунке 1;
2 – флуктуационная чувствительность нулевого радиометра, представленного на рисунке 4**

Figure 6 – Theoretical calculation of fluctuation sensitivity of zero microwave radiometer:

- 1 – fluctuation sensitivity of zero radiometer shown in Figure 1;
2 – fluctuation sensitivity of zero radiometer shown in Figure 4**

Заключение

Модернизация схемы нулевого микроволнового радиометра показала, что использование МШУ в качестве опорного генератора шума позволяет устранить высокотемпературный генератор шума на основе ЛПД-диода или диода Ганна. Это приводит к упрощению конструкции и дает возможность исключить дополнительный СВЧ-переключатель и направленный ответвитель.

Предложенный способ построения нулевого микроволнового радиометра с применением комбинированной импульсной модуляции (амплитудной и широтной) позволяет сохранять точность результатов измерений в независимости от условий окружающей среды [7-8]. Теоретический расчет показал, что параметр флуктуационной чувствительности предложенного нулевого микроволнового радиометра в 1,4 раза выше, чем у исходного схемотехнического решения.

Предложенный способ реализации микроволнового радиометра найдет широкое применение в различных областях народного хозяйства, в частности в бортовых измерительных системах дистанционного зондирования Земли с применением МБПЛА, к примеру, для обнаружения пожаров лесных массивов или измерения влагозапаса почвы и т.д.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Библиографический список

1. Краус Дж. Д. Радиоастрономия. Пер. с англ. под ред. Железнякова В.В. М.: Сов.радио, 1973. 456 с.
2. Волохов С.А., Кочетков А.А. Компенсационный радиометр. Антенные измерения // Тез. докл. 4-й Всесоюзной конф. «Метрол. обес-печ. антен. измерений», 11-13 ноября, 1987, Ереван. 1987, с. 179-190.
3. Dicke R.H. Review Science. Instruments. 1946. Vol.17. p. 268; Dicke R.H. et al. Physics Review. 1946, vol. 70, p. 340.
4. Михайлов В.Ф., Брагин И.В., Брагин С.И. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие/ СПб: ГУАП, 2003. 404 с.
5. Филатов А.В. Проектирование микроволновых радиометрических систем с импульсным шумливанием: учеб. пособие/Томск: Изд-во Томский гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2019. 210 с.

6. **Убайчин А.В., Филатов А.В.** Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений: моногр. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. 154 с.

7. **Ubaychin A.V., Abdirasul Uulu T., Zhuk G.** Microwave radiometer for sensor systems with self-contained power supplies // *Sensor Review*, 2020, 40(3), с. 329-334.

8. **Жук Г.Г., Убайчин А.В., Щегляков А.В., Абдирасул уулу Т., Кречетов Д.С.** Чувствительность нулевого радиометра с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. 2021. № 3. С. 436-437.

UDC 504.064.37

ZERO MICROWAVE RADIOMETER WITH SIMPLIFIED DESIGN OF INPUT MICROWAVE UNIT AND WITH INCREASED FLUCTUATION SENSITIVITY

G. G. Zhuk, postgraduate student, Department of Radioelectronics and Communication Systems (RCS), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, Russia; orcid.org/0000-0002-5661-1754, e-mail: g.g.zhuk@mail.ru

The paper presents the results of developing a zero radiometer with a simplified design of input microwave unit. The aim of the work is to create a microwave radiometer with a simplified design of input microwave part of the receiver to reduce weight and size parameters and power consumption without deteriorating its technical characteristics. It is shown that the use of LNA as a low-temperature noise generator allows implementing the zero method without using high-temperature noise generators. Theoretical assessment has shown that the fluctuation sensitivity of zero microwave radiometer with a simplified design of input microwave unit is 1.4 times higher than that of the original circuit design. At the same time, simplification of microwave zero radiometer design leads to a decrease in weight and size parameters and power consumption, which makes it promising to be used in small-sized unmanned aerial vehicles.

Keywords: zero microwave radiometer, increasing fluctuation sensitivity, high-temperature noise generator, low-temperature noise generator, transistor noise source.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-90-32-40

References

1. **Kraus J.D.** Radio astronomy. Trans. from English. edited by Zheleznyakov V.V. Moscow: Sov.radio, 1973. 456 p.
2. **Volohov S.A., Kochetkov A.A.** Compensation radiometer. Antenna measurements. Abstracts of reports. 4-y All-Union Conf. Metrol. obes-pech. ant. mezmerov, 11-13 November, 1987, Yerevan. 1987, pp. 179-190.
3. **Dicke R.H.** Review Science. Instruments. 1946. Vol. 17. p. 268; Dicke R. H. et al. Physics Review. 1946. Vol. 70, p. 340.
4. **Mikhailov V.F., Bragin I.V., Bragin S.I.** Microwave equipment for remote sensing of the Earth: Textbook. SPbSUAI. SPb., 2003. 404 p.
5. **Filatov A.V.** Design of microwave radiometric systems with pulse noise: a tutorial. Tomsk: Publishing house of Tomsk. state University of control systems and radioelectronics, 2019. 210 p.
6. **Ubaychin A.V., Filatov A.V.** Multi-receiver microwave radiometric systems based on a modified method of null measurements: monograph. Tomsk: Publishing house of Tomsk. state University of control systems and radioelectronics, 2014. 154 p.
7. **Ubaychin A.V., Abdirasul U.T., Zhuk G.** Microwave radiometer for sensor systems with self-contained power supplies. *Sensor Review*, 2020, 40(3), pp. 329-334.
8. **Zhuk G.G., Ubaychin A.V., Shcheglyakov A.V., Abdirasul uulu T., Krechetov D.S.** Sensitivity of a zero radiometer with a simplified design of the input microwave block. *Microwave engineering and telecommunication technologies*. 2021, no. 3, pp. 436-437.