

УДК 621.317.08 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.42.50

Приемный канал СВЧ-гиперспектрометра с двумя приемниками для аэрокосмического зондирования Земли

А. В. Убайчин, к. т. н., с. н. с., доцент, ubaychin@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

Аннотация. Приведена разработанная структурная схема приемного канала СВЧ-гиперспектрометра на основе нового СВЧ-радиометра с двумя приемниками. Описан алгоритм функционирования приемного канала СВЧ-гиперспектрометра. Показанный вариант использования двух полупроводниковых генераторов шума для построения передаточной характеристики СВЧ-радиометра позволяет уменьшить зависимость результатов измерений от дестабилизирующих факторов радиометрических измерений в виде дрейфа собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приемника.

Предложен способ формирования опорного генератора низкотемпературного шума из собственных шумов малошумящего усилителя. Способ основывается на реализации низкотемпературного шума, обусловленного шумовой волной на входе малошумящего усилителя, работающего в согласованном режиме, при постоянных шумовых параметрах. Данный способ позволяет осуществить перенос направленного ответвителя из антенного канала СВЧ-радиометра в канал опорного генератора шума, что обуславливает повышение флуктуационной чувствительности за счет снижения потерь на входе системы.

Представлена математическая модель оценки погрешности измерений как функции точности термостатирования, температурных коэффициентов и величины потерь в элементах и узлах входной высокочастотной части. Показана возможность повышения разрешающей способности по частоте в два раза при заданной флуктуационной чувствительности, длительности одного измерения и уровне шумов за счет использования двух работающих параллельно радиометрических приемников. На основании разработанной математической модели приведены результаты численного эксперимента по оценке точности измерений при различных технических параметрах входной высокочастотной части.

Использование предложенного СВЧ-радиометра позволяет уменьшить зависимость результатов измерений от точности термостатирования по сравнению с существующими СВЧ-радиометрами, использующими пассивные генераторы шума.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, научное приборостроение, температурная стабильность, СВЧ-гиперспектральные исследования, погрешность измерений

Receiving Channel of UHF-Hyperspectrometer with Two Receivers for Earth Remote Sensing

A. V. Ubaychin, Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, associate professor, ubaychin@tpu.ru
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Abstract. The developed block diagram of the receiving channel of a microwave hyperspectrometer based on a new microwave radiometer with two receivers is presented. An algorithm for the functioning of the receiving channel of the microwave hyperspectrometer is described. The presented method of using two semiconductor noise generators for building the transfer characteristic of a microwave radiometer makes it possible to reduce the dependence of the measurement results on the destabilizing factors of radiometric measurements in the form of a drift of self-noise and the transmission coefficient of the radiometric receiver.

A method of forming a reference generator of low-temperature noise from the self-noise of a low-noise amplifier is proposed. The method is based on the implementation of low-temperature noise caused by a noise wave at the input of the low-noise amplifier operating in a coordinated mode with constant noise parameters. This method allows the transfer of the directional coupler from the antenna channel of the microwave radiometer to the channel of the reference noise generator, which leads to an increase in fluctuation sensitivity by reducing losses at the input of the system.

A mathematical model for estimating the measurement error as a function of thermostating accuracy, temperature coefficients, and losses in the elements and nodes of the high-frequency input is presented. The possibility of increasing the frequency resolution by a factor of two at a given fluctuation sensitivity, duration of one measurement and noise level due to the use of two radiometric receivers operating in parallel is presented. Based on the developed mathematical model, the results of a numerical experiment to assess the accuracy of measurements at various technical parameters of the high-frequency input are presented.

Using the proposed microwave radiometer makes it possible to reduce the dependence of the measurement results on the accuracy of temperature control compared to existing microwave radiometers using passive noise generators.

Keywords: remote sensing, scientific instrumentation, temperature stability, microwave hyperspectral studies, measurement error

Введение

Неуклонный рост потребности к повышению качества и количества информации, получаемой при дистанционном зондировании, приводит к необходимости поиска новых методов и подходов к его проведению. Одним из наиболее перспективных является гиперспектральный метод исследований, позволяющий получить информацию об объекте путем измерения его излучения в различных участках спектра. Повышение объема данных о спектральном составе излучения приводит к улучшению эффективности решения обратных задач характеристики исследуемого объекта.

Наибольшее распространение гиперспектральные методы получили в оптическом и ИК-диапазонах. Это связано с технологической простотой реализации большого числа сенсоров, работающих в различных спектральных диапазонах [1].

Прогресс развития и миниатюризации СВЧ-техники позволил реализовать гиперспектральные исследования в СВЧ-диапазоне. СВЧ-гиперспектрометры состоят из нескольких СВЧ-радиометров. Один или несколько СВЧ-радиометров, работающих на близких частотах, образуют приемный канал СВЧ-гиперспектрометра. Современные СВЧ-гиперспектрометры обладают десятками и сотнями приемных каналов и перекрывают диапазон частот от единиц до сотен гигагерц [2].

Повышение информативности при СВЧ-гиперспектральных исследованиях обуславливает требование по увеличению разрешающей способности по частоте. Это требование приводит к необходимости уменьшения рабочей полосы частот в применяемых СВЧ-радиометрах. Уменьшение рабочей полосы частот при заданной шумовой температуре радиометрического приемника приводит к ухудшению флуктуационной чувствительности и увеличению длительности измерений.

Бортовое базирование СВЧ-гиперспектрометров определяет повышенные требования по устойчивости к изменяющимся факторам внешней среды. Современные СВЧ-гиперспектрометры, как правило, выполняются на классических СВЧ-радиометрах. Такие СВЧ-радиометры требуют дополнительной стабилизации радиометрического приемника, что в случаях аэрокосмического базиро-

вания является фактором, ограничивающим их эффективное применение.

В связи с упомянутыми выше особенностями реализации СВЧ-гиперспектральных измерений актуальной является задача разработки нового подхода к реализации приемных каналов на основе СВЧ-радиометров нового типа, позволяющих реализовать совокупность повышенного спектрального разрешения и устойчивости к изменяющимся факторам внешней среды при заданном уровне шумов радиометрического приемника, флуктуационной чувствительности и длительности одного измерения.

В статье описан приемный канал СВЧ-гиперспектрометра, выполненный на основе нового СВЧ-радиометра, обладающего повышенными разрешающей способностью по частоте и устойчивостью к изменяющимся факторам внешней среды.

Теория

В соответствии с описанными выше требованиями предложен приемный канал СВЧ-гиперспектрометра, основанный на новом типе СВЧ-радиометров. Разработанный СВЧ-радиометр обладает двумя радиометрическими приемниками и использует активные генераторы шума в качестве опорных точек передаточной характеристики. Структурная схема разработанного СВЧ-радиометра представлена на рис. 1.

Структурная схема разработанного СВЧ-радиометра состоит из приемной антенны A с шумовой температурой T_A , термостата $ТС$ с поддерживаемой температурой $T_{СТ}$ и размещенными в нем генератором шума $ГШ$ с шумовой температурой $T_{ГШ}$, высокочастотным ключом $КЛ$, направленным ответвителем $НО$ с коэффициентом связи C , опорным малошумящим усилителем $ОМШУ$, согласованной нагрузки $СН$, высокочастотным переключателем $ПК$, управляемого гетеродина $Гет$, цифрового блока управления $ЦБУ$, двухканального аналого-цифрового преобразователя $АЦП$, двух идентичных радиометрических приемников $РП1$ и $РП2$ с шумовой температурой $T_{Ш}$, коэффициентом усиления G , шириной рабочей полосы частот Δf , состоящих из малошумящего усилителя $МШУ$, полосно-пропускающего фильтра $ППФ$,

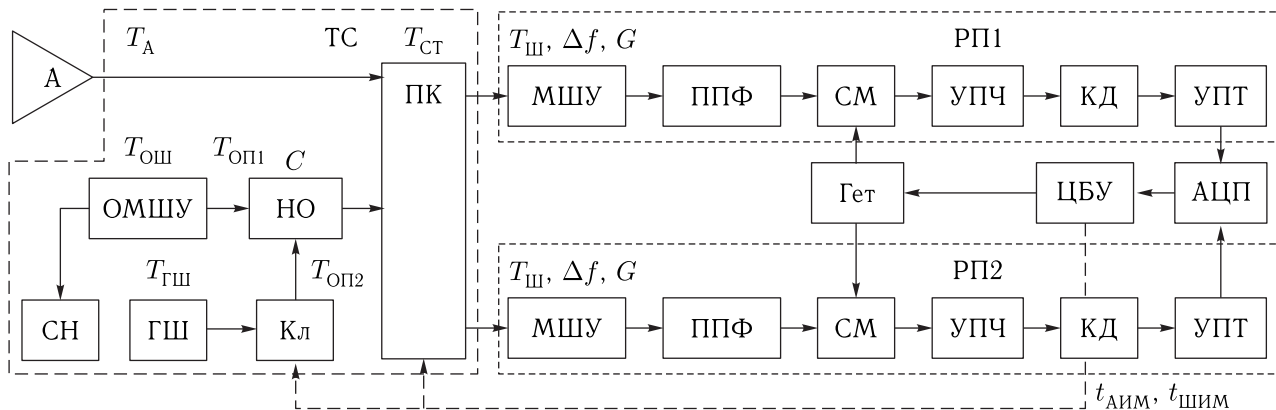


Рис. 1. Структурная схема разработанного СВЧ-радиометра

смесителя $СМ$, усилителя промежуточной частоты $УПЧ$, квадратичного детектора $КД$, усилителя постоянного тока $УПТ$.

Одной из ключевых особенностей предложенного СВЧ-радиометра является использование двух активных опорных полупроводниковых генераторов шума для построения передаточной характеристики. Сигнал первого опорного генератора шума формируется из собственных шумов опорного малошумящего усилителя. Для реализации этого вход опорного малошумящего усилителя подключен к входу радиометрического приемника. Таким образом, вход $ОМШУ$ согласован с входом радиометрического приемника. Это обеспечивает отсутствие интерференции и постоянные шумовые параметры $ОМШУ$. При этом на вход радиометрического приемника поступает низкотемпературный шум, обусловленный шумовой волной на входе $ОМШУ$. Уровень формируемого на входе $ОМШУ$ шума пропорционален его собственным шумам. Этот факт позволяет использовать $ОМШУ$ в качестве опорного генератора шума с шумовой температурой $T_{ОП1}$ [3].

Второй генератор шума реализован на лавинно-пролетном диоде в режиме обратного пробоя и формирует в антенном канале шумовой сигнал $T_{ОП2}$.

Функционирование предложенного СВЧ-радиометра осуществляется следующим образом. В радиометрических приемниках происходят последовательные операции усиления, полосовой фильтрации, переноса по частоте, усиления по промежуточной частоте, квадратичного детектирования и усиления детектированного сигнала.

$ЦБУ$ формирует сигналы амплитудно-импульсной модуляции $t_{АИМ0}$, $t_{АИМ1}$ и $t_{АИМ2}$. На рис. 2 представлены временные диаграммы, поясняющие принцип работы предложенного СВЧ-радиометра. На рис. 2, а изображены сигналы $t_{АИМ1}$, $t_{АИМ1}$ и $t_{АИМ0}$ соответственно. На рис. 2, б и рис. 2, в

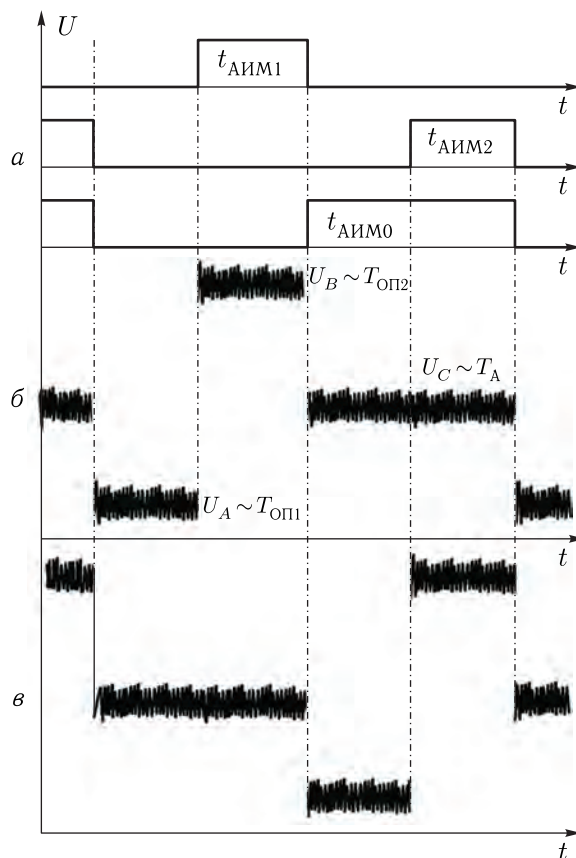


Рис. 2. Временные диаграммы работы СВЧ-радиометра

изображены сигналы на выходах РП1 и РП2 соответственно. Под действием низкого уровня сигнала $t_{АИМ0}$ посредством ПК осуществляется подключение антенны на вход РП2 и входа ОМШУ на вход РП1, под действием высокого уровня сигнала $t_{АИМ0}$ антенна подключается на вход РП1, а вход ОМШУ подключается на вход РП2. При высоком уровне $t_{АИМ1}$ или $t_{АИМ2}$ Кл переходит в режим низкого ослабления, что приводит к передаче сигнала ГШ к дополнительному каналу НО. При низком уровне $t_{АИМ1}$ или $t_{АИМ2}$ Кл переходит в режим высокого ослабления. Последовательное переключение на входах радиометрических приемников сигналов антенны, ОМШУ и комбинации ОМШУ и ГШ приводит к появлению на их выходе импульсно-модулированной последовательности.

Величина шумов первого опорного генератора шума $T_{ОП1}$ на входе ПК в соответствии со структурной схемой (рис. 1) равна

$$T_{ОП1} = T_{ОШ}, \quad (1)$$

где $T_{ОШ}$ — величина собственных шумов ОМШУ на его входе. Величина шумов второго опорного генератора шума $T_{ОП2}$ на входе ПК равна

$$T_{ОП2} = CT_{ГШ}, \quad (2)$$

где C — коэффициент связи направленного ответвителя.

Обозначим уровни сигналов на выходе первого радиометрического приемника, соответствующие подключению на его вход антенны ОМШУ и комбинации ОМШУ и ГШ через U_A , U_B и U_C соответственно. Уровни U_A , U_B пропорциональны шумовым температурам опорных генераторов шума и остаются неизменными (теоретически) в процессе эксплуатации.

Уровень U_C определяется величиной шумовой температуры антенны. Для его измерения используются различные методики [4]. В представленной реализации используется непосредственное измерение уровней U_A , U_B и U_C путем оцифровки. По сравнению с использованием компаратора и уравнивания вольт-секундных площадей [4] этот способ обладает потенциалом по увеличению динамики измерений при скачкообразных изменениях шумовой температуры антенны [5].

В соответствии с описанным выше алгоритмом переключения источников сигнала на входе РП1 уровни U_A , U_B и U_C с учетом (1), (2) равны

$$U_A = [T_{ОШ} + T_{Ш}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k = \quad (3)$$

$$= [T_{ОП1} + T_{Ш}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k,$$

$$U_B = [T_{ОШ} + T_{Ш} + T_{ГШ} \cdot C] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k = \quad (4)$$

$$= [T_{ОП1} + T_{ОП2} + T_{Ш}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k,$$

$$U_C = [T_A + T_{Ш}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k, \quad (5)$$

где $T_{ОШ}$ — низкотемпературный шум, пропорциональный собственным шумам ОМШУ, $T_{Ш}$ — шумовая температура РП1, T_A — шумовая температура антенны, G — полный коэффициент передачи РП1, Δf — рабочая полоса частот РП1, k — постоянная Больцмана, C — коэффициент связи направленного ответвителя.

Последовательная оцифровка в аналого-цифровом преобразователе позволяет измерить уровни сигналов U_A , U_B и U_C . Результаты измерений передаются в ЦБУ, где осуществляется расчет шумовой температуры антенны. Расчет шумовой температуры антенны происходит исходя из следующего. Для описанных выше уровней сигналов U_A , U_B и U_C справедливо равенство

$$\frac{T_{ОП2} - T_A}{T_A - T_{ОП1}} = \frac{U_B - U_C}{U_C - U_A}. \quad (6)$$

Выражая из (6) T_A , получим

$$T_A = \frac{T_{ОП2} \cdot [U_C - U_A] + T_{ОП1} \cdot [U_B - U_C]}{U_B - U_A}. \quad (7)$$

Выражение (7) связывает измеренные уровни сигналов U_A , U_B и U_C со значениями шумовых температур опорных источников. Важным следствием формулы (7) является отсутствие в ней параметров приемника G и $T_{Ш}$. Этот факт обуславливает теоретическое отсутствие влияния на результаты измерений изменений коэффициента передачи и дрейфа собственных шумов радиометрического приемника [4]. Численные значения параметров $T_{ОП1}$ и $T_{ОП2}$ определяются при калибровке СВЧ-радиометра по двум эталонным источникам шумового излучения путем установления соответствия измеренного уровня сигналов U_A , U_B заданным шумовым температурам на входе СВЧ-радиометра. Второй радиометрический приемник функционирует аналогично РП1.

В аспектах применения предложенного СВЧ-радиометра в качестве приемного канала СВЧ-гиперспектрометра преимуществом является возможность уменьшения рабочей полосы частот в два раза по сравнению с классическими СВЧ-радиометрами с одним радиометрическим приемником. Этот эффект обусловлен следующим. В работе [6] показано, что чувствительность СВЧ-радиометров с двумя приемниками в корень квадратный из двух выше чувствительности СВЧ-радиометра с одним приемником. Аналитически это следует из увеличения числа измерений в два раза на заданном временном интервале за счет параллельной работы двух радиометрических приемников. Увеличенное в два раза число измерений приводит к уменьшению дисперсии измеряемой величины в корень квадратный из двух. Минимальная чувствительность СВЧ-радиометров, использующих два опорных источника шума и один радиометрический приемник, при верхней границе динамического диапазона не превышающей $T_{\text{ОП2}}$, описывается выражением [4]

$$\Delta T_{A1} = \sqrt{\frac{1}{df_{\text{ИПР}}\tau}} \cdot \sqrt{\frac{4(T_{\text{ОП1}} + T_{\text{Ш}})^2 + T_{\text{ОП2}}^2}{8}}, \quad (8)$$

где $df_{\text{ИПР}}$ — рабочая полоса частот СВЧ-радиометра с одним приемником, τ — постоянная времени интегратора, характеризующая длительность одного измерения.

Учитывая (8), выражение для оценки рабочей полосы частот принимает вид

$$df_{\text{ИПР}} = \frac{1}{\Delta T_{A1}^2 \tau} \cdot \frac{4(T_{\text{ОП1}} + T_{\text{Ш}})^2 + T_{\text{ОП2}}^2}{8}. \quad (9)$$

В соответствии с теорией ошибок и исследованиями, проведенными в [6], чувствительность СВЧ-радиометров с двумя радиометрическими приемниками увеличивается в корень квадратный из двух. В этом случае справедливо равенство

$$\Delta T_{A2} = \frac{\Delta T_{A1}}{\sqrt{2}}, \quad (10)$$

где ΔT_{A2} — флуктуационная чувствительность СВЧ-радиометра с двумя приемниками.

Выражая из (10) ΔT_{A1} и подставляя в (9), запишем выражение для оценки рабочей полосы ча-

стот предложенного СВЧ-радиометра с двумя приемниками

$$f_{\text{ПР2}} = \frac{f_{\text{ИПР}}}{2} = \frac{1}{\Delta T_{A1}^2 \tau} \cdot \frac{4(T_{\text{ОП1}} + T_{\text{Ш}})^2 + T_{\text{ОП2}}^2}{16}. \quad (11)$$

Анализ совокупности выражений (8)–(11) позволяет сделать вывод, что в предложенном СВЧ-радиометре в случае сохранения длительности измерений на заданном уровне и флуктуационной чувствительности на уровне СВЧ-радиометра с одним радиометрическим приемником рабочая полоса частот сокращается в два раза.

В процессе эксплуатации СВЧ-гиперспектрометра важным с точки зрения сохранения стабильности измерений на заданном метрологическом уровне является точность поддержания уровня шумов опорных генераторов шума. В работе [7] показано, что использование в качестве опорного генератора шума согласованной нагрузки позволяет достигнуть минимальной точности измерений, равной величине ошибки поддержания температуры термостата. Очевидно, что для улучшения точности измерений необходимо применение генераторов шума, обеспечивающих меньшей зависимостью от изменяющейся температуры по сравнению с пассивными генераторами шума.

В разработанном СВЧ-радиометре, по сравнению с [8], температурная стабильность выше при одинаковой точности поддержания температуры термостата за счет использования активных генераторов шума. Для подтверждения этого проведен анализ погрешностей радиометрических измерений, результаты которого приведены ниже.

Основными факторами, приводящими к погрешности измерений в разработанном СВЧ-радиометре, являются: погрешность поддержания температуры термостата $\delta T_{\text{СТ}}$, температурная нестабильность шумов ОМШУ $\delta T_{\text{ОШ}}$, температурная нестабильность шумов генератора шума $\delta T_{\text{ГШ}}$, величина потерь в линии передачи между ОМШУ и НО $l_{\text{ОМШУ}}$, величина потерь в линии передачи между НО и ПК $l_{\text{ГШ}}$.

Для проведения анализа приняты следующие условия. Полные потери в линии передачи между ОМШУ и ПК равны сумме $l_{\text{ОМШУ}}$ и $l_{\text{ГШ}}$. Величиной потерь в линии передачи между антенной и ПК можно пренебречь, так как вклад этих

потерь не поддается контролю и свойствен всем СВЧ-радиометрам. Потери в ПК и линии передачи между ПК и входом радиометрического приемника не влияют на результаты измерений ввиду их взаимного вычитания при использовании выражения (9).

Обозначим через δU_A и δU_B погрешности измерения уровней сигналов U_A , U_B опорных генераторов шума. Учитывая потери в линиях передачи и погрешности поддержания температуры термостата (формулы (3)–(5), (7)), получим выражения для оценки величин δU_A и δU_B :

$$\delta U_A = [\delta T_{\text{ТОШ}} \cdot |\delta T_{\text{СТ}}| \cdot (1 - [l_{\text{ОШ}} + l_{\text{ГШ}}]) + |\delta T_{\text{СТ}}| \cdot (l_{\text{ОШ}} + l_{\text{ГШ}}) + T_{\text{Ш}}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k, \quad (12)$$

$$\delta U_B = [\delta T_{\text{ТОШ}} \cdot |\delta T_{\text{СТ}}| \cdot (1 - [l_{\text{ОШ}} + l_{\text{ГШ}}]) + \delta T_{\text{ТГШ}} \cdot |\delta T_{\text{СТ}}| \cdot l_{\text{ГШ}} + \delta T_{\text{СТ}} \cdot (l_{\text{ОШ}} + l_{\text{ГШ}}) + T_{\text{Ш}}] \times G \cdot \Delta f \cdot k, \quad (13)$$

где $\delta T_{\text{ТОШ}}$, $\delta T_{\text{ТГШ}}$ — модули максимального отклонения шумовой температуры ОМШУ и ГШ в пределах, обусловленных погрешностью поддержания температуры термостата.

Запишем выражение (7) с учетом погрешностей измерения уровней сигналов U_A , U_B :

$$T_A = \frac{T_{\text{ОП2}} \cdot [U_C - (U_A + \delta U_A)] - T_{\text{ОП1}} \cdot [U_C - (U_B + \delta U_B)]}{(U_B + \delta U_B) - (U_A + \delta U_A)}. \quad (14)$$

Выражение (14) с учетом (12) и (13) позволяет аналитически оценить погрешность измерений при известных параметрах $\delta T_{\text{СТ}}$, $\delta T_{\text{ОШ}}$, $\delta T_{\text{ГШ}}$, $l_{\text{ОМШУ}}$ и $l_{\text{ГШ}}$.

Результаты моделирования

Для оценки абсолютной точности измерений разработанного СВЧ-радиометра проведено численное моделирование на основе заданных параметров входной высокочастотной части. В качестве ОМШУ выбран мал шумящий усилитель *НМС517* с номинальной шумовой температурой 170 К и температурным коэффициентом собственных шумов

порядка 0,77 К/°С, для моделирования ГШ использован лавинно-пролетный диод *NW402* с температурным коэффициентом собственных шумов порядка 2100 К/°С при шумовой температуре $T_{\text{ГШ}} = 9,17 \cdot 10^5$ К.

Анализ температурной нестабильности уровня шумов ГШ и схемы его подключения позволяет сделать вывод о следующем. Использование направленного ответвителя, обеспечивающего направленный перенос в основной канал сигнала ГШ, равного верхнему динамическому диапазону СВЧ-радиометра, позволяет понизить значение тепловой нестабильности пропорционально коэффициенту связи C . Для рассмотренного примера тепловая нестабильность сигнала ГШ при верхней границе динамического диапазона, равной $T_{\text{МАКС}} = 300$ К, в основном канале направленного ответвителя составляет

$$\delta T_{\text{ТГШ}} = C \cdot \delta T_{\text{ТГШНОМ}} = \frac{T_{\text{МАКС}}}{T_{\text{ТГШНОМ}}} \cdot \delta T_{\text{ТГШНОМ}} = \frac{300}{9,17 \cdot 10^5} \cdot 2,1 \cdot 10^3 = 0,69 \text{ К/°С.}$$

Для проведения численного эксперимента использованы различные точности термостатирования входной высокочастотной части и величины потерь $l_{\text{ОМШУ}}/l_{\text{ГШ}}$. Результаты численного эксперимента на разработанной модели представлены в табл. 1.

Для оценки влияния температурной нестабильности опорных генераторов шума на погрешность измерений проведено исследование разработанной модели при следующих параметрах: точность термостатирования $\delta T_{\text{СТ}} = \pm 1$ К, величина потерь $l_{\text{ОМШУ}} = 0,1$, $l_{\text{ГШ}} = 0,1$, шумовая температура антенны $T_A = 300$ К. Результаты исследования приведены в табл. 2.

Для оценки распределения погрешности измерений по динамическому диапазону проведено моделирование изменения погрешности измерений как функции шумовой температуры антенны при различных величинах температурной нестабильности генераторов шума и заданных параметрах точности термостатирования $\delta T_{\text{СТ}} = \pm 1$ К, величине потерь $l_{\text{ОМШУ}} = 0,1$, $l_{\text{ГШ}} = 0,1$. Результаты моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 1. Модуль максимальной погрешности измерений как функции точности термостатирования и потерь во входной высокочастотной части

№	$\delta T_{СТ}$, К	Погрешность измерений, К					
		Величина потерь, $l_{ОМШУ}/l_{ГШ}$					
		0,5/0,5	0,33/0,33	0,25/0,25	0,2/0,2	0,125/0,125	0,1/0,1
1	± 1	1,341	1,151	1,056	0,999	0,913	0,885
2	$\pm 0,5$	0,672	0,576	0,528	0,500	0,457	0,442
3	$\pm 0,33$	0,448	0,384	0,352	0,333	0,305	0,295
4	$\pm 0,25$	0,336	0,288	0,264	0,250	0,228	0,221
5	$\pm 0,2$	0,269	0,231	0,211	0,200	0,183	0,177
6	$\pm 0,125$	0,168	0,144	0,132	0,125	0,114	0,111
7	$\pm 0,1$	0,134	0,115	0,106	0,100	0,091	0,088

Таблица 2. Модуль максимальной погрешности измерений как функция изменяющейся температурной стабильности $T_{ОП1}$ и $T_{ОП2}$

№	$\delta T_{ОП1}$	Погрешность измерений, К											
		$\delta T_{ОП2}$											
		$\pm 0,1$	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	± 1	$\pm 1,1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,3$	$\pm 1,4$	$\pm 1,5$	± 2
1	$\pm 0,1$	0,09	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,28
2	$\pm 0,3$	0,25	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,44
3	$\pm 0,5$	0,41	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,60
4	$\pm 0,7$	0,57	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,76
5	$\pm 0,9$	0,73	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,92
6	$\pm 1,1$	0,89	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,08
7	$\pm 1,3$	1,05	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,24
8	$\pm 1,5$	1,21	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,40
9	$\pm 1,7$	1,37	1,42	1,43	1,44	1,45	1,46	1,47	1,48	1,49	1,50	1,51	1,56
10	$\pm 1,9$	1,53	1,58	1,59	1,60	1,61	1,62	1,63	1,64	1,65	1,66	1,67	1,72

Обсуждение результатов

Применение в разработанном СВЧ-радиометре малозумящего усилителя, подключенного входом к входу радиометрического приемника, позволяет использовать его в качестве опорного генератора низкотемпературного шума.

Вследствие сравнительно низкого температурного коэффициента в примененных опор-

ных генераторах шума, выполненных на основе малозумящего усилителя и лавинно-пролетного диода, разработанный СВЧ-радиометр обладает повышенной устойчивостью к изменяющимся факторам внешней среды при заданной точности термостатирования входной высокочастотной части по сравнению с СВЧ-радиометрами, использующими пассивные опорные генераторы шума.

Таблица 3. Модуль максимальной погрешности измерений как функция изменяющейся шумовой температуры антенны и температурной стабильности $\delta T_{\text{ОП1}}$ и $\delta T_{\text{ОП2}}$

№	T_A	Погрешность измерений, К											
		Температурная стабильность опорных генераторов шума											
		$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	± 1	$\pm 1,1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,3$	$\pm 1,4$	$\pm 1,5$	± 2
1	0	0,18	0,22	0,26	0,29	0,33	0,37	0,40	0,44	0,48	0,51	0,55	0,73
2	30	0,21	0,25	0,29	0,34	0,38	0,42	0,46	0,50	0,55	0,59	0,63	0,84
3	60	0,24	0,28	0,33	0,38	0,43	0,47	0,52	0,57	0,62	0,66	0,71	0,95
4	90	0,26	0,32	0,37	0,42	0,47	0,53	0,58	0,63	0,68	0,74	0,79	1,05
5	120	0,29	0,35	0,41	0,46	0,52	0,58	0,64	0,70	0,75	0,81	0,87	1,16
6	150	0,32	0,38	0,44	0,51	0,57	0,63	0,70	0,76	0,82	0,89	0,95	1,27
7	180	0,34	0,41	0,48	0,55	0,62	0,69	0,75	0,82	0,89	0,96	1,03	1,37
8	210	0,37	0,44	0,52	0,59	0,67	0,74	0,81	0,89	0,96	1,04	1,11	1,48
9	240	0,40	0,48	0,56	0,63	0,71	0,79	0,87	0,95	1,03	1,11	1,19	1,58
10	270	0,42	0,51	0,59	0,68	0,76	0,85	0,93	1,01	1,10	1,18	1,27	1,69
11	300	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,90	0,99	1,08	1,17	1,26	1,35	1,80

В отличие от существующих СВЧ-радиометров [4], в представленном решении минимизированы потери в антенном канале. Это достигается за счет переноса направленного ответвителя в канал второго опорного генератора шума. Уменьшение потерь в антенном канале повышает чувствительность в предложенном СВЧ-радиометре.

Использование двух параллельно работающих радиометрических приемников позволяет на заданном временном интервале накапливать в два раза больше результатов измерений. В соответствии с приведенными аналитическими соотношениями это уменьшает рабочую полосу частот в два раза при заданных длительности измерения и флуктуационной чувствительности.

Разработанная математическая модель оценки абсолютной точности измерений позволяет на этапе проектирования СВЧ-радиометра оценить уровень погрешности измерений при известных параметрах точности термостатирования, потерь во входной высокочастотной части и температурных коэффициентах опорных генераторов шума.

Результаты численного моделирования показывают, что при температурных коэффициентах первого и второго опорных генераторов шума 0,77 и 0,69 К/°С соответственно и потерях во входной

высокочастотной части $l_{\text{ОМШУ}}$, $l_{\text{ГШ}}$, не превышающих суммарно уровень 0,2, величина максимальной погрешности измерений не превышает точности термостатирования.

Результаты исследований влияния изменяющегося уровня температурных коэффициентов опорных генераторов шума показывают, что для разработанного СВЧ-радиометра наибольшее влияние оказывает температурный коэффициент ОМШУ.

Исследование распределения погрешности измерений по динамическому диапазону, составляющему 0–300 К, показало, что величина изменения погрешности измерений не превышает двух раз при равных величинах температурных коэффициентов опорных генераторов шума, величине потерь во входной высокочастотной части 0,1 и величине погрешности поддержания температуры термостата не более ± 1 К.

Заключение

Разработана схема приемного канала СВЧ-гиперспектрометра, использующая два радиометрических приемника и два опорных полупроводниковых генератора шума.

В качестве опорных генераторов шума применены активные полупроводниковые генераторы шума — лавинно-пролетный диод в режиме обратного пробоя и малошумящий усилитель, подключенный входом к входу радиометрического приемника.

Подключение малошумящего усилителя входом к входу радиометрического приемника позволяет формировать на входе радиометрического приемника низкотемпературный шум, пропорциональный собственным шумам малошумящего усилителя.

Использование двух опорных генераторов шума позволяет минимизировать влияние дестабилизирующих факторов радиометрических измерений, а именно дрейфа собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приемника. Это позволяет упростить калибровку в гиперспектральном режиме и повысить устойчивость к изменяющимся факторам внешней среды, в первую очередь температуры.

Перенос направленного ответвителя из антенного канала уменьшает потери на входе системы и приводит к повышению чувствительности.

Использование двух приемников позволяет увеличить разрешающую способность по частоте при проведении СВЧ-гиперспектральных исследований в два раза за счет пропорционального увеличения времени наблюдения за сигналом антенны по сравнению с приемными каналами, выполненными на основе классических СВЧ-радиометров с одним радиометрическим приемником.

Разработанная математическая модель оценки погрешности радиометрических измерений позволит на этапе проектирования оценить точность измерений в зависимости от технических параметров входной высокочастотной части.

Результаты численного эксперимента на разработанной модели показали, что влияние точности термостатирования на результаты измерений снижено по сравнению СВЧ-радиометрами, использующими пассивные опорные генераторы шума.

В разработанном СВЧ-радиометре основной вклад в погрешность измерений обусловлен температурной нестабильностью уровня собственных шумов опорного малошумящего усилителя.

Проведенные в статье результаты являются основой для последующих практических эксперимен-

тальных исследований технических характеристик разрабатываемого двухприемникового СВЧ-гиперспектрометра для дистанционного зондирования природных сред.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00045).

Список литературы

1. *Smith Sr. W. L., Revercomb H., Bingham G., Larar A., Huang H., Zhou D., Li J., Liu X. and Kireev S.* Evolution, current capabilities, and future advances in satellite nadir viewing ultraspectral IR sounding of the lower atmosphere // *Atmosphere Chemical Physics*, 2009, vol. 9. P. 5563–5574.
2. *Blackwell J. W., Leslie R. V., Pieper M. L., Samra J. E.* All-Weather Hyperspectral Atmospheric Sounding // *Lincoln laboratory journal*, 2010, vol, 18, № 2. P. 28–46.
3. *Frater R. H., Williams D. R.* An Active “Cold” Noise Source // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1981, vol. 29, is. 4. P. 344–347.
4. *Убайчин А. В., Филатов А. В.* Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений. Томск: Изд. ТУСУР, 2014. 154 с.
5. *Абдирасул уулу Т., Алексеев Е. В., Данилов Д. Н., Жук Г. Г., Ташходжаев 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.
6. *Filatov A. V., Ubaichin A. V., Bombizov A. A.* A two-receiver microwave radiometer with high transfer characteristic linearity // *Measurement Techniques*, 2013, vol. 55, is. 11. P. 1281–1286.
7. *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.
8. *Убайчин А. В.* Инвариантность нулевых радиометров с цифровым управлением подшумливанием к нелинейности уравнивающего генератора шума на лавинно-пролетном диоде // *Доклады ТУСУР*, 2012, № 2(26), ч. 1. С. 87–91.