
Электродинамика и антенные системы

УДК 621.396.67

Генератор шума для калибровки трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы

Писный А.С., Федосеева Е.В., Груздев И.А.

В статье описаны условия реализации метода внешней калибровки СВЧ радиометрической системы на основе генератора шума. Рассмотрены принципы работы современных генераторов шума и, в частности, твердотельного генератора ГШМ2-18В-01. Выполнена оценка параметров генератора шума для калибровки трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы: эквивалентной шумовой температуры и избыточной относительной шумовой температуры по двум шумовым источникам.

Ключевые слова: генератор шума, СВЧ радиометрическая система, внешняя калибровка СВЧ радиометрической системы, радиояркость температура, эквивалентная шумовая температура и избыточная относительная шумовая температура.

Введение

СВЧ-радиометрические системы (РМС) дистанционного зондирования окружающей среды, обеспечивают непрерывный сбор данных о наблюдаемом пространстве путем измерения собственного теплового радиоизлучения зондируемой области. Данные системы позволяют эффективно отслеживать динамику атмосферных процессов, прогнозировать метеорологические явления и определять интегральное влагосодержание атмосферы, что способствует повышению безопасности авиаперевозок, движения морских судов и прогнозирование метеоявлений [1-9].

Важным фактором, определяющим достоверность получаемых данных, является точность калибровки СВЧ РМС. Процедура калибровки устанавливает однозначное соответствие между выходным сигналом измерительного тракта и абсолютным значением радиояркости температуры $T_{я}$ наблюдаемого объекта [1-9]. Задача внешней калибровки всего СВЧ радиометрического комплекса «антенна - фидерный тракт - радиометр» особенно актуальна, так как позволяет скомпенсировать влияние и внешних и внутренних помех.

В данной статье рассматривается метод внешней калибровки многодиапазонной

радиоизмерительной системы с параболической зеркальной антенной при использовании внешнего источника шумового сигнала [10,11]. В качестве такого эталонного источника шума предлагается использовать твердотельный генератор шума (ГШ) ГШМ2-18В-01, подключенный к рупору с широким диапазоном частот и расположенный в основании зеркала.

Целью статьи является анализ условий реализации метода внешней калибровки СВЧ радиометрической системы, анализ принципов работы современных генераторов шумовых сигналов в СВЧ диапазоне и определение ключевых параметров генератора шума для его использования в составе СВЧ РМС на частотах 3, 9 и 18 ГГц.

Определение задачи калибровки многодиапазонной РМС СВЧ

Задача калибровки СВЧ РМС заключается в установлении точной и стабильной передаточной функции, связывающей измеряемую на выходе радиометра величину (напряжение или цифровой код АЦП) с радиояркостью температурой радиоволн на входе антенны. Для многодиапазонной радиометрической системы, предназначенной для метеорологических исследований, эта задача усложняется

необходимостью проводить калибровку одновременно в нескольких частотных каналах, каждый из которых чувствителен к различным компонентам атмосферы (например, водяному пару или жидко-капельной влаге).

Рассматриваемая СВЧ радиометрическая система представляет собой комплекс, состоящий из параболической зеркальной антенны, в фокальной области которой расположен рупорный облучатель, обеспечивающий излучение шумового сигнала от генератора шума в направлении многомодового облучателя антенны системы [12-14]. Такой метод позволяет выполнить калибровку СВЧ РМС в целом, включая антенну, фидерный тракт и приёмник, что сводит к минимуму погрешности, связанные с рассогласованием и потерями в отдельных элементах системы.

Математически задача калибровки сводится к определению коэффициентов линейного уравнения радиометра для каждого канала:

$$T_{я} = a \cdot U_{вых} + b, \quad (1)$$

где $U_{вых}$ — выходное напряжение радиометра, a — коэффициент усиления (крутизна передаточной характеристики, КПВ (S)), b — аддитивная постоянная, соответствующая собственной шумовой температуре системы.

Для определения коэффициентов a и b используется метод двух отсчётов («горячей» и «холодной» нагрузок). В качестве «горячей» нагрузки выступает сигнал от включённого генератора шума, радиояростная температура которого известна и стабильна. В качестве «холодной» нагрузки может использоваться: собственный шум системы при выключенном генераторе шума (температура окружающей среды облучателя) или излучение «холодного» участка неба в зените при ясной погоде.

Таким образом, при разработке системы калибровки многодиапазонной СВЧ РМС необходимо решить следующие задачи:

- обеспечение стабильного и известного уровня мощности шума от ГШ на входе приёмника;
- точный учёт потерь и рассогласований в тракте от ГШ до приёмника;

- выбор ГШ с диапазоном рабочих частот, включающим частоты калибровки СВЧ РМС (в данном случае частоты 3, 9 и 18 ГГц входят в рабочий диапазон частот ГШМ2-18В-01).

Принципы калибровки СВЧ РМС

ГШ используется для калибровки приемного тракта радиометра, чаще всего методом Y-фактора [1-9]. В этом методе измеряют выходную мощность приемника при подключении к нему двух источников шума с известными температурами: «холодного» (например, согласованной нагрузки при комнатной температуре) и «горячего» (ГШ в активном состоянии). Избыточное отношение шумовой температуры (ИОШТ) ГШ определяет его «горячую» температуру относительно стандартной опорной температуры.

Таким образом, «перевод в яркостную температуру» ГШ - это расчет его шумовой температуры в активном состоянии, которая будет служить известной эталонной температурой для калибровки радиометра.

Также известны следующие методы калибровки СВЧ РМС [15]:

1) Метод калибровочных нагрузок предполагает использование радиопоглощающих дисков с температурой, близкой к температуре окружающей среды (~300 К). Основным недостатком является низкий контраст между температурой диска и температурой фона (неба), особенно в ясную погоду, когда радиояростная температура неба может быть значительно ниже 300 К.

2) Метод калибровки по небу («Sky-dip») - калибровка по излучению атмосферы в зените (в качестве «холодной» нагрузки) и согласованной нагрузки при температуре окружающей среды (в качестве «горячей»). Этот метод сильно зависит от погодных условий и требует высокой однородности атмосферы.

3) Использование измерителя коэффициента шума (шуммера). Это автоматизированный метод Y-фактора, при котором измеритель коэффициента шума подключается к выходу приемника, а ГШ - к входу приемника. Прибор автоматически переключает ГШ

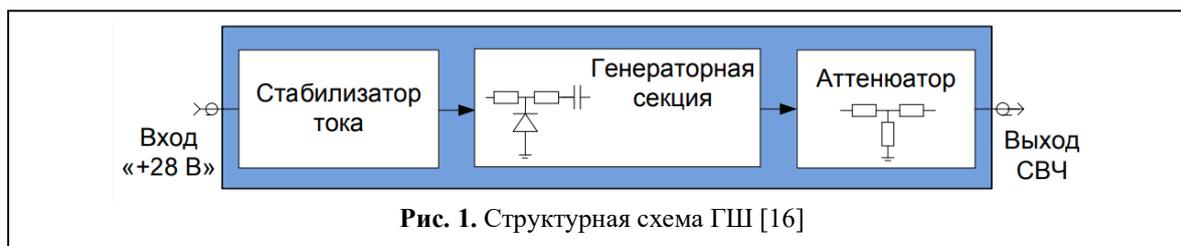


Рис. 1. Структурная схема ГШ [16]

между "включенным" (горячим) и "выключенным" (холодным).

4) Метод с использованием генератора сигнала и измерителя мощности (метод отношения сигнал/шум). Данный метод позволяет определить коэффициент шума, из которого затем может быть рассчитана шумовая температура.

5) Метод абсолютного измерения шумовой мощности (с калиброванным измерителем мощности/анализатором спектра). Это прямой, но и самый сложный для точной реализации метод.

Предлагаемый метод с использованием встроенного генератора шума позволяет устранить эти недостатки, обеспечивая высокий уровень калибровочного сигнала («горячая» точка) и независимость от внешних условий.

Принципы работы и параметры генераторов шума СВЧ диапазона

Генератор шума — это радиоэлектронное устройство, предназначенное для создания электрического сигнала со случайным характером и равномерной спектральной плотностью мощности в широком диапазоне частот [16]. В основе его работы лежат различные физические процессы, порождающие флуктуации выходного сигнала. Современные СВЧ ГШ можно классифицировать по типу используемого источника шума.

Наиболее распространенный тип генераторов шума – твердотельные (полупроводниковые), к которому относится ГШМ2-18В-01. В качестве первичного источника шума в них используются полупроводниковые лавинно-пролетные диоды (ЛПД), работающие в специальных режимах.

В ЛПД диодах при подаче обратного напряжения, превышающего напряжение

пробоя, происходит лавинообразное размножение носителей заряда. Источником шумового сигнала в случае лавинного пробоя являются как дробовые флуктуации тока диода, так и флуктуации коэффициента умножения лавины. Движение лавин носит стохастический характер, что приводит к возникновению мощного шумового тока в широкой полосе частот. Этот тип шума обладает высокой интенсивностью, что позволяет создавать генераторы шума с большим коэффициентом избыточного шума (КИШ) [16].

Конструктивно генератор шума ГШ состоит из стабилизатора тока, генераторной секции и аттенюатора (рис. 1).

Стабилизатор тока обеспечивает режим работы ЛПД – основного элемента генераторной секции, которая также включает в себя пассивную цепь, согласующую выходное сопротивление ЛПД с входным сопротивлением аттенюатора. Аттенюатор предназначен для установки требуемого уровня выходной шумовой мощности и, что особенно важно, для улучшения согласования выхода генератора шума с внешней нагрузкой и минимизации коэффициент стоячей волны. Если на ЛПД подать напряжение смещения, то выходной сигнал будет соответствовать тепловому шуму высокой температуры, что обусловлено соответствующими генерациями диода. Это своего рода имитация горячей резистивной нагрузки. Если напряжение смещения отсутствует, то выходной сигнал будет соответствовать шуму согласованной нагрузки при температуре окружающей среды (холодная резистивная нагрузка). ГШ может работать как в непрерывном режиме, так и в импульсном режиме [16].

Другим вариантом используемого источника шума для реализации СВЧ ГШ являются тепловые генераторы, основанные на

фундаментальном явлении теплового (джонсоновского) шума, возникающего в любом проводнике при температуре выше абсолютного нуля. Спектральная плотность мощности теплового шума описывается формулой Найквиста:

$$P_n = kTB \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, B — полоса частот.

В качестве источника используется согласованная нагрузка (резистор), термостатированная при известной температуре. Такие генераторы шума являются первичными эталонами, но уровень их шума очень мал, что ограничивает их прямое применение для калибровки систем с высокой собственной шумовой температурой.

Важным параметром для ГШ, применяемого для калибровки СВЧ РМС, является коэффициент избыточного шума (КИШ). Он показывает, во сколько раз мощность шума, создаваемого генератором, превышает мощность стандартной тепловой нагрузки при температуре $T_0 = 290\text{K}$.

$$\text{КИШ(дБ)} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T_{\text{гор}} - T_0}{T_0} \right). \quad (3)$$

Другими важными параметрами являются стабильность КИШ во времени и в зависимости от температуры, а также коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), который характеризует степень согласования выхода генератора шума с нагрузкой. Низкий КСВН необходим для минимизации отражений и обеспечения точной передачи шумовой мощности в калибруемую систему.

Оценка параметров ГШМ2-18В-01 для калибровки трехдиапазонной СВЧ РМС

В первую очередь необходимо определить «собственную шумовую температуру» ГШМ в его "горячем" (включенном) состоянии. Эта температура, является «эталонной радиояркой температурой», которую ГШМ передает в СВЧ радиометрическую систему [17].

Радиояркая температура ($Tя$) - это температура абсолютно черного тела, которое излучало бы такую же мощность в заданном

диапазоне частот, как и исследуемый объект (в данном случае, ГШМ).

Эквивалентная шумовая температура (T_E) - это температура, при которой идеальный резистор (согласованная нагрузка) генерировал бы такую же шумовую мощность, как и исследуемое устройство. Горячая шумовая температура ГШМ является его эквивалентной шумовой температурой в рабочем состоянии [18].

Для эффективной калибровки РМС генератор шума должен соответствовать ряду требований, касающихся его основных характеристик [19, 20]:

1) Диапазон частот и выбор каналов: ГШМ2-18В-01 работает в диапазоне до 18 ГГц. Выбранные частоты 3, 9 и 18 ГГц позволяют проводить многоканальную калибровку. Частота 3 ГГц слабо подвержена влиянию атмосферы и может служить опорным каналом. Частота 9 ГГц чувствительна к капельной влаге (облака, дождь). Частота 18 ГГц находится вблизи крыла линии поглощения водяного пара (22,235 ГГц) и чувствительна к его содержанию [9].

2) Коэффициент избыточного шума (КИШ): ГШМ2-18В-01 имеет значения КИШ в диапазоне 15–25 дБ. Это соответствует эквивалентной шумовой температуре в несколько тысяч или десятков тысяч кельвинов. Такой высокий уровень сигнала обеспечивает значительный отрыв от собственной шумовой температуры системы (обычно составляет 100–500 К) и от температуры «холодной» нагрузки. Это позволяет с высокой точностью определить коэффициент усиления системы. Важнейшим условием является наличие калибровочного сертификата на ГШ, в котором указана зависимость КИШ от частоты с требуемой точностью (обычно $\pm 0,1$ дБ).

3) Стабильность. Для точной калибровки требуется высокая временная и температурная стабильность КИШ. Современные твердотельные генераторы шума обеспечивают стабильность на уровне 0,01 дБ/°С и 0,02 дБ/8 часов после прогрева. Этого достаточно для проведения надежных калибровочных циклов

Таблица 1. Значения ИОШТ в зависимости от частоты, значения по паспорту

Частота, ГГц	Значение ИОШТ, дБ	Значение ИОШТ, отн. Ед.
3	15,29	33,82
9	13,76	23,79
18	14,72	29,64

при СВЧ радиометрических измерениях собственного ради шумового излучения окружающего пространства.

4) Коэффициент стоячей волны (КСВН) характеризует рассогласование между выходом ГШ и входом облучателя, что приводит к отражениям, которые создают стоячую волну в фидерном тракте. Это вызывает частотно-зависимую погрешность передаваемой мощности. КСВН ГШМ2-18В-01 находится в пределах 1,2–1,5. Для минимизации погрешности необходимо обеспечить качественное согласование во всей цепи.

Значения ИОШТ (избыточная относительная шумовая температура) в зависимости от частоты приведены в таблице 1.

Для применения ГШ в калибровочном уравнении радиометра необходимо преобразовать его паспортную характеристику - избыточное отношение шумовой температуры (ИОШТ) - в абсолютное значение эквивалентной шумовой температуры «горячей» нагрузки по формуле

$$T_{гор} = T_0 \cdot (1 + \text{ИОШТ}_{\text{лин}}), \quad (4)$$

где: $T_{гор}$ - "горячая" шумовая температура ГШМ (в Кельвинах), T_0 - стандартная опорная температура, обычно принимаемая за 290 К.

Для частоты 3 ГГц:

$$T_{гор} = 290 \cdot (1 + 33,82) = 10107,8 \text{ К};$$

Для частоты 9 ГГц:

$$T_{гор} = 290 \cdot (1 + 23,79) = 7189,1 \text{ К};$$

Для частоты 18 ГГц:

$$T_{гор} = 290 \cdot (1 + 29,64) = 8885,6 \text{ К}.$$

Полученные значения представляют собой высокотемпературные калибровочные точки, которые система будет регистрировать при включенном ГШ. Сравнение откликов системы на «горячую» и «холодную» нагрузки позволяет определить коэффициенты передаточной функции радиометра.

Заключение

В статье рассмотрена задача калибровки многодиапазонной радиометрической системы СВЧ с использованием внешнего генератора шума. Предложенный метод, основанный на интеграции ГШ ГШМ2-18В-01 в антенную систему, позволяет проводить калибровку всего измерительного тракта, сводя к минимуму влияние внешних факторов и обеспечивая высокий уровень калибровочного сигнала.

Были определены ключевые этапы процедуры калибровки, описаны физические принципы работы современных генераторов шума и проанализированы их основные параметры: КИШ, стабильность и КСВН. Оценка характеристик генератора ГШМ2-18В-01 показала, что он может быть применен в качестве «горячей» нагрузки на частотах 3, 9 и 18 ГГц.

Литература

1. Баранов Е.И. Современные технологии радиолокации в авиации и морском транспорте. Новосибирск: Сибирское издательство, 2018. 200 с.
2. Петров М.Л. Применение радиотеплолокационных систем в сельском хозяйстве // Вестник аграрной науки. 2019. №4. С. 45–52.
3. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИРАН, 2014. 544 с.
4. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. 2003. Vol. 38. No. 4. P. 8079.
5. Kerr Y.H., et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. Proceedings of the IEEE. 2010.
6. Башаринов А.Е., Гуревич А.С., Егоров С.Т. Радионизлучение Земли как планеты. — М.: Наука, 1974. — 188 с.
7. Улаби Ф. Т., Мур Р. К., Фунг А. К. Дистанционное зондирование в микроволновом диапазоне: активное и пассивное. Том 1: Основы дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне и радиометрия. — ArtechHouse, 1981. — 456 с.
8. Вестуотер Э. Р., Хан Ю., Ирисов В. Г. и др. Дистанционное зондирование температурных

профилей пограничного слоя с помощью комбинации методов микроволновой радиометрии и нечёткой логики // Журнал «Технологии атмосферы и океана». — 2001. — Т. 18, № 6. — С. 951–960.

9. Стерлядкин В.В. Микроволновые радиометрические методы исследования атмосферы. — М.: Физматлит, 2009. — 208 с.

10. Fedoseeva E.V., Rostokin I.N., Shchukin G.G. Calibration of a Three-Band Microwave System with Background Noise Compensation // Measurement Techniques. 2020. Vol. 63. No. 4. Pp. 301–307.

11. Бутакова С.В. Широкоапертурный шумовой СВЧ излучатель типа «черное тело» с яркостной температурой 104 К // Известия вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. No 11. С. 1431–1435.

12. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Многочастотные исследования неоднородной атмосферы // Метеорология и гидрология. 2022. No12. С. 78–87.

13. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. Вопросы построения многочастотной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. No 1(17). С. 5–12.

14. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г., Ростокин И.Н., Ростокина Е.А. Компенсация помех в работе

Поступила 18 октября 2025 г.

The article describes the conditions for the implementation of the method of external calibration of a microwave radiometric system based on a noise generator. The principles of operation of modern noise generators and, in particular, the GSHM2-18V-01 solid-state generator are considered. The parameters of the noise generator for calibration of a three-band microwave radiometric system were evaluated: the equivalent noise temperature and the excess relative noise temperature from two noise sources.

Keywords: noise generator, microwave radiometric system, external calibration of the microwave radiometric system, radio brightness temperature, equivalent noise temperature and excessive relative noise temperature.

Писный Артём Сергеевич – магистрант Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: art.pisny2020@gmail.com

Федосеева Елена Валерьевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

Груздев Илья Алексеевич – студент Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

СВЧ радиометрических систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. No. 1(13). С. 50–62.

15. Ривз Р. Г. (ред.). Руководство по дистанционному зондированию. Том. I: Теория, приборы и методы. — Американское общество фотограмметрии, 1975.

16. ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА ГШМ2-18, ГШМ2-20 Руководство по эксплуатации ЖНКЮ.468169.004РЭ-ЛУ

17. Князь А. И., Степушкин Д. В. Шумы в радиоэлектронных устройствах. М.: Горячая линия — Телеком, 2017. 248 с.

18. Ранда Дж. Системы измерения температуры по шуму // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2002. Том 51, № 4. С. 636–640.

19. ГОСТ 8.560-95. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности мощности и эквивалентной шумовой температуры в диапазоне частот 0,01–37,5 ГГц. М. : Изд-во стандартов, 1996. 16 с.

20. Савельев В. А. Основы метрологии СВЧ. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 128 с.