

УДК 621.3.091.1

А.В. Убайчин

Инвариантность нулевых радиометров с цифровым управлением подшумливанием к нелинейности уравнивающего генератора шума на лавинно-пролетном диоде

Приведены результаты экспериментов на нулевом радиометре (рабочая частота 2,8 ГГц) с комбинированной широтно-импульсной модуляцией и цифровым управлением подшумливанием, определяющие линейность передаточной характеристики устройства при использовании лавинно-пролетного диода в качестве активного источника выравнивающего шума.

Ключевые слова: лавинно-пролетный диод, нелинейность, нулевой радиометр, дистанционное зондирование Земли, линейность передаточной характеристики.

Введение. Информативность данных, полученных при исследовании объектов различной природы радиофизическими методами, зависит не только от интерпретации результатов – решения обратных задач, но и от точности приемной аппаратуры. При исследовании собственного электромагнитного излучения объектов используют специализированные приемники – радиометры. Специфичность измерений радиотепловых сигналов обусловлена физическими параметрами собственного электромагнитного излучения, т.е. необходимо измерять широкополосные сигналы, вызванные термодинамическим излучением, мощность которых соизмерима, а иногда меньше мощности собственных шумов приемника. Для регистрации сверхнизкой мощности применяют различные схемы радиометров: компенсационную, корреляционную или модуляционную. Для точного измерения шумовой температуры антенны применяют нулевые радиометры [1]. Основным недостатком данного типа радиометров является большая погрешность измерений при высоком динамическом диапазоне, характерном для задач дистанционного зондирования Земли или исследования солнечной активности, обусловленная нелинейной передаточной характеристикой выравнивающего источника шумового сигнала. Для повышения линейности передаточной характеристики выравнивающего источника шумового сигнала нулевого радиометра предлагается использовать в нем комбинированную импульсную модуляцию и цифровое управление подшумливанием, при одновременном применении в качестве активного генератора выравнивающего шума гибридной интегральной схемы на основе лавинно-пролетного диода с нелинейной характеристикой.

На практике выбор схемного решения для реализации радиометра осуществляется между модуляционной (радиометры Дикке) и компенсационной схемами и их модификациями в связи с простой реализации [1]. Основным недостатком модуляционных и компенсационных радиометров – зависимость показаний от изменения коэффициента передачи приемника (компенсационная схема так же подвержена влиянию дрейфа собственной шумовой температуры приемника). Данные факторы не позволяют повышать флуктуационную чувствительность до максимальной – теоретической и обеспечивать высокую долговременную стабильность.

Особое место среди модуляционных радиометров занимают нулевые радиометры – системные решения с уравниванием входного воздействия (шумовой температуры антенны) при помощи эталонного (опорного) источника шума. Нулевые радиометры позволяют значительно снизить, а в теории полностью исключить влияние основных дестабилизирующих факторов работы модуляционных радиометров: флуктуаций коэффициента передачи измерительного тракта, так как прибор работает в режиме нуля органа и коэффициент передачи не входит в передаточную характеристику [2].

Широко известны два метода уравнивания входной мощности (шумовой температуры антенны) – с применением управляемых аттенуаторов и при помощи перестраиваемых генераторов шума [1].

Первый метод обеспечивает высокий динамический диапазон, но ограничен в разрешающей способности (флуктуационной чувствительности) и линейности передаточной характеристики даже с применением современных цифровых аттенуаторов с высокой разрядностью.

Второй метод обеспечивает меньший динамический диапазон измерения, но позволяет изменять с высокой разрешающей способностью сигнал опорного генератора, что позволяет проводить измерения с большей точностью. Недостатком аналоговых нулевых систем с перестраиваемым генератором шума является нелинейная зависимость генерируемой мощности опорного шумового сигнала от тока, протекающего через активный элемент генератора – лавинно-пролетный диод.

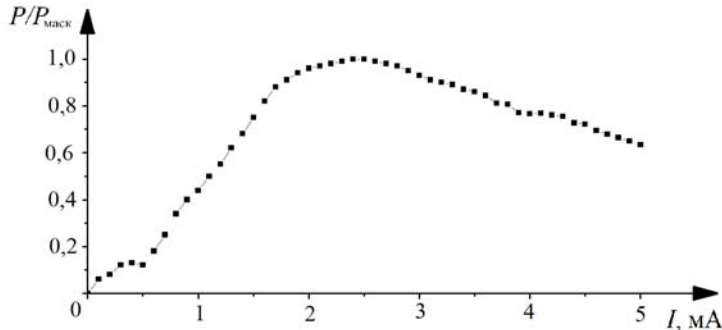


Рис. 1. Зависимость генерируемой мощности от тока через активную зону лавинно-пролетного диода

На рис. 1 приведена зависимость нормированной мощности генератора шума на базе гибридной интегральной схемы NC501 NoiseCom от тока через активный элемент гибридной интегральной схемы – лавинно-пролетный диод. Максимальная генерируемая мощность соответствует шумовой температуре $T_{ГШ} \approx 10^5$ К.

Калибровка характеристики диода во всех точках физически невозможна, а применяемая кусочно-линейная аппроксимация не обеспечивает равномерной чувствительности во всем динамическом диапазоне. Кроме того, при длительной работе устройства в режиме приема входных сигналов с высокой радиояркостью температура диода генерирует высокую мощность, что вызывает разогрев активной зоны и сдвиг характеристики диода от первоначальной.

Недостатки систем аналогового регулирования уравнивающей мощности устраняет схема нулевого радиометра с комбинированной широтно-импульсной модуляцией [3]. Базовая схема устройства приведена на рис. 2.

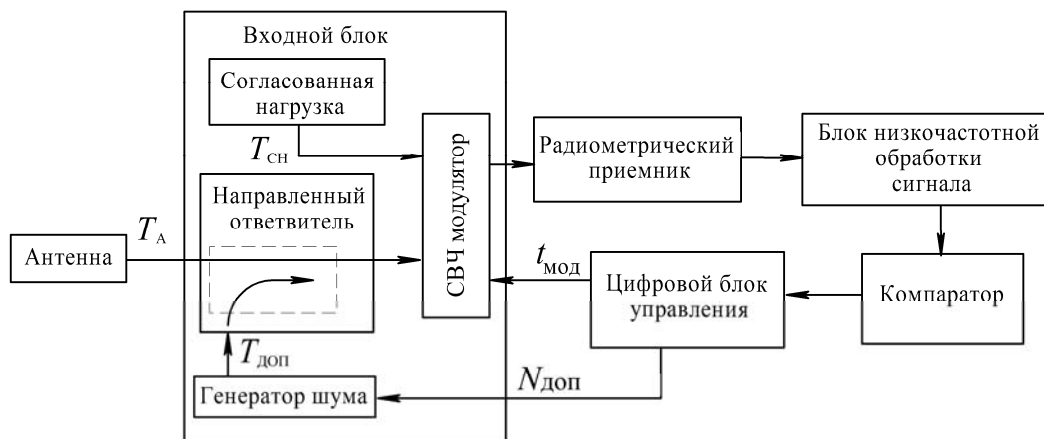


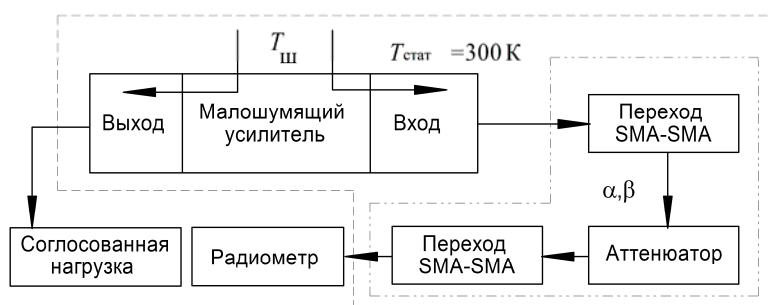
Рис. 2. Структурная схема нулевого радиометра с комбинированной широтно-импульсной модуляцией

На рис. 2 T_A – шумовая температура антенны, $T_{сн}$ – шумовая температура согласованной нагрузки, $T_{доп}$ – шумовая температура генератора шума, $N_{доп}$ – цифровой код, управляющий генератором шума, $t_{мод}$ – управляющий сигнал амплитудной модуляции. Подробно работа устройства описана в [2, 3]. Данная схема позволяет использовать преимущества нулевого метода приема при сохранении высокой линейности передаточной характеристики [4]. Проведенные эксперименты показали высокую линейность передаточной характеристики. Методика эксперимента заключается в построении передаточной характеристики радиометра при подключении на вход источников эталонного шума. Эталонным источником шумового сигнала будем считать малошумящий усилитель, подключенный входом ко входу приемника. Усилитель питается от эталонного источника тока, во

время эксперимента физическая температура усилителя поддерживается при помощи специализированного термостата с тепловым датчиком ADT7310, обеспечивающим разрешающую способность 0.0078 К. Усилитель согласован в рабочей полосе частот с приемником, что обеспечивает отсутствие интерференции.

Для повышения шумовой температуры используется набор аттенюаторов Mini Circuits VAT-2+. При этом аттенюатор с соединительными переходами входит в состав термостатированного объема ($T_{\text{стат}} = 300 \text{ К}$). Аттенюатор подключается между измерительным входом радиометра и входом малошумящего усилителя при помощи переходов «SMA-SMA». Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки



Уточненные значения коэффициента передачи аттенюаторов с соединительными переходами получены при помощи измерителя параметров цепей P2M-18 ЗАО «Микран». Уточненные значения коэффициентов передачи приведены в табл. 1. Измеренные значения считаем равномерными в рабочей полосе частот ($\Delta f = 60 \text{ МГц}$). Повышение шумовой температуры малошумящего усилителя при прохождении через волноведущую часть «переход SMA-SMA – аттенюатор – переход SMA-SMA», равную шумовой температуре на выходе соединительного аттенюатора $T_{\text{АТТ}}$, рассчитаем по формуле (1), приведенной в [1]:

$$T_{\text{АТТ}} = \alpha \cdot T_{\text{ш}} + \beta \cdot T_{\text{ф}}, \tag{1}$$

где α – коэффициент передачи аттенюатора; $T_{\text{ш}}$ – шумовая температура малошумящего усилителя на входе аттенюатора; β – коэффициент ослабления аттенюатора; $T_{\text{ф}}$ – физическая температура аттенюатора, равная температуре термостатированного объема ($T_{\text{стат}} = 300 \text{ К}$). Соответствующие значения шумовой температуры для используемых аттенюаторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Измеренные значения коэффициентов передачи аттенюаторов

Атт. №	Коэффициент передачи, дБ	Коэффициент передачи α	Коэффициент ослабления β	Шумовая температура на входе радиометра $T_{\text{АТТ}}$, К
1	-1,12	0,772	0,228	103,14
2	-2,17	0,606	0,394	145,47
3	-3,2	0,478	0,522	178,11
4	-4,15	0,384	0,616	202,08
5	-5,21	0,301	0,699	223,245
6	-6,12	0,244	0,756	237,78
7	-7,05	0,197	0,803	249,765
8	-8,0	0,158	0,842	259,71

На вход радиометра последовательно подключались эталоны из табл. 1. Результаты измерений представлены в табл. 2. Динамический диапазон системы настроен таким образом, что измерения проводятся от минимального значения $T_{\text{мин}} = 0 \text{ К}$ до значения $T_{\text{макс}} = 300 \text{ К}$. Минимальное значение цифрового кода управляющего счетчика блока управления соответствует максимальной антенной температуре, максимальное значение счетчика соответствует минимальной температуре. В экспериментальном макете максимальное значение цифрового кода равно $N = 4096 = 2^{12}$.

Таблица 2

Измеренные значения коэффициентов передачи аттенюаторов

i	Температура эталона, К	Измеренное значение длительности	Ожидаемое значение	Погрешность ε_i , %
1	45,54	678	621	1,39
2	103,14	1430	1408	0,54
3	145,47	2108	1986	2,98
4	178,11	2483	2431	1,27
5	202,08	2771	2759	0,29
6	223,245	3046	3048	0,05
7	237,78	3193	3246	1,29
8	249,765	3448	3410	0,93
9	259,71	3560	3545	0,37
10	300	4089	4095	0,15

Как видно из табл. 2, относительная погрешность не превышает 3% минимальной в точке № 6 и составляет 0,05%. Характер погрешности, или закон ее изменения из экспериментальных данных, не установлен. При $i=1$ на вход радиометра подключается малошумящий усилитель без аттенюатора, при $i=10$ на вход радиометра подключается согласованная нагрузка.

Среднее значение погрешности нелинейности $\bar{\varepsilon}$ передаточной характеристики вычислим по формуле (2):

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (2)$$

где n – количество точек измерения, ε_i – относительная погрешность измерения i -го измерения. Стандартное отклонение s передаточной характеристики от линейной вычислим по формуле (3).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_i)^2}. \quad (3)$$

Проводя вычисления по формулам (2) и (3), получим: $\bar{\varepsilon} = 0,926\%$, или $\pm 2,77$ К, $s = 0,876\%$, или $\pm 2,62$ К. Для наглядной оценки данные из табл. 2 приведены на рис. 4.

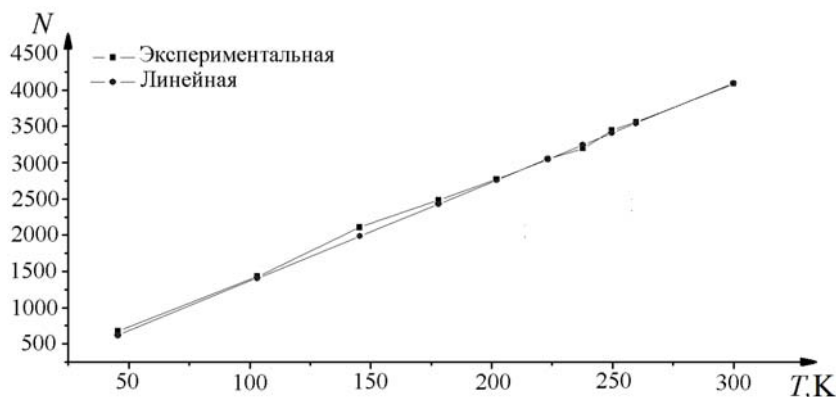


Рис. 4. Сравнение измеренной передаточной характеристики и линейной

Полученные результаты позволяют говорить о том, что нулевые радиометры с комбинированной широтно-импульсной модуляцией не уступают модуляционным радиометрам по линейности передаточной характеристики.

Выводы. Проведенные эксперименты подтверждают инвариантность нулевой радиометрической системы с комбинированной широтно-импульсной модуляцией и цифровым управлением подшумливанием к нелинейности характеристики генератора шума на лавинно-пролетном диоде. В динамическом диапазоне 0...300 К на исследуемом макете радиометра достигнута минимальная погрешность линейаризации передаточной характеристики 0,05% при максимальном значении 2,98%. Из проведенных экспериментов следует, что закон распределения погрешности носит случайный характер. Такое распределение может быть обусловлено ошибками в определении шумовой

температуры эталонов излучения. В исследуемом макете технические параметры блока низкочастотной обработки сигнала выбраны таким образом, что обеспечиваются минимальные искажения вольт-секундной площади в системе исключения постоянной составляющей сигнала, что не оказывает влияния на линейность передаточной характеристики системы.

Выражаю особую признательность д.т.н., профессору кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Александру Владимировичу Филатову за полезное обсуждение материалов рукописи и благодарность творческому коллективу СКБ «Смена» за активное содействие проведенным исследованиям.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.132.21.1432.

Литература

1. Николаев А.Г. Радиотеплокация / А.Г. Николаев, С.В. Перцов. – М.: Сов. радио, 1964. – 326 с.
2. Филатов А.В. Радиометрические системы нулевого метода измерений / А.В. Филатов. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 276 с.
3. Филатов А.В. Метод авторегулирования нулевого баланса в радиометрических системах / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, А.О. Чудинов // *Нелинейный мир*. – 2010. – Т. 8, № 4. – С. 220–233.
4. Филатов А.В. Двухканальный микроволновый радиометр повышенной точности / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, Н.О. Жуков // *Радиотехника*. – 2011. – № 1. – С. 47–55.
5. Филатов А.В. Микроволновый четырехканальный нулевой радиометр 1-диапазона / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, Д.Е. Параев // *Приборы и техника эксперимента*. – 2012. – № 1. – С. 67.

Убайчин Антон Викторович

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа
Тел.: +7-952-883-67-67
Эл. почта: dualog@mail.ru

Ubaychin A.V.

The linearity transfer characteristic of null radiometers with combine pulse modulation at high dynamic range mode

Experimental data of linearity transfer characteristic null radiometers with combine pulse modulation at high dynamic range mode is shown.

Keywords: passive radar, null radiometer, linearity transfer characteristic.
