

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.223

Особенности функционирования СВЧ-радиометров в условиях внешних помех

Сидоров И.А., Гудков А.Г., Чижиков С.В., Леушин В.Ю.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, <https://bmstu.ru/>
Москва 105005, Российская Федерация

E-mail: igorasidorov@yandex.ru, profgudkov@gmail.com, chizikov95@mail.ru, ra3bu@yandex.ru

Поступила 27.05.2023, рецензирована 05.06.2023, принята 13.06. 2023

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Рассматривается влияние внешних помех на чувствительность и динамический диапазон СВЧ-радиометра. Приводятся результаты экспериментального исследования помеховой обстановки в диапазоне до 3 ГГц. Анализируется диаграмма спектральной плотности помех, примыкающих к радиоастрономическим окнам. Исследуются особенности реальных наблюдаемых помех. Приводится классификация возможных помех по их характеристикам. Рассмотрены алгоритмы дискриминации различных видов помех. Оценивается чувствительность и динамический диапазон СВЧ-радиометра при использовании алгоритма подавления импульсных помех.

Ключевые слова: СВЧ-радиотермограф, импульсные помехи, узкополосные помехи, чувствительность радиометра, динамический диапазон

УДК 612.087

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного фонда (проект №19-19-00349П).

Для цитирования: Сидоров И.А., Гудков А.Г., Чижиков С.В., Леушин В.Ю. Особенности функционирования СВЧ-радиометров в условиях внешних помех. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(3):223-234. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.223.

Specific of microwave radiometers operation on the external distortions conditions

Igor A. Sidorov, Alexander G. Gudkov, Sergey V. Chizhikov, Vitaly Yu. Leushin

Bauman Moscow State Technical University, <https://bmstu.ru/>

Moscow 105005, Russian Federation

E-mail: igorasidorov@yandex.ru, profgudkov@gmail.com, chizikov95@mail.ru, ra3bu@yandex.ru

Received May 27, 2023, peer-reviewed June 5, 2023, accepted June 13. 2023

Abstract: The influence of external disturbances on the sensitivity and dynamic range of the microwave radiothermograph is considered. The results of an experimental study of the interference situation in the range up to 3 GHz are presented. The diagram of the spectral density of interference adjacent to radio astronomy windows is analyzed. The features of real observed disturbances are investigated. The classification of possible disturbances according to their characteristics is given. Algorithms for discrimination of various types of interference are considered. The sensitivity and dynamic range of the microwave radiometer are evaluated using the pulse noise suppression algorithm.

Keywords: microwave radiothermography, pulse interference, narrowband interference, radiometer sensitivity, dynamic range

UDC 612.087

Acknowledgments: The study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00349P).

For citation: Igor A. Sidorov, Alexander G. Gudkov, Sergey V. Chizhikov, Vitaly Yu. Leushin. Specific of microwave radiometers operation on the external distortions conditions. *RENSIT: Radioelectronics, Nanosystems, Information Technologies*, 2023, 15(3):223-234e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.223.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (224)
2. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ПОМЕХ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СВЧ-РАДИОМЕТРА (225)
3. АЛГОРИТМ ДИСКРИМИНАЦИИ ВНЕШНИХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ (229)
4. ДИСКУССИЯ (232)
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (233)

ЛИТЕРАТУРА (233)

1. ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-радиометр – это высокочувствительный приемник собственного радиотеплового излучения различных физических тел, сред или космических объектов. СВЧ-радиометры применяются в основном в радиоастрономии [1], при дистанционном зондировании земной поверхности и атмосферы из космоса [2], с борта самолета или беспилотного летательного аппарата [3], а также с различных наземных носителей [4]. Особый интерес представляет применение СВЧ-радиометров в медицине, для неинвазивного измерения внутренней температуры тела человека с целью выявления злокачественных новообразований на ранних стадиях развития, когда их терапия особенно эффективна [5-9]. Зондирование СВЧ-радиометрами человеческого тела одновременно в нескольких частотных диапазонах позволяет визуализировать 3D распределение внутреннего теплового поля человека [10].

Входной сигнал СВЧ-радиометра представляет широкополосный шумовой сигнал – радиотепловое излучение,

спектральная плотность которого описывается известной формулой Планка и законом Планка для излучения абсолютно черного тела. Распределение амплитуд теплового шума подчиняется статистике Гаусса и в полосе приема СВЧ-радиометра имеет практически равномерную спектральную плотность, т.е. представляет белый шум. Для случая низких частот формула Планка сводится к формуле Рэлея-Джинса, согласно которой интенсивность теплового излучения прямо пропорциональна температуре тела. Поэтому интенсивность теплового излучения обычно выражают в единицах температуры – градусах по шкале Кельвина. В градусах Кельвина выражают как входной измеряемый сигнал СВЧ-радиометра, так и чувствительность радиометра, под которой понимается минимально обнаружимый сигнал.

Чувствительность или минимально обнаружимый сигнал идеального (без учета флуктуаций коэффициента усиления СВЧ-усилителя) радиометра полной мощности пропорциональна сумме шумовых температур антенны T_a и первого каскада СВЧ усилителя T_n и обратно пропорциональна радиометрическому выигрышу, представляющему корень квадратный из произведения эквивалентной ширины входной приемной полосы Δf на время накопления, или интегрирования протектированного сигнала τ [1].

$$\delta T = \frac{T_a + T_n}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}}. \quad (1)$$

Чувствительность является важнейшей характеристикой СВЧ-радиометра, наряду с динамическим диапазоном, под которым

понимается отношение максимального неискаженного измеряемого сигнала T_{\max} к величине минимально обнаружимого сигнала δT :

$$D_d = \frac{T_{\max}}{\delta T}. \quad (2)$$

Динамический диапазон D_d – безразмерная величина, которую обычно выражают в децибеллах:

$$D_d [dB] = 10 \lg(D_d). \quad (3)$$

Наличие искусственных или естественных помех в полосе приема СВЧ-радиометра ухудшает чувствительность и динамический диапазон радиометра.

Цель настоящей статьи – оценить влияние искусственных или естественных помех в полосе приема СВЧ-радиометра на чувствительность и динамический диапазон радиометра. А также оценить эти параметры при использовании алгоритмов дискриминации некоторых специальных видов помех, например, помех импульсных или узкополосных.

2. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ПОМЕХ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СВЧ-РАДИОМЕТРА

Под внешними помехами будем понимать любые сигналы естественного или искусственного происхождения, отличные от теплового излучения, попадающие в полосу приема радиометра. К помехам естественного происхождения относится электромагнитное излучение, возникающее при искровых разрядах в атмосфере – молниях. А также излучение, вызванное вспышками на солнце. Под искусственными помехами понимаются любые излучения искусственного происхождения при дуговых разрядах (электросварка), искровых разрядах, например от свечей работающего двигателя внутреннего сгорания, а также любого вида радиопередатчиков, Bluetooth и Wi-Fi устройств и других. Каждый активный или пассивный пользователь радиоэфира

работает в выделенной для него полосе частот. Распределения радиоэфира между пользователями регулируется национальными законодательствами с учетом международных соглашений. Так в Российской Федерации такое распределение определяется таблицей утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 18 сентября 2019 года № 1203-47 "Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации". В соответствии с Таблицей ряд частотных диапазонов выделен для работы пассивных средств, радиометров и радиотелескопов, поэтому эти диапазоны иногда называют "радиоастрономическими окнами". Работа любых активных излучателей в этих диапазонах запрещена. Но выделенные радиоастрономические окна достаточно узки, так в L -диапазоне для радиоастрономии выделены частоты от 1400 до 1427 МГц, то есть всего 27 МГц. Согласно формуле (1) чувствительность радиометра обратно пропорциональна корню квадратному из ширины полосы приема. Поэтому для повышения чувствительности у радиоастрономов есть только два пути повышения чувствительности – уменьшение шумов приемника за счет уменьшения температуры СВЧ-усилителя путем охлаждения до температуры жидкого гелия, путем применения специальной криогенной техники, или увеличения времени накопления. Для радиометров дистанционного зондирования земли с беспилотных летательных аппаратов применение криогенной техники и увеличение времени накопления неприемлемы. Остается расширять приемную полосу, но при этом неизбежно в полосу приема радиометра попадут помехи, созданные активными средствами. Кроме

того, выделенные радиоастрономические окна постоянно сужаются. Так в С-диапазоне совсем недавно было радиоастрономическое окно шириной более 200 МГц. Согласно последней редакции "Таблицы распределения полос радиочастот..." от 200 МГц осталось только 10 МГц от 4990 до 5000 МГц. Освободившиеся частоты отдали для тестирования средств связи по стандарту 5G. Так что радиометры, изготовленные до 2019 года для С-диапазона, теперь работают в условиях помех. Для медицинских радиометров – радиотермографов ситуация с внешними помехами еще хуже. Так для получения информации о тепловых полях тела человека на глубине до 7-10 см. необходимо работать в диапазоне 700 МГц с шириной полосы порядка 200 МГц. В данном диапазоне нет свободных от помех полос. Проблема решается при помощи пассивных средств защиты от помех либо применением специальных помехозащищенных антенн-аппликаторов, либо проведением анализов в специальных экранированных камерах со степенью экранировки более 60 дБ. Следует отметить, что стоимость экранированной камеры почти на порядок превышает стоимость самого радиотермографа. Кроме того, возникают проблемы при ее размещении, сборке и обслуживании, что ограничивает применимость метода. Но даже перечисленных средств бывает недостаточно, кроме того, применение экранированных камер неприемлемо как в радиоастрономии, так и при дистанционном радиометрическом зондировании. Поэтому весьма актуальной становится задача поиска алгоритмов и методик работы радиометров в условиях внешних помех.

Для поиска эффективных алгоритмов работы радиометров в условиях помех необходимо исследовать, с какими именно помехами имеем дело на практике. Для исследования распределения помех по частотам в радиоэфире в диапазоне до 4 ГГц

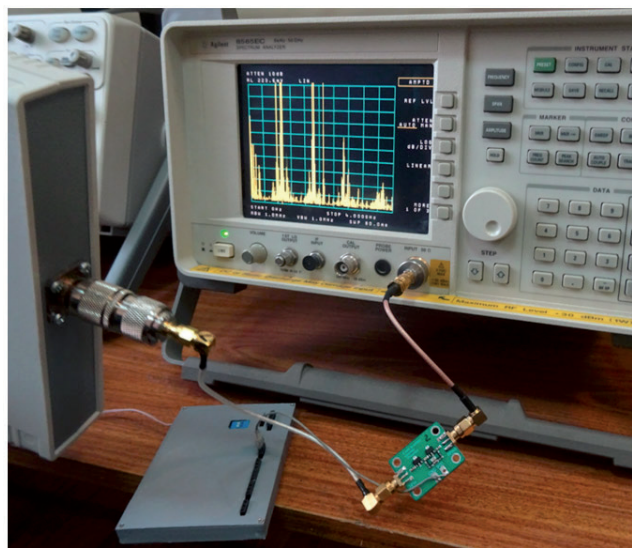


Рис.1. Регистрация спектра помех.

был проведен эксперимент, схема которого показана на Рис. 1.

Сигнал с широкополосной антенны усиливался на 40 дБ малошумящим широкополосным усилителем и подавался на анализатор спектра. Спектрограмма помех представлена на Рис. 2.

Анализ спектрограммы показывает, что весь эфир в диапазоне довольно плотно заполнен помехами (сигналами активных средств). Небольшое окно наблюдается в L-диапазоне и особенно сильные помехи в диапазонах 900 и 1800 МГц – помехи от

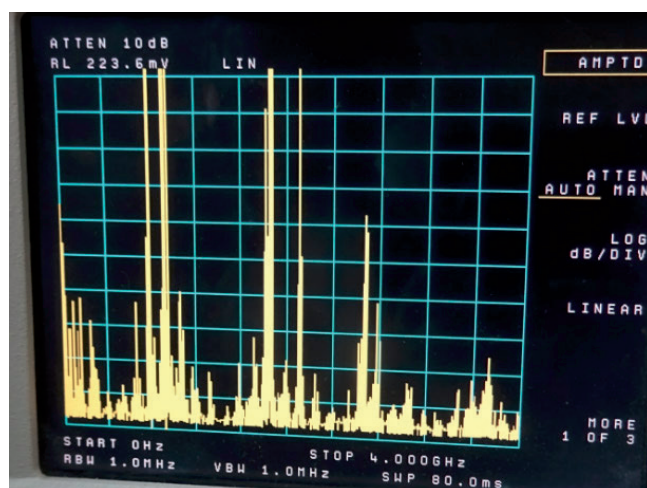


Рис. 2. Спектрограмма помех в диапазоне от 0 до 4 ГГц.

сотовых сетей GSM. Из-за того, что между помехами практически нет свободных промежутков, применение режекторных фильтров для фильтрации помех будет неэффективным. Применение известных алгоритмов подавления помех путем цифровой фильтрации помех также будет неэффективным.

Для исследования характеристик помех во временной области использовался СВЧ-радиометр с двухпорной модуляцией С-диапазона. Схема такого радиометра известна и опубликована [11]. Сигнал с выхода квадратичного детектора подавался на первый канал двухканального осциллографа, на второй канал подавался сигнал управления модуляцией, от которого осуществлялась синхронизация осциллографа. Антенна радиометра либо направлялась в небо для проверки наличия и записи помех, либо закрывалась поглощающим материалом для регистрации шумовой дорожки в отсутствие помех. Одновременно записывался выходной сигнал радиометра после синхронного фильтра и синхронного детектора при времени накопления в одну секунду.

Вид шумовой дорожки (осциллограммы шумового сигнала на выходе квадратичного детектора) в отсутствие внешних помех показан на Рис. 3. На фоне шумовой

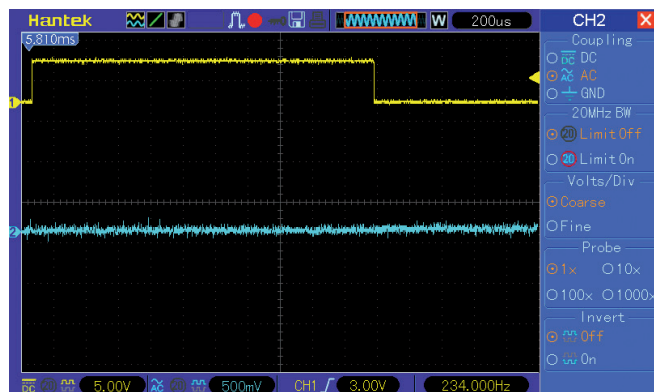


Рис. 3. Вид шумовой дорожки в отсутствие внешних помех.

дорожки показан сигнал управления модуляцией. Шумовой сигнал представляет нормально распределенный случайный процесс. Функция распределения случайного процесса описывается формулой Гаусса:

$$f(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(U-U_m)^2}{4\sigma^2}}, \quad (4)$$

где U_m – среднее значение сигнала или математическое ожидание, σ – среднеквадратичное отклонение или дисперсия.

Функция реализации сигнала U , представленная на Рис. 3, представляет зависимость напряжения от времени. Напряжение измеряется в единицах вольт, но может быть пересчитано с градусы по шкале Кельвина благодаря наличию в схеме радиометра двух внутренних эталонных нагрузок с различными и известными температурами. Известно, что 99.7% отсчетов нормально распределенного сигнала укладывается в диапазон $\pm 3\sigma$. Величину шумовой дорожки, представленной на Рис. 3, можно приблизительно оценить величиной в 200 мВ, что соответствует шумовой температуре приблизительно 600 К.

Вид соответствующего Рис. 3 выходного сигнала радиометра представлен копией экрана программы цифровой обработки, получен после интегрирования сигнала в течение одной секунды и представлен на Рис. 4.

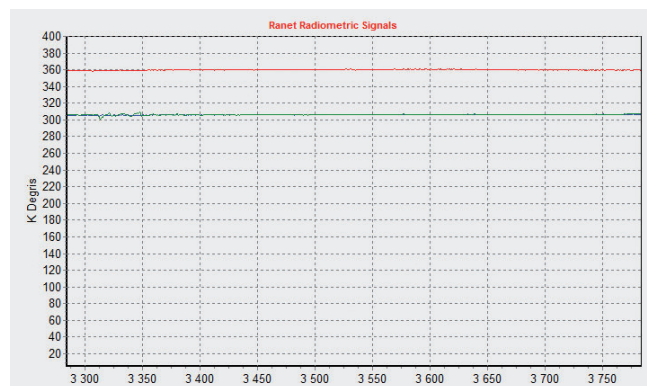


Рис. 4. Вид выходного сигнала радиометра после секундного накопления.

На Рис. 4 представлены графики трех величин. Верхняя прямая красного цвета представляет график значений "горячей" эталонной нагрузки, подогретой на 50 градусов по отношению к "холодной" нагрузке, которая имеет температуру, равную температуре окружающей среды. Температура "черного" тела, закрывавшего антенну от помех, равна температуре "холодной" нагрузки. Поэтому их графики на Рис.4 практически совпадают на уровне 305К. В масштабе графика флюктуации выходного сигнала незаметны, поскольку не превышают 1К.

Наличие внешних помех существенно меняют картину. Поскольку мощность естественных радиотепловых сигналов чрезвычайно мала (порядка -60 дБ), требуется малошумящий СВЧ-усилитель с большим коэффициентом усиления (порядка 80 дБ при полосе приема 50 МГц), чтобы усиленные шумы существенно превосходили бы собственные шумы детектора мощности. При таком усилении практически любой внешний искусственный сигнал превосходит по величине шумовую дорожку теплового излучения, представленную на Рис. 3. Сигнал внешней помехи в худшем случае может перегрузить усилитель первого каскада, когда амплитуда усиленного сигнала помехи достигнет максимального значения выходного сигнала усилителя. В

этом случае говорить о чувствительности радиометра нет смысла. Работать в условиях столь больших помех невозможно. Но на практике часто возникают ситуации, когда насыщение СВЧ-усилителя не наступает, хотя помеха превосходит по величине величину шумовой дорожки. Пример протектированного сигнала в таких условиях представлен на осциллограмме Рис. 5.

Вид выходного сигнала радиометра при наличии внешней помехи представлен на Рис. 6.

Диапазон флюктуаций выходного сигнала в условиях внешних помех превышает 300К. В этом случае минимально обнаружимый сигнал определяется не столько параметрами радиометра, сколько параметрами помехи.

Анализ сигнала, представленного на Рис. 5, показывает, что помеха – это не непрерывный сигнал, а непериодическая последовательности коротких импульсов различной амплитуды. Коротким будем считать импульс помехи, если его длительность меньше периода дискретизации протектированного сигнала. В этом случае помеха попадает только в один отсчет АЦП. Такого вида помехи характерны для некоторых цифровых видов связи и радиолокаторов различного назначения. Если импульсные помехи как на Рис. 5 принимаются непрерывно на протяжении

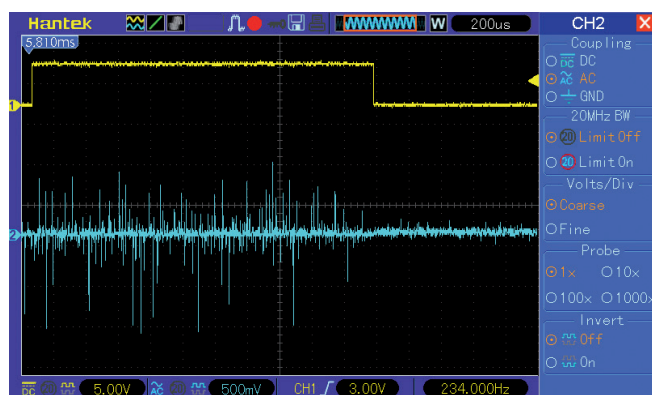


Рис. 5. Вид внешней помехи на выходе квадратичного детектора.

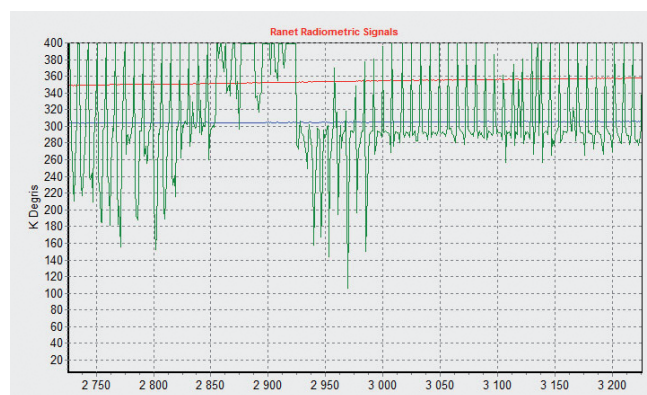


Рис. 6. Выходной сигнал радиометра в условиях внешних помех.

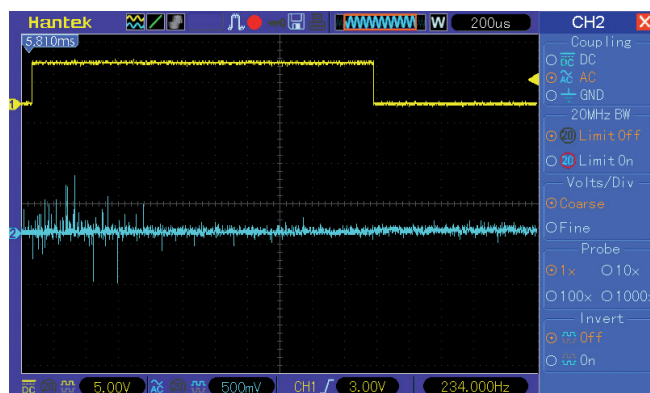


Рис. 7. Пример короткой импульсной помехи.

всего времени накопления сигнала, то учесть их влияние и по возможности устранить его весьма сложно. Возможно это тема будущих исследований. Если помеха принимается лишь часть времени накопления сигнала, то можно предложить алгоритмы выявления, учета и подавления помех данного типа. Пример короткой импульсной помехи представлен на Рис. 7.

Следует отметить, что на практике встречаются не только короткие импульсные помехи, но и более длительные, например как на Рис. 8. Такого типа помехи вероятно тоже можно учесть и подавить, но это тема отдельного исследования.

3. АЛГОРИТМ ДИСКРИМИНАЦИИ ВНЕШНИХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

Как было отмечено выше поиск эффективных методов и алгоритмов работы СВЧ-радиометров в условиях внешних помех – актуальная задача. Ей посвящены диссертации и многочисленные статьи

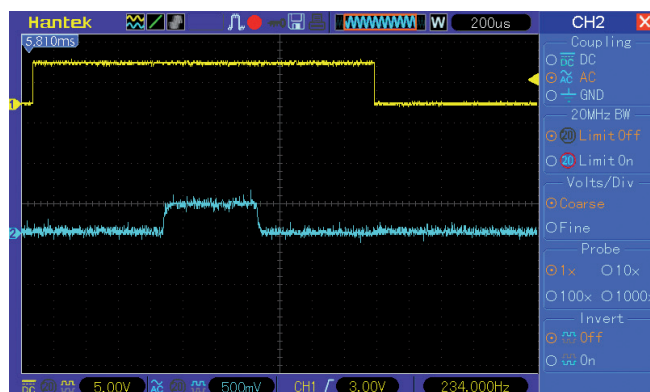


Рис. 8. Пример длинной импульсной помехи.

(например [12]). Но задача столь сложна и многогранна, что общего решения не найдено до сих пор. Ниже рассматривается алгоритм учета влияния внешних помех для частного случая импульсных не непрерывных внешних помех. Алгоритм предполагает выявление наличия внешней помехи, отсеивание отсчетов, содержащих импульсную помеху, дальнейшую обработку оставшихся отсчетов для вычисления антенной температуры. Следует отметить, что для применения алгоритма необходимо иметь зарегистрированные отсчеты сигнала с выхода детектора хотя бы в течение одной секунды. Реализация алгоритма возможна в двух вариантах: в псевдореальном масштабе времени и с постэкспериментальной обработкой зарегистрированного сигнала.

Последетекторная обработка сигнала радиометра предполагает интегрирование аналогового сигнала в течение достаточно длительного по сравнению с периодом модуляции времени или суммирование дискретных цифровых отсчетов после преобразования аналогового сигнала в цифровую форму. При суммировании N независимых отсчетов дисперсия нормального случайного процесса уменьшается в корень квадратный из N раз. Собственно радиометрический выигрыш, представленный знаменателем формулы (1) и есть корень квадратный из числа независимых отсчетов сигнала, в соответствии с теоремой В.А. Котельникова, с точностью до постоянного коэффициента 2.

После суммирования отсчетов невозможно выделить из суммы отсчеты, содержащие помеху. Поэтому алгоритм необходимо применить до интегрирования (суммирования) сигнала. Для этого надо запомнить все отсчеты за время накопления. Темп поступления отсчетов определяется полосой протектированного сигнала.

Обычно она не превышает 50 КГц. Тогда частота дискретизации составит 100 КГц (в соответствии с теоремой В.А. Котельникова), и период дискретизации 10 микросекунд. Модуляционный радиометр с меандровой модуляцией только половину времени периода модуляции принимает сигнал от антенны, а вторую половину сигналы от внутренних эталонов. Запоминать надо только отсчеты сигнала от антенны, поскольку сигналы эталонов не содержат внешних помех и могут накапливаться по известному алгоритму. Обычно развязка между антенным каналом и каналами эталонов определяется качеством СВЧ-модулятора и превосходит 20 дБ. Если же помеха столь велика, что проникает в каналы эталонов, то в канале антенны СВЧ-усилитель точно будет перегружен, и, как отмечалось выше, в этом случае алгоритмы подавления помех не эффективны.

Предлагаемый алгоритм дискриминации помехи на первом этапе предполагает определение параметров сигнала – среднего значения и дисперсии, за определенный небольшой период времени (до 0.1 периода модуляции) при отсутствии помехи. Наличие помехи определяется по присутствию отсчетов, величина которых отклоняется от среднего значения на величину утроенной дисперсии. Если это условие не выполняется, то берутся другие отсчеты за такой же промежуток времени. Если нужного "эталонного" промежутка не удалось обнаружить, то алгоритм неприменим в данной ситуации.

На втором этапе выявляются во всем промежутке накопления сигнала отсчеты, величина которых отклоняется от среднего значения на величину утроенной дисперсии и больше (среднее значение и дисперсия определены на первом этапе). Далее все выявленные отсчеты исключаются из массива данных.

На третьем этапе производится суммирование (усреднение) оставшихся в массиве отсчетов.

Следует отметить, что после применения алгоритма чувствительность радиометра (и соответственно динамический диапазон) несколько ухудшится вследствие уменьшения количества суммируемых за время накопления независимых отсчетов сигнала. Ухудшение тем больше, чем больше количество отсчетов с помехами (чем больше интенсивность помехи). Но это ухудшение все равно меньше, чем ухудшение чувствительности при наличии помехи и без применения алгоритма.

Блок схема алгоритма дискриминации внешней импульсной помехи представлена на Рис. 9.

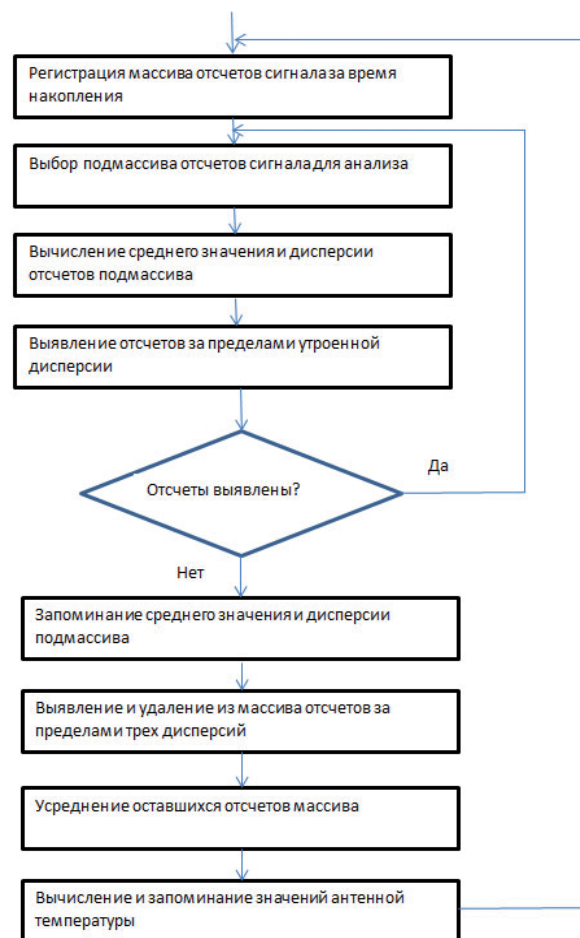


Рис. 9. Алгоритм дискриминации внешних импульсных помех.

В случае неприменимости данного алгоритма предложены два метода, работающие при постоянном наличии помехами.

Первый метод основан на итерационном подавлении помех. Для проверки эффективности алгоритма была разработана специальная программа и на ее основе проведено компьютерное моделирование процесса фильтрации помех. В качестве исходных данных использовался массив данных с параметрами, близкими к параметрам шумового сигнала на выходе квадратичного детектора радиометра с полосой частот около 50 кГц. Период модуляции состоит из четырех интервалов по 256 отсчетов. Период дискретизации 10 мкс. Среднее значение смоделированного сигнала бралось на уровне 300 градусов Кельвина, а дисперсия на уровне 10 градусов. К сгенерированному массиву данных подмешивался дополнительный шумовой процесс, имитирующий импульсную помеху с параметрами: среднее значение (математическое ожидание) на уровне 300 градусов Кельвина и дисперсия 100 градусов. Вводился параметр, характеризующий интенсивность помех, численно равный количеству импульсов помехи (отсчетов) на один период модуляции 256 отсчетов. Сгенерированные данные для параметра 50 импульсов помехи на период модуляции представлены на графике **Рис. 10**, которые похожи на реальные записанные данные, показанные на Рис. 7. Для вычисления

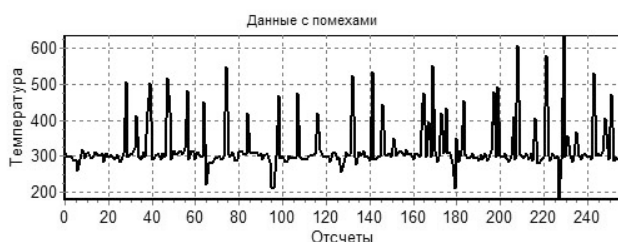


Рис. 10. Сгенерированные данные с импульсными помехами.

математического ожидания и дисперсии применялись разные алгоритмы. Наиболее эффективным оказался итерационный алгоритм, при котором:

1. Вычисляется среднее M и дисперсия D по 256 отсчетам.
2. Выявляются значения сигнала a_i , для которых $|a_i - M| > kD$ заменяются на M .
3. Проверка достижения D заданного значения.
4. Переход к шагу 1, если значение не достигнуто.

Расчеты показывают, что наилучший результат достигается при $k = 3$.

При добавлении импульсов шума к исходному сигналу изменяются значения математического ожидания и дисперсии шумового процесса. При вычислении итераций по представленному алгоритму после 3-4 итераций значения математического ожидания и дисперсии шумового процесса возвращаются к заданным значениям. Графики зависимости значения математического ожидания и дисперсии шумового процесса от числа итераций представлены на **Рис. 11**.

Как видно из графиков помеха почти полностью отфильтрована за пять итераций.

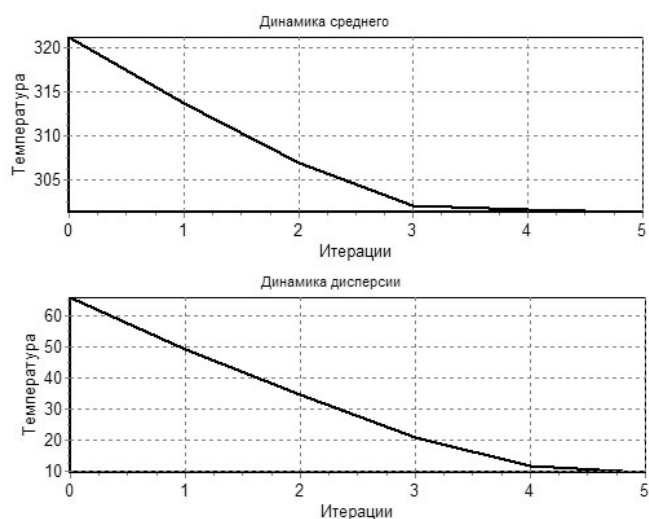


Рис. 11. Динамика изменения среднего значения и дисперсии.

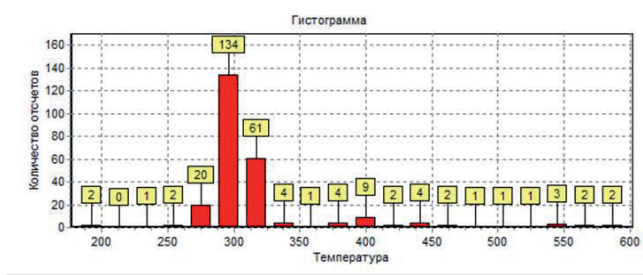


Рис. 12. Гистограмма данных.

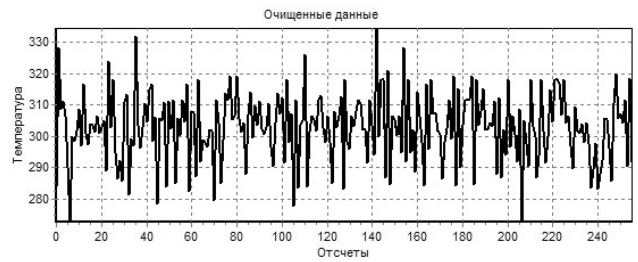


Рис. 13. Данные, очищенные от помех.

Конечно, количество необходимых итераций зависит от интенсивности помехи.

Другой алгоритм строится на основе анализа гистограммы выборки, что приводит к разделению данных с помехами и без помех.

1. Строится гистограмма данных. (Рис. 12)

Как и следовало ожидать, наибольшее число данных скопилось в ячейке, которая соответствует реальным данным без помех. Видно, что в этой ячейке скопилось 134 значения из 256.

- 2. Отбираются эти данные и рассчитывается среднее значение и дисперсия.
- 3. Этот набор дополняем теми данными a_i , для которых $|a_i - M| < kD$.

Из Таблицы 1 следует, что количество значений полезного сигнала выросло до 190. Если учесть, что по параметрам модели было заменено помехами только 50 точек, то можно сделать вывод, что эти точки были удалены. Их можно заменить средним значением.

Вид сигнала, с отфильтрованными помехами представлен на Рис. 13.

Секундная чувствительность – чувствительность радиометра при времени накопления сигнала в одну секунду, является одним из основных параметров радиометра определяющим точность

измерений и динамический диапазон. Для параметров сигнала в рассмотренной модели секундная чувствительность при условии отсутствия помех составила бы 0.3 градуса. А при наличии импульсной помехи с указанными выше параметрами чувствительность ухудшилась бы в 10 раз – до 3 градусов. Соответственно в 10 раз ухудшится и динамический диапазон. При использовании предложенных алгоритмов подавления помехи чувствительность улучшится, но не достигнет значения, полученного для сигнала без помехи. Ухудшение чувствительности в этом случае связано не с увеличением эквивалентной шумовой температуры сигнала, а с уменьшением количества независимых отсчетов сигнала, так как часть отсчетов была удалена или заменена константой в результате применения алгоритмов. В рассматриваемом случае чувствительность после фильтрации помех составит 0.37 градуса. Ухудшение составит 23% и это существенно лучше, чем, если бы помеха не отфильтровывалась. При этом динамический диапазон уменьшится с 43 дБ до 42 дБ. При наличии помехи и без применения алгоритмов подавления помехи динамический диапазон уменьшился бы до 33 дБ. Конечно, ухудшение чувствительности и динамического диапазона зависит от интенсивности помех.

Таблица 1

Полезный сигнал

Шаги	Количество	Среднее	Дисперсия
1	256	318.8793	58.2905
2	134	297.9854	5.7277
3	190	299.5555	8.3838

4. ДИСКУССИЯ

Полученные экспериментальные спектрограммы и осциллограммы сигнала

с импульсными помехами, а также результаты моделирования алгоритмов фильтрации помех позволяют надеяться на практическую возможность работы в условиях внешних импульсных помех. Представленные алгоритмы фильтрации помех требуют проверки на реальной аппаратуре в реальных условиях. Для решения этой задачи требуется преобразовать в цифровую форму аналоговый сигнал с выхода квадратичного детектора радиометра с частотой выборок порядка 100 кГц и сохранения данных в энергонезависимой памяти. Дальнейшая обработка проводится в персональном компьютере под управлением специализированной программы. В настоящей статье рассматриваются помехи, принимаемые специализированной аппаратурой медицинского радиотермографа, и в ней не рассматриваются классические методы борьбы с импульсными помехами (например, метод медиан).

В настоящее время проведенные исследования показали перспективность данных алгоритмов. Однако, использование алгоритмов требует проведения дополнительных исследований, в том числе экспериментальных, с последующим внедрением их в программы обработки данных аппаратной части радиотермографа. В случае успешного внедрения новых устройств и алгоритмов в аппаратуру медицинских радиотермографов появится возможность проведения медицинских анализов и процедур в обычном кабинете без использования специальной экранированной камеры, стоимость которой существенно превышает стоимость самого радиотермографа. Благодаря чему метод микроволновой радиотермографии станет более доступным и распространенным.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований, расчётов и моделирования получены следующие новые результаты:

- получены осциллограммы реальных внешних импульсных помех СВЧ-радиометра в С-диапазоне;
- произведен анализ работы СВЧ-радиометра в условиях импульсных помех;
- произведена оценка влияния внешних импульсных помех на чувствительность и динамический диапазон СВЧ-радиометра;
- предложен алгоритм выявления, учета и дискриминации импульсных помех;
- произведена оценка чувствительности и динамического диапазона СВЧ-радиометра с учетом подавления внешних импульсных помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Есепкина НА, Корольков ДВ, Парийский ЮН. *Радиотелескопы и радиометры*. М., Наука, 1973, 416 с.
2. Kerr YH, Waldteufel P, Wigneron, J-P, Martinuzzi J-M, Font J, Berger M. Soil moisture retrieval from space: The soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, 39(8):1729-1735; doi: 10.1109/36.942551.
3. Вербя ВС, Гуляев ЮВ, Шутко АМ, Плющев ВА, Сидоров ИА, Никитов СА и др. (всего 45 авторов). *СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике*. София, Акад. изд-во им. проф. Марина Дринова, 2013, 296 с. ISBN 978-954-322-708-2.
4. Сидоров ИА, Гудков АГ, Обливанцов ВВ, Ермолов ПП, Новичихин ЕП, Леушин ВЮ, Агандеев РВ. Радиометрическое дистанционное определение портретов влажности почвы на винограднике

- в Крыму. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2022, 27(5):65-70. DOI: 10.18127/j15604128-202205-09.
5. Новичихин ЕП, Сидоров ИА, Леушин ВЮ, Агасиева СВ, Чижиков СВ. Обнаружение локального источника тепла в глубине тела человека методом объемной радиотермографии. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2020, 12(2):305-312. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.305.
 6. Ahmed M Hassan, Magda El-Shenawee. Review of Electromagnetic Techniques for Breast Cancer Detection. *IEEE Reviews in biomedical engineering*, 2011, 4:103-118. DOI: 10.1109/RBME.2011.2169780.
 7. Vesnin S, Turnbull AK Dixon JM, Goryanin I. Modern Microwave Thermometry for Breast Cancer. *J. Mol. Imaging Dyn.*, 2017, 7(2):136-141. DOI: 10.4172/2155-9937.1000136.
 8. Gudkov AG; Leushin VY, Sidorov IA, Vesnin SG, Porokhov IO, Sedankin MK, Agasieva SV, Chizhikov SV, Gorlacheva EN, Lazarenko MI et al. Use of Multichannel Microwave Radiometry for Functional Diagnostics of the Brain. *Biomed. Eng.*, 2019, 53:108-111.
 9. Sedankin M, Chupina D, Vesnin S, Nelin I, Skuratov V. Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature. *East. Eur. J. Enterp. Technol.*, 2018, 3:26-36.
 10. Sidorov IA, Gudkov AG, Leushin VY, Gorlacheva EN, Novichikhin EP, Agasieva SV. Measurement and 3D Visualization of the Human Internal Heat Field by Means of Microwave Radiometry. *Sensors*, 2021, 21:4005, doi: 10.3390/s21124005.
 11. Sidorov IA, Gudkov AG, Agasieva SV, Khokhlov NF, Chernikov AS, Vagapov Y. A portable microwave radiometer for proximal measurement of soil permittivity. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022, 198(2):107076. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107076.
 12. Федосеева ЕВ, Шукин ГГ, Ростокин ИН, Ростоккина ЕА. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2014, 1(13):50-62.
- Сидоров Игорь Александрович**
к.т.н., доцент
Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана
2-я Бауманская ул., Москва 105005, Россия
igorasidorov@yandex.ru
- Гудков Александр Григорьевич**
д.т.н., профессор
Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана
2-я Бауманская ул., Москва 105005, Россия
profgudkov@gmail.com
- Чижиков Сергей Владимирович**
аспирант
Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана
2-я Бауманская ул., Москва 105005, Россия
chigikov95@mail.ru
- Леушин Виталий Юрьевич**
к.т.н.
Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана
2-я Бауманская ул., Москва 105005, Россия
ra3bu@yandex.ru.