

УДК 621.317.39.084.2

РЕАЛИЗАЦИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КАНАЛА В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСА МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОСТОЯННЫХ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

В. Н. Иконников, В. А. Канаков, Д. В. Савельев*

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, Россия

В статье рассмотрена проблема реализации радиометрического канала в составе комплекса микроволнового зондирования при наличии постоянных внутрисистемных узкополосных помех. Предложена методика калибровки радиометрического канала и обработки сигнала радиометра. Приведены результаты эксперимента по определению зависимостей калибровочных коэффициентов радиометрического канала от амплитуды квазигармонической помехи.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается тенденция к объединению систем микроволнового дистанционного зондирования в многофункциональные комплексы, предназначенные для решения сложных задач, требующих синхронного получения информации о целом ряде независимых параметров исследуемого объекта. В состав таких комплексов могут входить несколько радиометрических каналов, каналы активного зондирования и т. д. [1–3]. При этом становятся всё более важными проблемы, связанные с электромагнитной совместимостью, в первую очередь за счёт значительного увеличения внутрисистемных помех. В частности, в полосу приёма радиометрического канала могут попадать узкополосные помехи от передатчиков и гетеродинов соседних каналов и их комбинации.

Наличие на входе приёмника радиометрического канала целого набора узкополосных мешающих сигналов, в том числе и в полосе приёма, существенно влияет на параметры приёмника. В частности, шумовая температура приёмника и его коэффициент преобразования входного шумового сигнала в сигнал на промежуточной частоте оказываются зависящими от амплитуды мощной квазигармонической внутрисистемной помехи. При этом для сохранения функциональных возможностей радиометрического канала требуется непрерывный контроль этих параметров.

Исследованию нелинейных эффектов, сопровождающих прохождение сигнала большой мощностью (или смеси сигнала и помехи) по приёмному тракту, посвящено достаточно много работ. Подробно исследованы явления перегрузки усилительных устройств [4], перекрёстные искажения и явление интермодуляции [5], вопросы образования комбинационных частот [6], явление подавления слабого сигнала в детекторе [7], проведён анализ взаимной модуляции в полупроводниковом смесителе [8–10], эффекты потери чувствительности в приёмном тракте [11–14] и т. д.

Разработанные к настоящему времени технические методы и способы борьбы с мощными помехами можно свести к двум основным направлениям.

Первый путь включает в себя различные способы по недопущению воздействия помехи на приёмное устройство (или существенного ослабления уровня мешающего сигнала). Для предотвращения попадания мощной помехи на вход приёмного устройства используются различного рода преселекторы [15], компенсационные схемы [16] и схемы быстрой перестройки частоты [17].

* ikonnikovvn@gmail.com

Второй путь заключается в соответствующей обработке в самом приёмном устройстве входной смеси с целью наилучшего выделения полезной информации. В этом случае, как правило, решается задача расширения динамического диапазона усилительного устройства и последующей компенсации помехи, находящейся в аддитивной смеси с сигналом [17].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим радиометрический канал, имеющий структуру, представленную на рис. 1. В его состав входят: волноведущий тракт с антенной, преобразователь частоты и высокоскоростной аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), предназначенный для регистрации сигнала на промежуточной частоте. Преобразователь частоты состоит из гетеродина (Γ), балансного смесителя и усилителя промежуточной частоты (УПЧ).

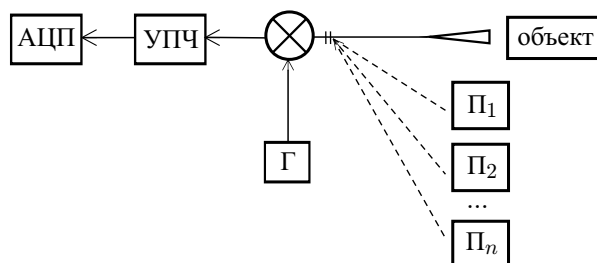


Рис. 1. Структурная схема радиометрического канала

На преобразователь частоты радиометрического канала непосредственно через сигнальный вход или по внутренним цепям комплекса поступают помехи $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$, источниками которых являются гетеродины и передатчики соседних каналов комплекса.

Рассмотрим особенности спектра сигнала радиометра, зарегистрированного на промежуточной частоте. Пример такого спектра, зарегистрированного в реальном комплексе микроволнового зондирования, представлен на рис. 2. В полосе частот от 0 до 700 МГц наблюдается аномально высокий широкополосный шум, связанный с конструктивными особенностями балансного смесителя. Эта область спектра не пригодна для измерения мощности шума внешнего источника (исследуемого объекта). В полосе частот от 0,7 до 2,2 ГГц имеет место плато, которое соответствует шуму на входе радиометра, усиленному усилителем промежуточной частоты. Эта область спектра пригодна для измерения мощности шумов внешних источников. Таким образом, полоса анализа составляет 1,5 ГГц. Далее, на частотах свыше 2,2 ГГц имеет место линейный спад спектральной плотности мощности шума, определяемый амплитудно-частотной характеристикой

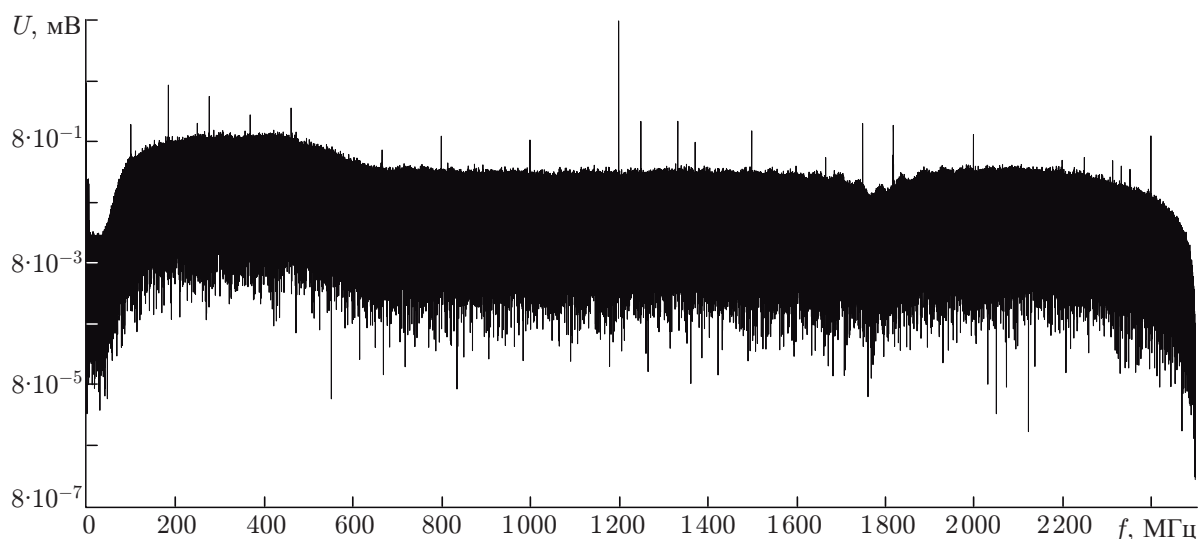


Рис. 2. Спектр сигнала радиометра

входного усилителя регистратора.

Другой важной особенностью спектра сигнала радиометрического канала является наличие довольно мощных дискретных компонент в количестве от 20 до 50. Они соответствуют комбинационным частотам, которые возникают при нелинейном преобразовании суммы сигнала и внутренних помех в смесителе приёмного устройства. Наиболее мощная дискретная компонента имеет частоту 1,2 ГГц и соответствует квазигармонической помехе со стороны мешающего генератора в составе комплекса.

Таким образом, для устранения широкополосной шумовой помехи алгоритм обработки сигналов радиометрического канала должен содержать процедуру линейной фильтрации сигнала, в результате которой из полного спектра зарегистрированного сигнала должна выделяться полоса частот, пригодная для измерения мощности источников внешних шумов. Для подавления дискретных компонент требуется проводить нелинейную фильтрацию принятого сигнала в частотной области представления сигнала по признаку значительного превышения комбинационными гармониками среднего уровня шума.

Определение яркостной температуры объекта T будем выполнять в частотной области путём усреднения отсчётов спектральной плотности мощности сигнала на промежуточной частоте S_i , где i — номер отсчёта. При сохранении линейного по входному шумовому сигналу режима работы радиометрического канала они связаны соотношением $T = kx - b$, где $x = \overline{S_i}$, черта сверху обозначает усреднение по всем отсчётам.

Для калибровки радиометрического канала необходимо найти аддитивную компоненту b , определяемую собственным шумом приёмного устройства, и мультипликативную компоненту k , которая определяется коэффициентом преобразования приёмника. При этом следует учитывать нелинейность характеристик приёмника по шумовому входному сигналу относительно амплитуды мощной квазигармонической помехи со стороны мешающего генератора U_a . Таким образом, задачей калибровки является определение зависимостей $k(U_a)$ и $b(U_a)$.

2. КАЛИБРОВКА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

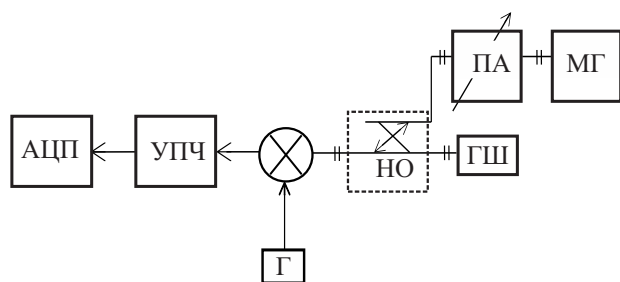


Рис. 3. Схема калибровки радиометрического канала

Схема калибровки радиометрического канала представлена на рис. 3. К входу радиометрического канала подключена волноведущая система с направленным ответвителем (НО). К одному из плеч НО подключён калиброванный полупроводниковый генератор шума (ГШ) с известной эквивалентной шумовой температурой $T_{\text{он}}$ во включённом состоянии и $T_{\text{оф}} = 290$ К в выключенном. Другое плечо НО подключено к выходу мешающего генератора через переменный аттенюатор (ПА).

Первоначально аттенюатор полностью открыт. Далее ослабление вводится так, чтобы амплитуда квазигармонической помехи U_a достигла уровня $U_{a \text{ max}}$, соответствующего исчезновению нелинейных искажений в форме сигнала помехи. Далее фиксированные уровни ослабления выбираются такими, чтобы получать ряд значений U_a от максимального $U_{a \text{ max}}$ до $0,01U_{a \text{ max}}$. Для каждого выбранного значения ослабления дважды производится регистрация сигнала на промежуточной частоте: с включённым и выключенным генератором шума.

По отсчётам сигнала, соответствующим отрезкам времени, когда генератор шума выключен, определяются значения амплитуды спектральной компоненты квазигармонической помехи

в каждой из групп с разными значениями ослабления сигнала помехи: средние значения и среднеквадратическое отклонение (U_{aj} и ΔU_{aj}), где j — номер группы с фиксированным значением ослабления сигнала помехи.

Каждый отрезок сигнала разбивается на интервалы, длительность τ которых определяется требуемым временным разрешением радиометрического канала. Эти интервалы далее обрабатываются по следующей схеме:

- 1) вычисляются спектры мощности зарегистрированных последовательностей с длительностью τ ;
- 2) выполняется линейная фильтрация: все отсчёты спектров вне полосы от 0,7 до 2,2 ГГц приравняются к нулю;
- 3) выполняется нелинейная фильтрация: пятьдесят самых мощных спектральных компонент в спектре сигнала приравняются к нулю;
- 4) вычисляются средние значения оставшихся спектральных компонент m_{onj} и m_{offj} по отдельности для каждого j -го уровня ослабления сигнала при включённом и выключенном генераторе шума.

Далее, по известным значениям T_{off} , T_{on} и полученным оценкам m_{onj} и m_{offj} калибровочные константы как функции амплитуды квазигармонической помехи $k(U_{ai})$ и $b(U_{ai})$, где i — номер временного интервала, рассчитываются по формулам

$$k = \frac{T_{on} - T_{off}}{m_{on} - m_{off}}, \quad b = \frac{m_{off}T_{on} - m_{on}T_{off}}{m_{on} - m_{off}}.$$

Полученные значения представляются в виде таблицы. По табличному заданию функций вычисляются аппроксимирующие полиномы третьего порядка $k(U_a)$ и $b(U_a)$.

Далее выполняется обработка измерительной информации, полученной в процессе зондирования исследуемого объекта.

На интересующем временном интервале, занятом измерительной информацией, регистрируется амплитуда квазигармонической помехи (U_{ai}) и с помощью аппроксимирующих полиномов $k(U_a)$ и $b(U_a)$ вычисляются калибровочные коэффициенты $k(U_{ai})$ и $b(U_{ai})$.

Каждый интервал сигнала с длительностью τ подвергается описанной выше процедуре вычисления спектра мощности, линейной и нелинейной фильтрации и нахождения средних значений оставшихся спектральных компонент m_{xi} .

Далее определяются значения яркостной температуры исследуемого объекта по формуле

$$T_{xi} = k(U_{ai})m_{xi} - b(U_{ai}).$$

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки возможности реализации радиометрического канала при наличии внутрисистемных узкополосных помех была проведена серия лабораторных экспериментов по определению зависимости калибровочных констант радиометрического канала от амплитуды квазигармонической помехи. Для измерений использовалась схема, приведённая на рис. 3. Калибровка проводилась по указанной выше методике.

В результате были получены значения калибровочных констант k и b как функции амплитуды квазигармонической помехи U_a . По полученным значениям были построены аппроксимирующие полиномы третьего порядка $k(U_a)$ и $b(U_a)$. Результаты экспериментов представлены на рис. 4 и 5.

Для подтверждения работоспособности радиометрического канала в составе комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования (КМЗ) после проведения калибровки был выполнен

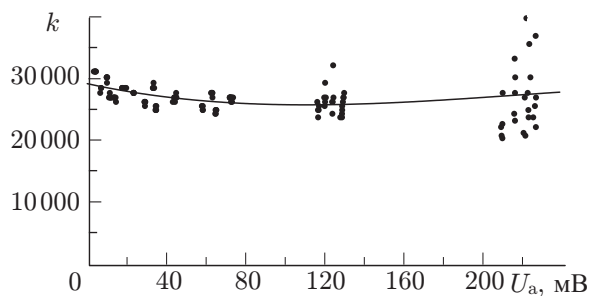


Рис. 4. Экспериментальные значения коэффициента $k(U_{ai})$ (точки) и аппроксимирующий полином $k(U_a)$ (сплошная линия)

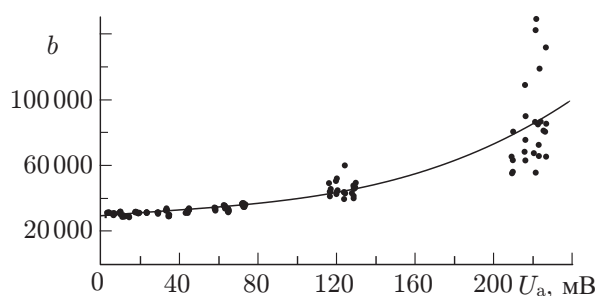


Рис. 5. Экспериментальные значения коэффициента $b(U_{ai})$ (точки) и аппроксимирующий полином $b(U_a)$ (сплошная линия)

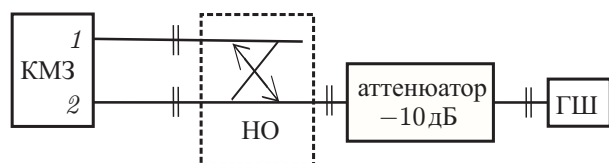


Рис. 6. Схема контрольного эксперимента: 1 — передающий канал, 2 — приёмный канал

лабораторный эксперимент по измерению яркостной температуры генератора шума, подключённого к антенному входу КМЗ через фиксированный аттенюатор (-10 дБ), по схеме, представленной на рис. 6. Паспортное значение температуры генератора шума на рабочей частоте КМЗ равно $27\,060$ К, коэффициент стоячей волны по напряжению его входа составлял $1,3$. Мощность передатчика активного канала КМЗ на выходном

фланце составила 12 мВт, зарегистрированная амплитуда принятого зондирующего сигнала на промежуточной частоте равна $U_a = 122$ мВ. Значения калибровочных коэффициентов $k(U_a) = 26\,447$, $b(U_a) = 43\,273$, измеренная за микросекундный интервал времени ($\tau = 1$ мкс) эквивалентная шумовая температура на входе радиометрического канала $T_x = 2\,710 \pm 250$ К. При этом измеренное за такой же интервал времени τ значение шумовой температуры при отключённом источнике узкополосной помехи составило $T_x = 2\,700 \pm 80$ К.

Полученный результат измерения хорошо согласуется с паспортными данными на генератор шума и аттенюатор. Это можно считать экспериментальным подтверждением возможности проведения синхронных активных и пассивных измерений в общем частотном диапазоне с помощью одного приёмного устройства как для активного, так и для пассивного каналов, с разделением каналов по форме спектра мощности сигнала на промежуточной частоте. При этом флуктуационная чувствительность радиометрического канала, работающего синхронно с активным каналом, примерно в три—пять раз хуже чувствительности такого же радиометрического приёмника, не подверженного воздействию мощной узкополосной помехи со стороны активных приборов, входящих в состав измерительного комплекса.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были экспериментально получены зависимости калибровочных коэффициентов радиометрического канала от амплитуды квазигармонической помехи. Эти зависимости обусловлены нелинейным воздействием входного шумового процесса с узкополосной помехой на приёмное устройство. Такая помеха аналогична наличию дополнительного гетеродина в радиометрическом канале.

Разброс калибровочных коэффициентов растёт по мере увеличения амплитуды узкополосной помехи. При этом радиометрический канал остаётся приемлемым для измерения мощности шумов внешних источников при амплитуде квазигармонической помехи примерно вдвое меньшей

уровня, соответствующего появлению нелинейных искажений.

Для того, чтобы обеспечить приемлемый для работы радиометрического канала уровень узкополосной помехи, необходимо применять аппаратные средства подавления помех. Таким образом, работоспособный радиометрический канал в составе комплекса микроволнового зондирования может быть создан при помощи сочетания аппаратных средств подавления помех и специальных методов обработки сигнала.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение 14.578.21.0110 от 27.10.2015, уникальный идентификатор RFMEFI57815X0110).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / Под ред. В. Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2008. 704 с.
2. Volosyuk V. K., Kravchenko V. F., Ponomaryov V. I. // J. Communications Technology & Electronics. 1992. V. 37, No. 1. P. 1.
3. Бубукин И. Т., Станкевич К. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 4. С. 261.
4. Неронский Л. Б. // Изв. вузов. СССР. Радиотехника. 1964. Т. 7, № 6. С. 703.
5. Конюхов В. В. // Вопросы радиоэлектроники. 1965. Сер. XII, вып. 18. С. 121.
6. Лаврентьев В. П. // Вопросы радиоэлектроники. 1968. Сер. XII, вып. 25. С. 50.
7. Сифоров В. И. // Электросвязь. 1938. № 3. С. 24.
8. Lotch H. // IEEE Trans. 1968. V. ED-15, No. 5. P. 294.
9. Катунцев В. Д., Болдырев Н. М. // Изв. вузов. СССР. Радиоэлектроника. 1967. Т. 12, № 5. С. 371.
10. Лифшиц В. В. // Сб. Полупроводниковые приборы и их применение. М.: Сов. радио, 1967. Вып. 17. С. 173.
11. Золотарев И. Д. Переходные процессы в избирательных усилителях на транзисторах. М.: Связь, 1976. 158 с.
12. Кузьмин В. Г., Орлов И. Я. // Сб. Электромагнитная совместимость. Горький: Горьк. гос. ун-т., 1976. С. 59.
13. Кузнецов А. М., Кузьмин В. Г., Орлов И. Я. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 1. С. 146.
14. Егорычев В. П., Кобрин М. М., Кузьмин В. Г., Орлов И. Я. // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25, № 11. С. 2309.
15. Силин А. В. Повышение эффективной избирательности бортовых приёмников АМ сигналов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: Горький: Горьковский госуниверситет, 1971. 162 с.
16. Пат. 3256487 А США. МПК H04B1/12. Interference suppression system / Sinniger D. V. Заявл. 08.08.1962. Опубл. 14.06.1966.
17. Пат. 3633117 А США. МПК G01S1/24, G01S1/00, H03H19/00. Suppression of the phase-sensitive spectral component from a signal / Reilly R. A. Jr. Заявл. 29.07.1970. Опубл. 04.01.1972.

Поступила в редакцию 23 декабря 2015 г.; принята в печать 8 августа 2016 г.

**REALIZATION OF RADIOMETRIC CHANNEL AS PART OF THE MICROWAVE
SENSING COMPLEX IN THE PRESENCE OF PERMANENT INTRASYSTEM
NARROWBAND INTERFERENCE**

V. N. Ikonnikov, V. A. Kanakov, and D. V. Savelyev

We consider the problem of realization of a radiometric channel as part of the microwave sensing complex in the presence of permanent intrasystem narrowband interference. The method of radiometric-channel calibration and radiometric-signal processing is proposed. The results of the experiments on determining the dependences of the radiometric-channel calibration coefficients on the quasiharmonic-interference amplitude are presented.