

И. К. СУНДУЧКОВ

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие «Сатурн»
E-mail: sunduchkov@ukrkosmos.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
01.07 2004 г.

Оппонент к. т. н. С. А. КРАВЧУК
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

ПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА ММ-ДИАПАЗОНА ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ И ВЕЩАНИЯ

Приведены результаты разработки приемных устройств миллиметрового диапазона длин волн, предназначенных для систем связи и вещания.

Интерактивные мультимедийные приложения будущего потребуют одновременной передачи данных и видео, для чего необходимо создание радиосетей большой емкости. Системы следующего поколения будут работать со скоростями передачи данных порядка 100 Гбит/с и выше. Очевидно, что системы миллиметрового диапазона длин волн могут обеспечить эти требования, поскольку они широкополосные, обладают высокой разрешающей способностью, имеют малые габариты, обладают способностью объединять в одном чипе цифровые мультиплексоры, делители частоты, генераторные источники, усилители, преобразователи и другие элементы приемных устройств.

Поскольку материалы и изготовленные на их основе элементы приемных устройств миллиметрового диапазона более дорогие, чем низкочастотные элементы, применяются специальные меры по удешевлению устройств. Чтобы уменьшить количество схем, использующих дорогие материалы, прежде всего применяют как можно больше дискретных устройств вместо аналоговых. Размещение комплектующих делают компактным, т. к. в миллиметровом диапазоне длин волн длинные линии вносят ощутимое ухудшение отношения сигнал/шум (с/ш). Кроме того, если это возможно, ряд выполняемых функций переносят в диапазон более низких частот, где и элементы дешевле, и обеспечение высококачественных характеристик достигается проще. Так, использование умножения частот для получения сигнала в миллиметровой области имеет ряд преимуществ: схема генератора дешевле, проще получить генератор с низким уровнем фазового шума, легче обеспечить температурную и частотную стабильность генератора.

В данной работе ставится задача обратить внимание разработчиков на основные тенденции построения приемных устройств миллиметрового диапазона, а также представить новые результаты разработки их ключевых элементов — входных малошумящих устройств (МШУ): от создания математической модели СВЧ-транзистора для миллиметрового диапазона до достижения выходных параметров приемных входных МШУ.

Некоторые тенденции построения приемных устройств в мм-диапазоне

Примером радикального уменьшения дорогостоящих компонентов в приемнике является отказ от схемы супергетеродинного приема в пользу схемы приемника прямого преобразования, т. е. приемника с «детекторами биений».

Известно, что приемники прямого преобразования (direct-conversion) имеют преимущества по сравнению с обычными гетеродинными приемниками как в простоте схемы, так и в более высоком уровне интеграции [1]. Этот приемник, изготовленный с помощью новых технологий и на современной элементной базе, оказался устойчивым, дешевым, с достаточно хорошими характеристиками для применения в широкополосных беспроводных QPSK-коммуникациях.

Результаты экспериментальных исследований такого приемника убеждают в его пригодности для вышеуказанных целей [2]. Приемник обеспечивает прием информации при скорости передачи 40 Мбит/с с вероятностью ошибки, равной 10^{-6} при отношении $c/\text{ш} \geq 11$ дБ, фазовой нестабильности местного источника сигнала не более $\pm 30^\circ$ при полосе рабочих частот порядка 100 МГц в диапазоне частот 23...31 ГГц. Максимальный уровень мощности входящего сигнала равен 3 дБм. Динамический диапазон — порядка 40 дБ при уровне мощности сигнала местного источника 20 дБм. Динамический диапазон приемника может быть увеличен более чем до 70 дБ за счет автоматической регулировки усиления в малошумящем входном усилителе.

Передача видеосигнала в квартиры домов — самое простое применение миллиметровых волн, прежде всего потому, что это система односторонняя, распределительная. Однако есть ряд трудностей, которые нужно преодолеть: преобразование с повышением частоты сигнала до миллиметрового диапазона серьезно ухудшает фазовый шум и характеристики стабильности частоты.

Пример оригинального решения изложен в работе [3], где предложена схема «самогетеродинного» приема. В ней передатчик передает сигнал вместе с локальной несущей, используемой для преобразования частоты. Передатчик состоит из генератора миллиметровых волн, смесителя, полосового фильтра и усилителя. Эти узлы должны иметь широкую полосу, чтобы передать и модулированный сигнал, и локальную несущую. Конвертор приемника преобразовывает сигнал, используя «самогетеродинный при-

ем», т. е. смешивает полученный сигнал с полученной локальной несущей.

Жизненность данного решения подтверждена экспериментально. В миллиметровом диапазоне длин волн, на частоте 60 ГГц, в полосе 300 МГц передавались многоканальные (8 каналов) цифровые видеосигналы, модулированные 4-позиционной фазовой модуляцией (QPSK). При этом измеренное подавление фазового шума составило 100 дБ к уровню несущей на 1 Гц при отстройке на 1 кГц. В этой системе отношение с/ш зависит не только от мощности полученного сигнала, но также и от распределения мощности передачи между сигналом и локальной несущей. Равное распределение мощности дает лучшее отношение с/ш, которое равно 27 и 21 дБ при передаче сигнала на расстояние 4 и 8 м, соответственно. Ожидается увеличение этого соотношения до 34 дБ при оптимизации системы.

Результаты разработок входных малошумящих приемных устройств в мм-диапазоне

Требования к элементам, узлам и блокам приемных устройств диктуются как построением системы в целом, так и конкретным назначением приемника в ней.

В работе [4] представлено входное усилительно-преобразовательное устройство для приема сигналов ТВ в диапазоне частот 40 ГГц, которое не содержит входного малошумящего усилителя (в силу требования низкой цены на один комплект, а также из-за достаточной излучаемой мощности сигнала центральной станцией распределительной сети). Входное приемное устройство содержит антенну, волноводно-полосковый переход, фильтр зеркального канала, смеситель, малошумящий усилитель промежуточной частоты, выходной усилитель, гетеродин, платы питания.

Коэффициент стоячей волны по напряжению на входе ($K_{СВН_{вх}}$) и на выходе ($K_{СВН_{вых}}$) равен соответственно 2,5 и 1,8. Уровень выходной мощности при компрессии коэффициента передачи в 1 дБ равен +14 дБм. Ток потребления — до 0,4 А. При климатических испытаниях конверторов в диапазоне температур от +60 до -20°C параметры изменялись в следующих пределах: коэффициент усиления от 34 до 36,2 дБ, коэффициент шума от 7,2 до 6,6 дБ, неравномерность коэффициента передачи в диапазоне частот от 1,2 до 1,3 дБ. Структурная схема приемного устройства и параметры его составных частей приведены в [4].

Ключевым элементом входных приемных устройств является малошумящий усилитель. Основные параметры МШУ, достигнутые в НПП «Сатурн» в различных диапазонах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

	L	$K_{ш}$	$K_{а}$	V
Диапазон рабочих частот, ГГц	1,5...2,5	11,25...12,75	19,0...21,0	35,0...37,0
Коэффициент усиления, дБ	33,5	45	45	30
Входная эквивалентная шумовая температура, К	120	75	100	230
Неравномерность АЧХ коэффициента усиления в диапазоне 500 МГц, дБ	±0,5	±0,5	±0,5	±1,0

Малошумящий усилитель диапазона рабочих частот 35...37 ГГц выполнен по планарной технологии с волноводно-полосковыми переходами на входе и выходе. Согласование транзисторов типа PHEMT EC2612 выполнялось с помощью согласующих цепей. Межкаскадная «развязка» выполнена в виде связанной полосковой линии. Материал подложки — кварц толщиной 0,3 мм. Топология согласующих цепей и полученные результаты измерений параметров приведены в работе [5].

От приемных устройств требуется обеспечение не только низких собственных шумов и «развязки» входа от шумов последующих каскадов приемного тракта, но и обеспечение достаточной выходной мощности сигнала для их «раскачки». Малошумящий усилитель с выходной мощностью 10 мВт в диапазоне частот 35...37 ГГц представлен в работах [6, 7].

Усилитель с выходной мощностью 10 мВт состоит из входного малошумящего усилителя, предварительного усилителя, полосно-пропускающего фильтра и выходного усилителя. Каждый из усилителей состоит из двух каскадов. Входной усилитель настроен на минимум коэффициента шума, выходной — на максимум выходной мощности.

Результаты проведенных исследований показали, что разработанный малошумящий усилитель имеет следующие параметры в диапазоне рабочих частот 34...37 ГГц: коэффициент усиления 27—30 дБ, эквивалентную шумовую температуру 220—264 К, уровень выходной мощности при изменении коэффициента усиления -1 дБ равен 10,1—15,7 мВт, $K_{СВН_{вых}}$ — 1,23—1,71, $K_{СВН_{вх}}$ — 2,4—4,1.

Антенные комплексы приемных спутниковых систем связи, как правило, комплектуются малошумящими усилителями, которые размещаются в непосредственной близости у зеркала антенны [8—10]. Это эффективно снижает эквивалентную шумовую температуру системы, однако климатическое воздействие изменяет общий коэффициент усиления. Это обстоятельство налагает более жесткие требования к энергетике элементов канала и динамическому диапазону усилителя.

Автоматическая регулировка усиления (АРУ), работающая от датчика температуры, может при соответствующей настройке существенно уменьшить изменение коэффициента усиления в малошумящем усилителе. Исполнительный элемент ($p-i-n$ -аттенюатор) устанавливался между двумя двухкаскадными усилителями.

Полученные результаты [11] стабилизации коэффициента усиления многокаскадного входного малошумящего усилителя в Ka -диапазоне до величины менее 1 дБ при изменении температуры окружающей среды от -40 до +60°C полностью отвечают требованиям, предъявленным ко входным усилителям приемо-передающих комплексов земных станций спутниковых систем связи.

Исследование малошумящего усилителя с учетом нелинейных свойств транзистора проводилось на однокаскадном усилителе в диапазоне частот 46...50 ГГц. При проектировании использовалось программное обеспечение «Serenade» для линейного и нелинейно-

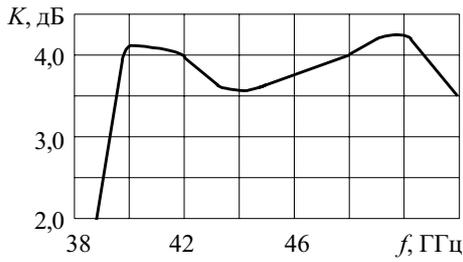


Рис. 4. Коэффициент усиления однокаскадного усилителя

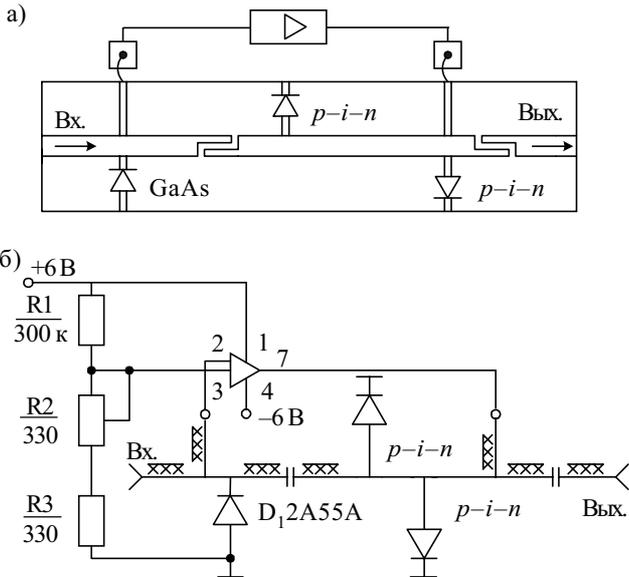


Рис. 5. Схема ограничителя и его топология: а — топология; б — схема принципиальная электрическая

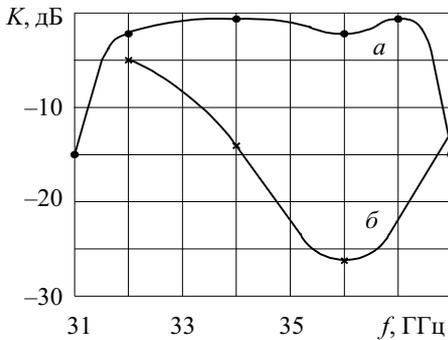


Рис. 6. Коэффициент передачи ограничителя в диапазоне частот 31...38 ГГц: а — диоды «закрыты»; б — диоды «открыты»

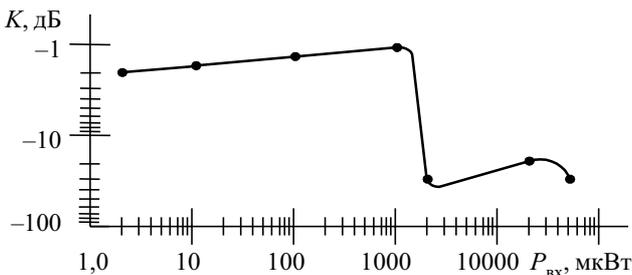


Рис. 7. Зависимость коэффициента передачи ограничителя от величины входной мощности сигнала

генс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=1\cdot 10^{-4}$. Размеры отдельных участков топологии даны на рис. 3.

Использовался GaAs-транзистор с длиной затвора 40 мк и с шириной 0,25 мк разработки НПП «Сатурн». Длина соединительных проволочек затвора l_{L1} и стока l_{L2} равна, соответственно, 0,1 и 0,3 мм. Диаметры соединительных проволочек равны 0,02 мм. Способ соединения — сварка.

Экспериментальная характеристика коэффициента передачи одного каскада усилителя в диапазоне частот 38...52 ГГц приведена на рис. 4.

Для исключения эффектов выгорания в МШУ включают ограничитель мощности. Разработанный для МШУ ограничитель мощности на диодах имеет порог срабатывания при входной мощности сигнала, равной 1—2 мВт. Схема ограничителя и его топология представлены на рис. 5. Коэффициенты передачи ограничителя в диапазоне частот 31...38 ГГц в двух режимах (диоды «закрыты» и диоды «открыты») приведены на рис. 6. Зависимость коэффициента передачи ограничителя от величины входной мощности сигнала $P_{\text{вх}}$ показана на рис. 7.

В ограничителе использованы GaAs-диоды типа 2A55A (разработка НПП «Сатурн») в качестве датчика уровня входной мощности. В роли исполнительного механизма ослабления сигнала применен p-i-n-диод (ЩЭЗ 362.182 ТУ, НИИ «Орион», г. Киев). В качестве усилителя сигнала датчика взята микросхема компаратора типа LM211. Микрополосковая плата выполнена на кварце толщиной 0,3 мм. Межкаскадная емкостная «развязка» конструктивно представляет собой «связанную» полосковую линию длиной $\lambda/4$ с шириной микрополосков 150 мкм с зазором 30 мкм. Потери в межкаскадной емкостной «развязке» менее -0,1 дБ.

Измерения проводились на частоте $f=36$ ГГц. При возрастании мощности входного сигнала до 2 мВт ослабление сигнала в ограничителе составило -27 дБ. Начальные потери в ограничителе равны -2 дБ.

Методики экспериментальных исследований, расчета погрешностей и неидентичности характеристик у образцов из одной партии малой серии изложены в работах автора [7, 13].

Заклучение

1. В настоящее время разработчики приемников активно ведут работы в миллиметровом диапазоне и в поисках оптимальных решений часто отходят от классических схем построения приемников. В миллиметровом диапазоне задача моделирования транзисторов продолжает оставаться актуальной. Входные малошумящие приемные устройства в миллиметровом диапазоне наделяются характеристиками, не свойственными им ранее в более низкочастотных диапазонах.

2. Получены новые результаты: усиление сигналов на отечественном транзисторе до 4 дБ на частоте до 50 ГГц, ограничения входного сигнала на 25 дБ при пороге срабатывания на уровне входного сигнала 1—2 мВт, стабилизация коэффициента усиления до величины 1 дБ при изменении температуры окружающей среды от -40 до +60°C, выходная мощность 10—15 мВт в диапазоне частот 35...37 ГГц при эквивалентной шумовой температуре 221—226 К.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Abidi A. A. Direct-conversion radio transceivers for digital communications // Solid-State Circuits.—1995.— Vol. 30, N 12.— P. 2766—2772.
2. Tatu S. O., Moldovan E., Wu K., Bossio R. G. A new direct millimeter-wave six-port receiver // IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.— 2001.— Vol. 49, N 12.— P. 2517—2521.
3. Yozo Shoji, Kiyoshi Hamaguchi, Hiroyo Ogawa. Millimeter-wave remote self-heterodyne system for extremely stable and low-cost broad-band signal transmission // Ibid.— 2002.— Vol. 50, N 6.— P. 1458—1468.
4. Сундучков К. С., Сундучков И. К., Яковлев И. В. и др. Конвертор для приема телевидения в диапазоне частот 40 ГГц // Известия вузов. Радиоэлектроника.— 1999.— № 11.— С. 50—53.
5. Чмиль В. М., Сундучков И. К. Малошумящий усилитель диапазона рабочих частот 35÷37 ГГц // Радиотехника. (ХНУРЭ, Харьков.) — 2002.— Вып. 128.— С. 216—218.
6. Чмиль В. М., Сундучков И. К., Сундучков К. С. Малошумящий усилитель с выходной мощностью 10 мВт в диапазоне рабочих частот 35÷37 ГГц // Тр. 12-й Междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии".— Севастополь.— 2002.— С. 133—134.
7. Сундучков И. К. Экспериментальные исследования случайных погрешностей измерения характеристик малошумящих усилителей в миллиметровом диапазоне // Известия вузов. Радиоэлектроника.— 2004.— № 5.— С. 61—68.
8. Сундучков К. С., Макаров А. А., Сундучков И. К. Приемные системы радиосвязи и телевидения // Праці УНДІРТ.— 2003.— № 4.— С. 39—49.
9. Чмиль В. М., Сундучков К. С., Сундучков И. К. Техника и технология систем миллиметровых волн // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 4.— С. 6—14.
10. Сундучков К. С., Макаров А. А., Нарытник Т. Н., Сундучков И. К. Распределительные системы телевидения и мультимедиа // Праці УНДІРТ.— 2003.— № 3.— С. 17—20.
11. Сундучков И. К., Яковлев И. В. Компенсация температурного ухода усиления в малошумящем усилителе Ka-диапазона // Радиотехника. (ХНУРЭ, Харьков.) — 2004.— Вып. 137.— С. 56—59.
12. Materka A., Kasprzak T. Computer calculation of large-signal GaAs FET amplifier characteristics // IEEE Transactions on Microw. Theory and Techn.— 1985.— Vol. MTT-33, N 2.— P. 129—135.
13. Сундучков И. К. Методика определения неидентичности параметров между образцами МШУ в миллиметровом диапазоне // Тр. 13-й Междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии".— Севастополь.— 2003.— С. 150—152.

К. т. н. Ю. П. СЕРДЮКОВ

Россия, г. Санкт-Петербург
E-mail: zavinfo@zdrav.spb.ru

Дата поступления в редакцию
23.01 2004 г.

Оппонент д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН
(ОАО "Авангард", г. С.-Петербург)

МЕТОД ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Получена оценка величины межсимвольных искажений, которая может быть использована при проектировании систем связи.

Поток импульсно-модулированных и цифровых сигналов после прохождения через канал связи содержит в себе ошибки. Они обусловлены различными факторами, в том числе и межсимвольной интерференцией. Эффективность метода обработки сигнала на приемной стороне в значительной мере определяется степенью подавления этой составляющей погрешности [1, с. 249].

В данной работе рассматривается метод уменьшения межсимвольных искажений за счет большей концентрации принятого сигнала, что в итоге позволяет повысить скорость передачи информации по каналу связи.

Метод повышения концентрации или «обуживания» принятого сигнала реализуется на основе двукратного применения интегральных преобразований. Интегральные преобразования в этом смысле представляют собой описание фильтра, оптимизирующего концентрацию энергии сигнала в заданной полосе частот. Фильтр — композиция двух интегральных операторов. Первый оператор можно рассматривать как сверточный фильтр, приближенно устраняющий из свертки компоненты, описывающие эталонный

сигнал входной последовательности, канала связи и окна данных. При этом оператор преобразования сохраняет аддитивно-сдвиговую структуру обрабатываемого информационного сигнала*. Второй интегральный оператор, используемый в описываемом методе обработки, сохраняющий также аддитивно-сдвиговую структуру сигнала, переводит результат обработки первого этапа в единичную функцию длительности меры нуля.

Ввиду того, что основой описываемого метода являются интегральные преобразования, повышающие концентрацию обрабатываемого сигнала, будем называть его методом концентрирующих интегральных преобразований [2].

Описание модели исследования

Считаем, что обработка принимаемой последовательности импульсов производится в режиме реального времени на основе процедуры периодического оценивания. При этом учитываются следующие факторы.

Во-первых, конечность времени наблюдения, присутствующая процедуре периодического оценивания и определяемая протяженностью некоторого окна данных — $d(t)$. Во-вторых, согласованный канал связи, от-

* В какой-то мере первый оператор можно рассматривать как некоторый аналог интегрального оператора известного метода, описанного в [1], использующего фильтр с частотной характеристикой, обратной спектру сигнала.