

**В.Н. Тарасов, А.П. Игнатьев, О.Г. Соловьев,
А.В. Устинов, А.В. Левашов, Е.Е. Исаев**
ЗАО «Научно-производственное предприятие «Салют-25»

СВЧ приемники см- и мм- диапазона с фазовым подавлением зеркального канала

Представлены результаты разработки СВЧ приемников с фазовым подавлением зеркального канала, приведена схема построения СВЧ канала и описана система оценки параметров. Описана схема построения СВЧ смесителя, обсуждаются вопросы повышения чувствительности, произведено сравнение параметров с приемником на основе балансного смесителя без СВЧ МШУ.

Ключевые слова: СВЧ приемник, смеситель, подавление зеркального канала

В задачах радиосвязи, радиолокации и радионавигации при работе с сигналами малой мощности, сопоставимой с уровнем шумов, становится актуальной задача увеличения чувствительности приемника, т.е. снижения его коэффициента шума. Часто в данных системах используются простые супергетеродинные приемники на основе балансного смесителя без входного малошумящего усилителя (СВЧ МШУ). Основной недостаток данного типа приемников - достаточно высокий однополосный коэффициент шума (КШ) на уровне 7...10 дБ (в зависимости от параметров смесителя и ПЧ усилителя). В отсутствие дополнительных мер по подавлению зеркального канала приема, реальный КШ приемника в системе будет на 3дБ выше.

Для подавления зеркального канала могут использоваться СВЧ фильтры или смесители с фазовым подавлением зеркального канала. Применение фильтров затруднено или невозможно при широком диапазоне входных частот и достаточно низких частотах ПЧ, удобных для обработки сигналов. С целью преодоления данного недостатка на практике применяются приемники с двойным/тройным преобразованием частоты. При этом первая частота ПЧ выбирается достаточно высокой, чтобы отрезать зеркальный канал приема относительно простыми и недорогими фильтрами. Затем производится еще одно преобразование на низкую частоту ПЧ, пригодную для обработки сигналов.

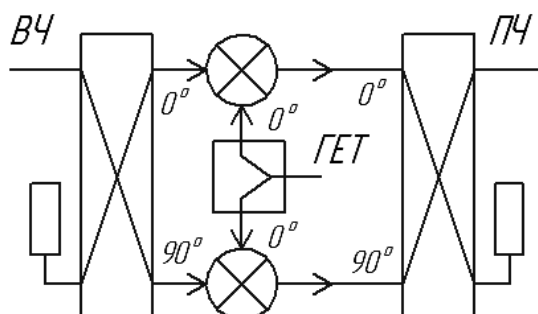


Рисунок 1.

Смесители с фазовым подавлением зеркального канала обеспечивают подавление зеркального канала на 15...25 дБ в широком диапазоне частот ВЧ и ПЧ без применения

фильтров. Это позволяет снизить КШ СВЧ приемника, количество частотных преобразований и сложность входного преселектора. Таким образом, приемники использующие данный тип смесителей, снижают общую сложность системы и её стоимость.

Существует несколько схем реализации смесителей с фазовым подавлением зеркального канала [1,2]. Они отличаются используемыми типами направленных ответвителей и их расположением в схеме. Один из вариантов, удобных для практической реализации в СВЧ приемниках, показан на рисунке 1.

В данном варианте на входе ВЧ сигнала смесителя установлен квадратурный направленный ответвитель, обеспечивающий 90 фазовый сдвиг, например мост Ланге. Сигнал гетеродина подается через резистивный или кольцевой делитель мощности. На выходах смесителей образуются два сигнала ПЧ, которые подаются на квадратурный направленный ответвитель [4]. Принятый сигнал прямого канала суммируется в фазе, а сигнал зеркального канала в противофазе и, соответственно, он подавляется.

Величина подавления сигнала зеркального канала в широкополосных смесителях составляет 15...25 дБ и зависит от разброса параметров входящих в него активных элементов, ошибки фазы и амплитуды делителей и сумматоров мощности, качества монтажа. Для узкополосных смесителей возможно достичь больших величин подавления за счет регулировки, но на практике не требуется подавление больше чем на 20дБ, т.к. это не оказывает заметного влияния на общий КШ приемника. Зависимость величины подавления зеркального канала от баланса фаз и амплитуд, а также наглядные номограммы для приблизительной ее оценки приведены в различных источниках [1,3].

Дальнейшее увеличение чувствительности приемника возможно за счет установки на входе СВЧ МШУ, который позволяет снизить общий коэффициент шума системы. Чтобы последующие элементы схемы не оказывали значительного влияния на общий КШ приемника коэффициент усиления МШУ должен превышать 15...20 дБ. Применение МШУ с КУ больше 25...30 дБ не рационально, т.к. уменьшает динамический диапазон приемника. Типовой коэффициент шума МШУ в Х-диапазоне 1...2дБ, в Ku-диапазоне 1,5...3дБ.

Для расширения динамического диапазона на входе приемника за первым каскадом усиления часто вводят переключаемый аттенюатор. Аттенюатор может быть реализован на рin-диодах или отключением одного из каскадов усилителя. При работе с большими уровнями мощности коэффициент шума системы не так важен, поэтому на входе приемника подключается аттенюатор.

Для защиты входных каскадов МШУ от мощных импульсов передатчика и внеполосных импульсных сигналов на входе приемника размещают самоуправляемый СВЧ ограничитель мощности, обычно работающий на отражение мощного СВЧ сигнала.

Такой ограничитель мощности, как правило, построен по квазиактивной схеме на основе ограничительных или переключаемых рin-диодов, и управляющего ими детекторного диода. Типовой ограничитель мощности защищает входные каскады от 1...5 Вт непрерывной входной мощности и вносит 0,5...1 дБ потерь.

На выходе смесителя устанавливают ПЧ усилитель с коэффициентом усиления порядка 15...20 дБ и КШ 1...3 дБ. Коэффициент шума ПЧ усилителя зависит от частоты ПЧ и используемой элементной базы. КУ ПЧ усилителя выбирают в зависимости от необходимого

коэффициента усиления приемника. КШ и импеданс ПЧ усилителя оказывают значительное влияние на общий КШ приемника в отсутствие входного СВЧ МШУ. Температурная зависимость КУ приемника может быть скомпенсирована изменением КУ ПЧ усилителя.

Типовой канал приемника с фазовым подавлением зеркального канала, обеспечивающего низкий КШ системы, изображен на рисунке 2. Он состоит из волноводного или коаксиального входа, защитного устройства, СВЧ МШУ, смесителя с фазовым подавлением зеркального канала, ПЧ сумматора и усилителя, выходного разъема. При многоканальной конфигурации приемника в схему добавляются несколько одинаковых каналов и СВЧ делитель гетеродинного сигнала. Типовые параметры приемника с фазовым подавлением зеркального канала и приемника на балансном смесителе Ку-диапазона, а также параметры входящих в него узлов, используемые для расчета коэффициента шума, сведены в таблицу 1.

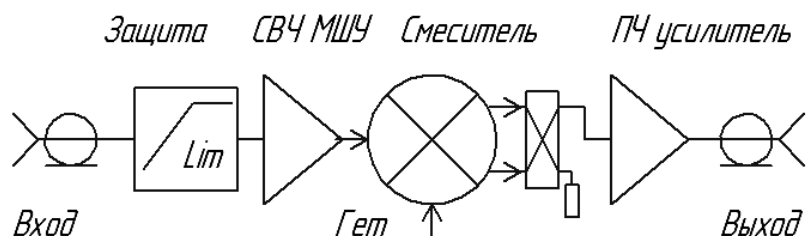


Рисунок 2.

Таблица 1

Параметр	Приемник с фазовым подавлением зеркального канала с СВЧ МШУ	Приемник на балансном смесителе без СВЧ МШУ
Коэффициент передачи	32 дБ	30 дБ
Общий КШ, однополосный	3,65 дБ	8 дБ
Общий КШ двухполосный	3,8 дБ	11 дБ
Подавление зеркального канала	16 дБ	нет
Подавление сигнала гетеродина на входе модуля	≥ 50 дБ	≥ 20 дБ
Развязка между каналами (для многоканальных модулей)	≥ 35 дБ	≥ 30 дБ
Сложность реализации	Умеренная	Относительно простой
Данные для расчета коэффициента шума приемника		
Потери в ограничителе	1 дБ	-
Коэффициент шума СВЧ МШУ	2,5 дБ	-
Коэффициент усиления СВЧ МШУ	20 дБ	-
Потери преобразования в смесителе	7 дБ	7 дБ
Коэффициент шума ПЧ усилителя	1,5 дБ	1 дБ

Следует отметить, что расчет и измерение КШ устройств с преобразованием частоты имеет некоторые особенности. Под коэффициентом шума различных устройств без преобразования частоты (например КШ усилителей) подразумевается однополосный КШ (т.е. КШ одной боковой полосы).

При измерении коэффициента шума различных устройств на практике наиболее распространен Y-метод. Для измерений необходим анализатор коэффициента шума и генератор широкополосного шума (ГШ). Анализатор КШ представляет собой анализатор спектра с предусилителем и малым собственным шумом. Благодаря преселектору, установленному на входе анализатора, измерение шума производится в одной боковой полосе. Для ГШ известна эквивалентная шумовая температура (ENR) в дБ, которая показывает, на сколько дБ (во сколько раз) шум ГШ больше шума 50 Ом резистора. Для устройств с большим усилением используются ГШ с ENR 10...20дБ.

Анализатор подает на ГШ импульсный сигнал управления для его включения. На каждой частотной точке производится два измерения: с включенным и выключенным генератором шума. На основе полученных уровней шумов на выходе устройства вычисляется их соотношение. Используя известную ENR ГШ на входе и соотношение сигнал/шум на выходе, вычисляется КШ и КУ тестируемого устройства.

При измерениях КШ устройств с преобразованием частоты необходимо учитывать преобразование шумов основного и зеркального канала. Если коэффициент передачи приемника по прямому и зеркальному каналу одинаков, измеренное анализатором КШ значение коэффициента усиления будет на 3дБ выше, а измеренный КШ на 3дБ ниже.

Оценим КШ различных типов приемников. Оценка КШ приемника производится на основе формулы Фрииса. Однополосный КШ приемника, состоящего из входного смесителя и ПЧ усилителя при потерях преобразования смесителя 7 дБ и коэффициенте шума усилителя ПЧ 1дБ, составит 8дБ. В отсутствие дополнительных мер по подавлению шумов зеркального канала общий КШ приемника будет на 3дБ больше, т.е. 11 дБ.

Коэффициент шума приемника построенного по схеме, изображенной на рисунке 1, оценить сложнее. Данные для расчета сведены в таблицу 1. В основном, КШ определяется потерями во входном ограничителе, и коэффициентом шума СВЧ МШУ. Их общий коэффициент шума составляет 3,5 дБ. Смеситель и ПЧ усилитель вносят 0,15 дБ дополнительных шумов. Вклад зеркального канала в данной схеме 0,15 дБ. Таким образом, приемник, построенный по данной архитектуре, имеет общий КШ менее 4дБ.

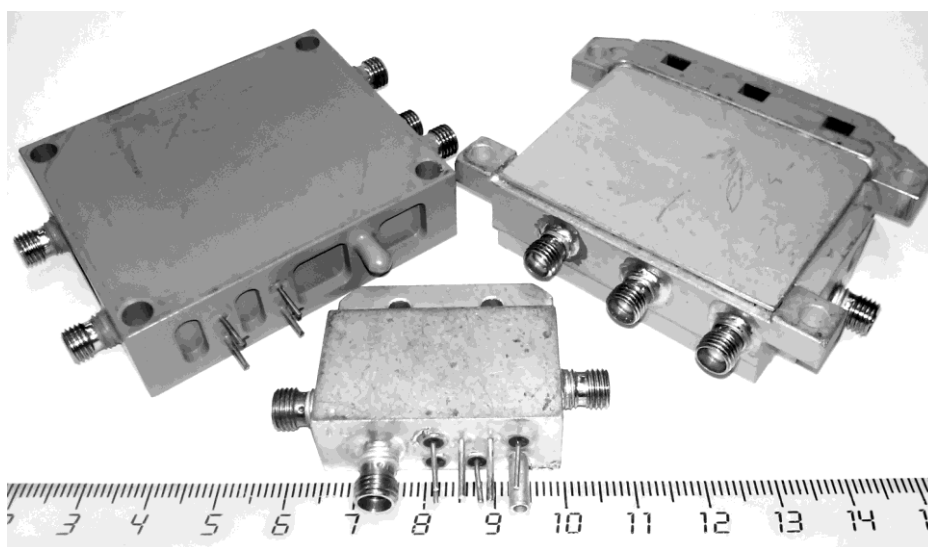


Рисунок 3.

Уменьшение КШ приемника на 6дБ позволяет уменьшить на эту величину мощность передатчика, либо увеличить дальность работы системы. Для систем радиосвязи и радиолокации с разнесенными приемником и передатчиком (например, просветные РЛС) это приводит к увеличению дальности в 2 раза. Для систем радиолокации с находящимися рядом приемником и передатчиком это приводит к увеличению дальности в 1,4 раза.

На рисунке 3 показаны разработанные приемники с фазовым подавлением зеркального канала различных диапазонов.

Применение приемников с фазовым подавлением зеркального канала при разработке новых и модернизации существующих систем позволяет получить лучшие параметры по сравнению с простыми супергетеродинными приемниками на балансных смесителях. При этом сложность системы возрастает незначительно. Подобные приемники уже находят широкое применение в различных системах. Разработка подобных приемников является перспективным направлением развития СВЧ приемных устройств.

Библиографический список

1. Henderson B.C., Cook J. A. Image-Reject and Single-Sideband Mixers. Tech-note. /B.C. Henderson, J. A. Cook//WJ Communications, Inc. Режим доступа: http://www.rfcafe.com/references/articles/wj-tech-notes/ImageReject_SSB_mixers.pdf
2. Абрамов А.Н. и др. Смесители СВЧ с фазовым подавлением зеркального канала в гибридно-интегральном исполнении/ А.Н. Абрамов, А.С. Астахов, В.П. Камишкерцев, Д.А. Усанов// Москва: ЦНИИ «Электроника» - 1989. – Серия 1. Электроника СВЧ. Выпуск 5. - 50 с.
3. Image Rejection Mixers [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.microwaves101.com/encyclopedias/image-rejection-mixers>
4. Andrews D.. Lumped Element Quadrature Hybrids/ Andrews D.// Artech House - 2006 - 231p.