УДК 621.396.2

Васильев Олег Александрович[1],
кандидат технических наук
Грязнов Константин Васильевич[1],
Ефремов Иван Андреевич[2]
[1]ООО НПФ «Радиосервис»; г.Москва
E-mail: myradioservice@mail.ru
[2] ООО «Гранит», г.Владимир
E-mail: granit.eia@yandex.ru

РАСЧЁТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПРИЁМНИКА

В течение последних лет отечественными производителями были осуществлены разработки, а затем и освоено производство приемников с широкополосным выходом промежуточной частоты и быстрой перестройкой по диапазону, имеющих компьютерное или просто цифровое управление. Примером подобной аппаратуры является радиоприемное устройство (РПУ) RSjet, производимое компанией «РАДИОСЕРВИС».

Современное РПУ сочетает в себе линейную (аналоговую) и цифровую части. Граница их разделения постоянно смещается в сторону антенны. При этом требования к линейному тракту приемника, построенному по классическим канонам, ужесточаются с ростом разрядности аналого-цифрового преобразователя на входе цифрового приемника

В предлагаемой статье рассмотрены вопросы расчета, проектирования и технической реализации современных радиоприемных устройств, на базе которых возможно построение новых, отвечающих современным требованиям систем радиоконтроля и радиоразведки. Предложены пути практического решения некоторых проблем, стоящих перед разработчиками приемных устройств, а также описаны примеры реализации подобных проектов.

Статья может быть полезна как радиоинженерам, так и студентам соответствующих специальностей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
радиомониторинг, приемник, двойной супергетеродин, коэффициент шума, распределение усиления, динамический диапазон, аналого-цифровой преобразователь, АЦП, чувствительность

Часть 1.

Рассмотрим кратко вопрос о реализации аналогового тракта широкодиапазонного и широкополосного разведывательного приёмника, решающего задачи обнаружения, анализа, демодуляции и регистрации сигналов. Разработка любого радиоприёмного устройства (РПУ), способного решить поставленные задачи, начинается с определения его структуры и требуемых параметров. Огромную роль при разработке играет доступная элементная база. В настоящее время это, естественно, компоненты передовых в отрасли американских компаний, таких как Hittite, RF Microdevices, Analog Devices, Mini-Circuits и других. Помимо достижения высоких параметров приёмного тракта необходимо грамотно решить задачу стыковки линейного и цифро-

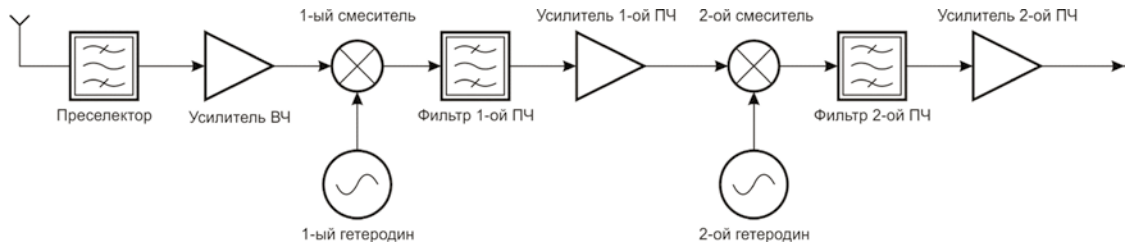

Рис. 1. Схема двойного супергетеродинного приёмника

вого приёмников (SDR - Soft Defined Radio).

Понятно, что передовые технологические решения требуют расширения полосы тракта промежуточной частоты до 20, 40 и более МГц, а современные разработчики предоставляют возможности быстрых 16 разрядных АЦП. Линейная часть сужается, но при этом возникает целый ряд трудно разрешаемых задач, связанных с уменьшением усиления в тракте при сохранении архитектуры приёмника.

Архитектура приёмника

Выбирая архитектуру приёмника, остановимся на классической схеме двойного супергетеродина, позволяющего осуществить высокую селекцию сигналов во всём диапазоне частот РПУ. При этом за счёт распределения усиления по тракту удаётся обеспечить приемлемый уровень нелинейных продуктов на выходе. Такой приёмник содержит (рис.1):

1. преселектор;
2. усилитель ВЧ (RF);
3. 1-ый смеситель;
4. 1-ый гетеродин;
5. фильтр 1-ой ПЧ;
6. усилитель 1-ой ПЧ;
7. 2-ой смеситель;
8. 2-ой гетеродин;
9. фильтр 2-ой ПЧ;
10. усилитель 2-ой ПЧ.

Начнём с проблемы стыковки аналогового тракта приёмника с цифровым приёмником. Отправным моментом для начала расчёта линейного приёмника можно считать полосу сигнала на выходе 2-ой ПЧ. В нашем случае полоса приёмника составляет 20 – 40 МГц (рассмотрим два варианта), а также характеристики предполагаемого АЦП:

- максимальный уровень сигнала на входе 1 В (р – р, или полный размах):
- число разрядов n -12, 14, 16;
- тактовая частота, или скорость выборки F sample 200 МГц;

Для расчёта коэффициента шума приёмника NF и требуемого усиления удобно пользоваться диаграммой уровней мощности сигнала в приёмнике, представленной на рис. 2.

Расчёт основных параметров линейного приёмника

К основным параметрам линейного тракта приёмника при заданной полосе тракта и выбранном АЦП на входе цифрового приёмника относятся:

- коэффициент усиления Gпр;
- чувствительность приёмника, или минимально-детектируемый сигнал MDS;

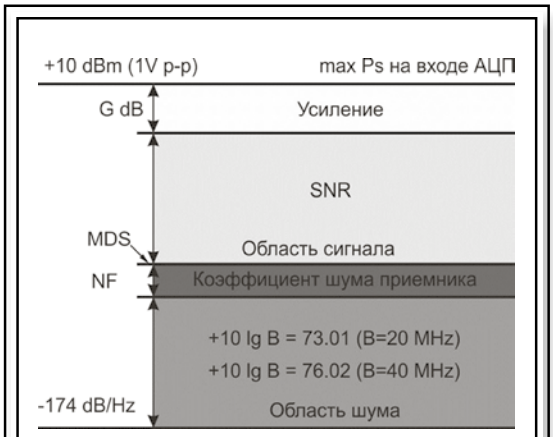

Рис. 2. Диаграмма уровней мощности сигнала в приёмнике

- коэффициент шума NFпр;
  динамический диапазон DRпр.

Динамический диапазон можно определять разными способами, остановимся пока на определении динамического диапазона как отношения мощности сигнала P1dB по выходу при сжатии на 1 dB к MDS:

$$DR = P1dB - MDS \quad (1)$$

Чувствительность приёмника, или MDS, зависит от полосы сигнала и коэффициента шума приёмника NFпр. Все расчёты далее можно произвести, воспользовавшись диаграммой уровней сигнала в приёмнике и сопровождающими её формулами. Воспользовавшись выражением для минимально-детектируемого сигнала

$$MDS = -174dB/Hz + 10lgB + NFпр; \quad (2)$$

и теоретическим значением отношения сигнал/шум для АЦП:

$$SNR = 6{,}02n + 1{,}76dB + 10lg\ Fs/2B, \quad (3)$$

где n – число разрядов,
Fs – частота выборки,
B – полоса сигнала,
учитывая шумы квантования Nq, получаем общее выражение для расчёта требуемого усиления линейного тракта G:

$$-174dB/Hz + 10lgB + NFпр + 6{,}02n + +1{,}76dB + 10lg\ Fs/2B - Nq + G = 10\ dBm, \quad (4)$$

или, требуемый коэффициент усиления равен

$$G = 174dB/Hz - 10lgB - NFпр - 6{,}02n - 1{,}76dB - 10lg\ Fs/2B + Nq - 10\ dBm. \quad (5)$$

Реально достижимая величина коэффициента шума приёмника NFпр составляет величину 6 – 15 dB, причём с ростом частоты растёт и коэффициент шума. Возьмём для расчётов среднюю величину NFпр = 10 dB. Шум квантования обычно принимают равным 6 dB, а частоту выборки - выбранной по Найквисту. Расчёты по формуле (5) представлены в таблице 1 для различной разрядности АЦП и двух значений полосы тракта.

Таблица 1. Расчёты требуемого коэффициента усиления

Число разрядов АЦП n	Коэффициент усиления G (полоса тракта 20МГц), dB	Коэффициент усиления G (полоса тракта 40МГц), dB
12	38	35
14	26	23
16	14	11

Обратимся снова к схеме двойного супергетеродина. Теперь задача состоит в распределении усиления по тракту таким образом, чтобы коэффициент шума не вышел за заданные пределы, а динамический диапазон как можно ближе соответствовал динамическому диапазону АЦП. На практике это означает, что потери по тракту не должны по абсолютной величине превосходить коэффициент усиления тракта, и даже должен быть некоторый запас по усилению. Задача распределения усиления по тракту при использовании 16 разрядного АЦП может реально быть трудновыполнимой.

Если АЦП выбрано, либо заданы его характеристики, то главной задачей при разработке аналогового приёмного тракта будет обеспечение требуемых чувствительности (коэффициента шума) и усиления тракта.

Следует понимать, что можно исходить из теоретических предпосылок (расчётных данных) и определить идеализированные параметры РПУ. Однако реальный тракт РПУ строится из дискретных компонентов, как активных, обеспечивающих распределённое усиление, так и пассивных, имеющих потери, или отрицательный коэффициент передачи.

Кроме того, элементы входной части широкодиапазонного приёмника должны быть также широкополосными. Но такие компоненты всегда имеют ниспадающую амплитудно-частотную характеристику, например, малошумящие усилители. Кроме того, две основные задачи, стоящие перед разработчиками РПУ - обеспечение максимальной чувствительности и максимального динамического диапазона, - являются в принципе противоречивыми. Поэтому разработка приёмника требует определённых компромиссов.

Рассмотрим пути реализации приёмника в диапазоне от 100 КГц до 3 ГГц. Сначала рас-

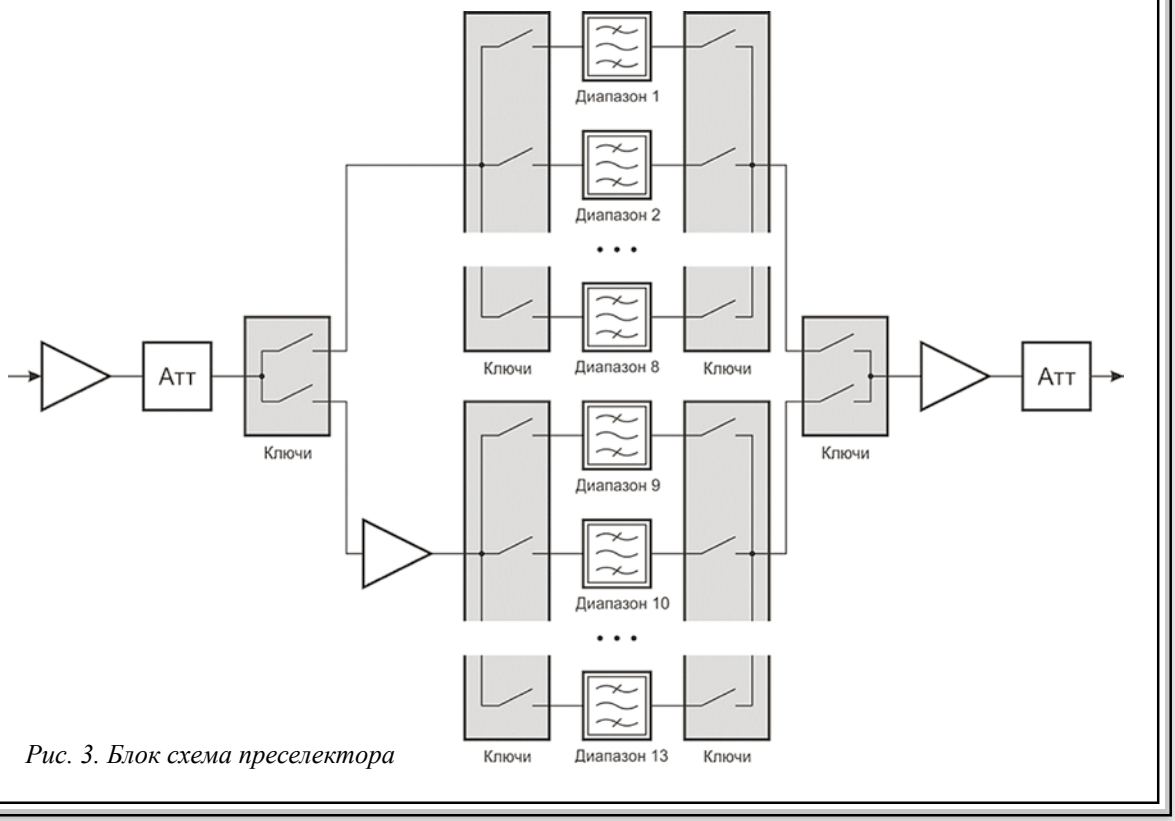

Рис. 3. Блок схема преселектора

смотрим диапазон от 30 МГц до 3 ГГц. Практика показывает, что супергетеродинная схема в диапазоне ниже 30 МГц начинает сильно проигрывать полностью цифровому приёмнику с прямой оцифровкой сигнала на его входе.

Выбор элементов линейного тракта

Прежде всего остановимся на выборе значений промежуточных частот. Первую ПЧ желательно выбирать таким образом, чтобы зеркальные частоты были бы как можно дальше удалены от рабочих частот. Для этого необходимо, чтобы частота гетеродина была бы выше значения ПЧ.

Входной усилитель.

Чувствительность РПУ определяется прежде всего входным усилителем, поэтому он должен быть малошумящим, то есть иметь низкий коэффициент шума. Кроме того, быть широкополосным, то есть его усиление должно быть достаточным во всём диапазоне частот приёмника, а также иметь хорошие линейность и динамический диапазон.

Проведённый анализ показал, что вполне приемлемым по данным параметрам является усилитель типа MGA53543 производства компании Avago. Его краткие характеристики приведены ниже:

- коэффициент шума NF - 1,5 dB;
- коэффициент усиления
  - 25 dB на частоте 100 МГц,
  - 18 dB на частоте 1000 МГц,
  - 16 dB на частоте 2000 МГц,
  - 12 dB на частоте 3000 МГц;
- мощность на вых. при сжатии на 1 dB P1dB = 12 dBm;
- точка IP3 = 22 dBm.

Этот же усилитель может быть использован и далее по тракту приёмника.

Преселектор

Преселектор представляет собой систему входных фильтров, обеспечивающую разбиение диапазона работы приёмника на поддиапазоны, главным образом, с целью обеспечения линейных динамических характеристик до первого смесителя. Покупные преселекторы

чрезвычайно дороги, практически недоступны и по параметрам подчас не удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Разработанный специалистами нашего предприятия преселектор содержит 13 фильтров, систему коммутаторов, усилителей и аттенюаторов и обеспечивает предварительную селекцию сигналов во всём диапазоне частот, вплоть до 3-х ГГц. Преселектор имеет компактную конструкцию и технологичен в производстве.

Фильтры нижнего диапазона реализованы на дискретных элементах. Фильтры диапазонов выше 1 ГГц реализованы на полосковых линиях, имеют небольшие потери, но при этом высокотехнологичны и имеют хорошую повторяемость характеристик при производстве.

Блок-схема преселектора представлена на рис. 3.

Из схемы видно, что более высокочастотная часть преселектора содержит дополнительный усилитель для компенсации потерь в фильтрах из-за ниспадающей АЧХ усилителя MGA53543. На входе преселектора включён аттенюатор с цифровым управлением от 0 до 30 dB через 1 dB. Аттенюатор управляется программно и служит для ограничения мощных сигналов. Второй аналогичный аттенюатор включён далее по тракту и служит для выравнивания АЧХ и регулировки усиления в преселекторе, и в приёмнике в целом. Тип аттенюатора HMC624PL4 (Hittite Co.)

Ниже приводится таблица разбиения преселектора на поддиапазоны.

Таблица 2. Разбиение преселектора на поддиапазоны

Диапазон	Нижняя частота, MHz	Верхняя частота, MHz
1	20	36
2	36	52
3	52	84
4	84	132
5	132	228
6	228	372
7	372	612
8	612	1044
9	1044	1444
10	1444	1844
11	1844	2244
12	2244	2644
13	2644	3000

Смесители

Предпочтение отдаём классическому двойному балансному смесителю, имеющему наилучшие показатели по динамическому диапазону. Наиболее известный производитель, предоставляющий широкий выбор, - компания Mini-Circuits. Учитывая требуемый диапазон частот и динамику смесителя, выбираем в качестве первого смесителя ADE42MH, а в качестве второго - SYM-30DLHW.

Гетеродины и ПЧ

Выбор гетеродина и первой промежуточной частоты полностью взаимосвязаны. Гетеродин приёмника представляет собой синтезатор частоты, использующий ГУН – генератор управляемый напряжением с большим перекрытием диапазона частот (до октавы). Однако для управления таким ГУН требуется напряжение до 20 В и выше, что при низковольтном питании требует применения DC/DC преобразователя, помехи от которого крайне нежелательны. Кроме того, чувствительность, или крутизна, октавного ГУН по характеристике F = f(Uупр), где Uупр – напряжение, подаваемое на варикап, чрезвычайно высока. Без принятия специальных мер это приводит к значительному росту фазовых шумов гетеродина.

Увеличение же постоянной времени интегратора в цепи управления ГУН ведёт к замедлению скорости перестройки гетеродина, а скорость перестройки – немаловажный параметр для приёмника, решающего задачу обнаружения сигналов. Однако, идя на различные компромиссы, для перекрытия всего диапазона удобнее выбрать именно октавно перестраиваемый ГУН.

Анализ предложений показал, что подходящим вариантом может быть ГУН типа UMC1941 (RF Microdevices) с перекрытием по частоте от 1900 до 4100 МГц. При этом чтобы перекрыть весь диапазон частот до 3-х ГГц, пришлось использовать два значения промежуточной частоты (ПЧ) и, соответственно, строить два тракта 1-ой ПЧ:

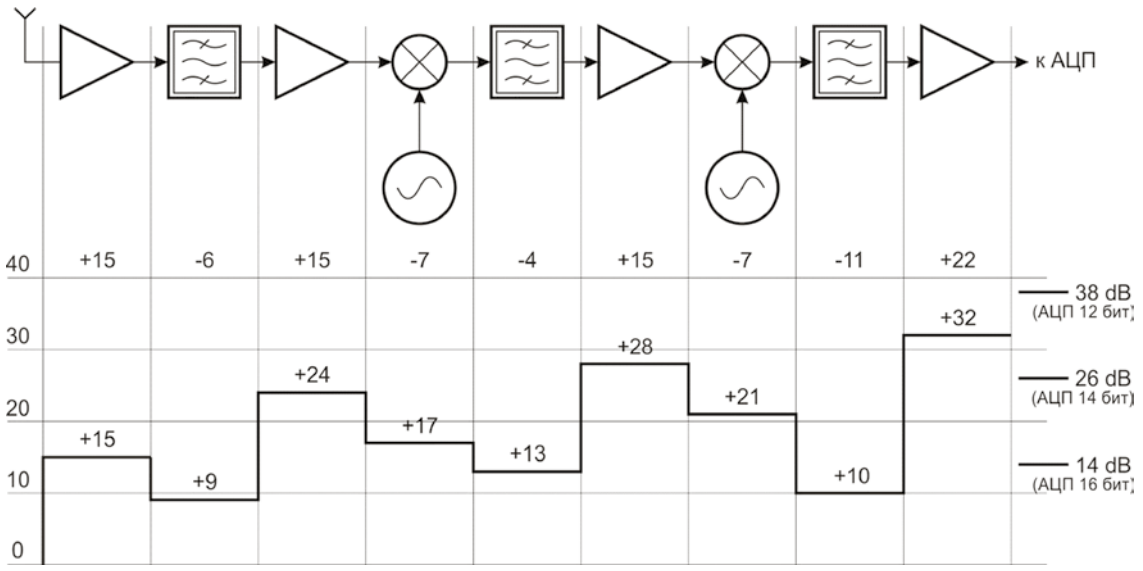

Рис. 4. Блок-схема приёмника с покаскадным усилением

- Fпч1 = 2140 МГц
- Fпч12 = 970 МГц.

Конечно, выбор конкретных значений частоты обусловлен также наличием фильтров ПАВ на эти значения частоты. Практически во всех современных приёмниках используются фильтры ПАВ как самые технологичные и имеющие стабильные повторяющиеся характеристики. Однако широкополосные фильтры ПАВ имеют значительные потери. В то же время пока альтернативы этим фильтрам не видно. В приёмнике используются: фильтр ПАВ типа SAWTEK855937 (производитель Trinquite) на центральную частоту 2140 МГц, имеющий полосу пропускания по – 3 dB 60 МГц, и фильтр типа АТ55115Н-970 (производитель АЕС г. Санкт-Петербург) с центральной частотой 970 МГц, имеющий полосу пропускания по – 3 dB 40 МГц.

Для первых восьми поддиапазонов (табл. 2) используется значение 1-ой ПЧ 2140 МГц, а для остальных поддиапазонов приёмника – 970 МГц.

Частота второго гетеродина определялась также доступностью фильтров ПАВ с подходящими характеристиками. Фильтр второй ПЧ формирует АЧХ тракта в целом, от его выбора зависят избирательность приёмника и, соответственно, уровень фильтрации нелинейных продуктов на выходе аналогового тракта.

В окончательном варианте приёмника используется фильтр типа SAWTEK854923 (производитель Trinquite) на центральную частоту 140 МГц, имеющий полосу пропускания по – 3 dB 24 МГц. В одном из вариантов использовался аналогичный фильтр ПАВ, но на центральную частоту 70 МГц. Потери в фильтре 2-ой ПЧ составляют 11,4 dB.

Усилители в тракте ПЧ необходимы для компенсации потерь в пассивных элементах и смесителях. Для выравнивания амплитудно-частотных характеристик используются аттенюаторы с цифровым управлением.

Общая блок-схема приёмника представлена на рис.4. Ниже указаны покаскадно коэффициенты усиления и потери в пассивных четырёхполюсниках – смесителях и фильтрах. Общий коэффициент усиления приёмника равен G = 32 dB. Ниже на том же рисунке показана диаграмма распределения усиления по тракту приёмника, а справа от диаграммы - рассчитанные выше требуемые коэффициенты усиления для различной разрядности АЦП.

Надо заметить, что расчёт усиления сделан для частот выше 1ГГц, где коэффициент усиления усилителя типа MGA53543 в среднем

равен 15 dB, во втором УПЧ усиление равно 22dB (140 МГц). Из приведённой диаграммы видно, что для 12 и 14 разрядного АЦП легко добиться требуемого усиления, используя дополнительные аттенюаторы, или усилители.

В случае применения 16 разрядного АЦП компенсация потерь в тракте становится сложной задачей, так как не существуют (не производятся) усилители с малым коэффициентом усиления, например 5-10 dB, а усилители с регулируемым усилением представляют собой обычные усилители с последовательно подключённым аттенюатором. Эта задача ещё сложней в нижней части диапазона, где усиление ещё больше.

Расчёты коэффициента шума NFпр приёмника показывают, что коэффициент шума по диапазону не превышает 12 децибел. Выбор усилителя с параметрами P1dB = 18 dBm и IP3 = 39 dBm гарантирует высокую динамику радиоприёмного тракта, что подтверждается при измерении этих параметров.

Огромную роль при разработке приёмника играют фазовые шумы гетеродина, иными словами аналоговый тракт не должен вносить существенных фазовых искажений для обеспечения возможности демодуляции сигналов с многопозиционной модуляцией, например, QPSRK и ему подобных. Однако эта тема требует отдельного рассмотрения, как и цифровая обработка, или цифровой приёмник.

Литература

1. *Understanding and enhancing sensitivity in receivers for wireless applications. Technical Brief SWRA030 / Edited by Matt Loy. - Texas Instruments Incorporated, 1999.*
2. *Cazzie Williams. Radio frequency design to support software transceiver for wireless communications. - Western Michigan University, MSGC 2001.*
3. *Kester W. Taking the mistery out of the infamous formula. - REV.0, 2005.*

Spectrum Jet

Поисковый анализатор спектра Spectrum Jet

- Сверхвысокая скорость сканирования
- Мгновенное обнаружение несанкционированных передатчиков
- Быстрая локализация в режиме поиска
- Режимы анализатора спектра и мониторинга
- Установленное ПО, управление пальцем – touch screen
- Встроенные антенны и комплект внешних направленных антенн
- Портативный, лёгкий, элегантный – вес 6,2 Кг
- Автономная работа до 3-х часов

Spectrum Jet – это высокоскоростной портативный поисковый анализатор спектра со встроенными антеннами, сконструированный специально для оперативного поиска несанкционированных передатчиков, радиоразведки и контроля каналов утечки информации.

Пользоваться им также удобно как планшетным компьютером. Spectrum Jet мгновенно готов к работе!

Диапазон частот	9 КГц – 19 ГГц
Скорость сканирования с разрешением 10 КГц	5 ГГц/сек
Полоса ПЧ	20 МГц
Коэффициент шума	не более 12 дБ
Динамический диапазон (SFDR)	Тип. 70 дБ
Уровень побочных продуктов (spurious)	-100 дБм
Усреднённый уровень шума	- 115 дБм

Компания «РАДИОСЕРВИС», тел. 495 627 57 17 www.radioservice.ru