

УДК 623.482:621.396.62

ПРИЕМНИК РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ РАЗВЕДКИ С ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛОВ

П.И. КОЗУБОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)*

E-mail: vizelpetr@gmail.com

Аннотация. Разработка приемника радиоэлектронной разведки с программно-определяемой обработкой сигнала направлена на создание компактного и гибкого устройства, способного в реальном времени перехватывать и анализировать радиосигналы в широком диапазоне частот с возможностью быстрой смены алгоритмов обработки без изменения аппаратуры. Такое устройство предназначено для специалистов подразделений радио- и технического контроля, а также мобильных групп, которым необходимо оперативно оценивать электромагнитную обстановку. Оно решает проблемы классических аналоговых приемников – жесткость архитектуры, сложность модернизации и высокое энергопотребление – за счет переноса основной обработки в цифровую среду, что обеспечивает скрытность, малые массогабаритные параметры и адаптивность к новым типам сигналов.

Abstract. The development of a software-defined signal processing electronic intelligence receiver is aimed at creating a compact and flexible device capable of real-time interception and analysis of radio signals in a wide frequency range with the ability to quickly change processing algorithms without changing the hardware. This device is intended for specialists in radio and technical control units, as well as mobile groups that need to quickly assess the electromagnetic environment. It solves the problems of classic analog receivers – rigid architecture, difficulty in upgrading, and high power consumption – by transferring the main processing to the digital environment, which ensures stealth, low weight and size, and adaptability to new types of signals.

Введение

Радиоэлектронная разведка (РЭР) является одним из основных источников информации о функционировании систем вооружения и связи. В последние годы плотность сигналов в эфире возросла настолько, что традиционные приёмники с жёсткой логикой перестали справляться: они медленно перестраиваются, не могут одновременно анализировать широкую полосу частот и плохо адаптируются к новым типам сигналов. Поэтому всё большее значение приобретают программно-определяемые решения, где обработка сигнала гибко настраивается под текущую обстановку. Данная работа посвящена разработке такого приёмника РЭР для диапазона 2..18 ГГц – одного из наиболее насыщенных радиолокационными системами [1].

Выбор архитектуры приемника

По ходу разработки были рассмотрены основные типы приёмников РЭР: кристаллический видеоприёмник (прост, но низкая чувствительность и избирательность), приёмник мгновенного измерения частоты (хорош для быстрого определения несущей, но не работает при наложении сигналов), супергетеродин (отличная чувствительность и избирательность, но узкополосен), многоканальный (идеален, но сложен и дорог), цифровой (гибок, но ограничен производительностью АЦП).

Компромиссным и наиболее подходящим для современных условий оказался супергетеродинный приёмник с цифровым понижающим преобразованием (DDC) по следующим причинам:

- он обеспечивает высокую чувствительность и избирательность за счёт фиксированной промежуточной частоты;

- программно-определяемая часть (DDC + ПЛИС) позволяет быстро перестраивать полосу анализа и адаптировать алгоритмы под неизвестные сигналы;

- в отличие от чистого цифрового приёмника, здесь не требуется оцифровывать весь диапазон 2..18 ГГц целиком – диапазон разбивается на поддиапазоны, что снижает требования к АЦП [3].

В разработанной структурной схеме (рисунок 1) входной сигнал сначала фильтруется и усиливается в аналоговом тракте, затем с помощью перестраиваемого гетеродина переносится в полосу промежуточной частоты (ПЧ). Весь рабочий диапазон 2..18 ГГц разбит на 20 поддиапазонов шириной по 800 МГц. Для каждого поддиапазона частота гетеродина выбирается так, чтобы сигнал после смесителя оказался в полосе ПЧ 2,1..2,9 ГГц (верхнее гетеродинирование). Далее сигнал оцифровывается, и в цифровом понижающем преобразователе выполняется перенос на нулевую частоту, фильтрация и децимация. На выходе DDC формируются квадратурные составляющие I/Q, которые затем обрабатываются в ПЛИС – выделяются узкие каналы шириной 50 МГц, измеряются мощность, длительность импульсов и мгновенная частота.

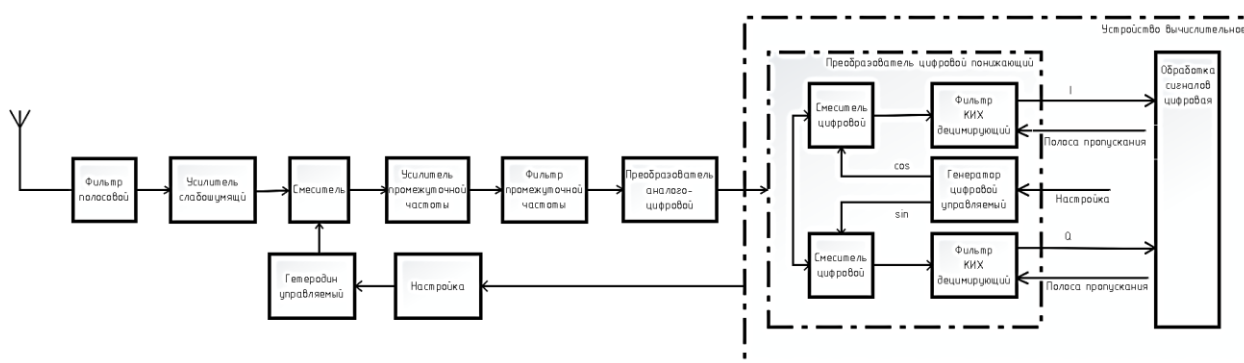


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемого приемника

Модель расчета чувствительности приемника

Для оценки технических характеристик приёмника была разработана модель-MATLAB для расчета оптимальных возможно реализуемых характеристик. По итогу моделирования получились следующие характеристики:

- тепловой шум в полосе поддиапазона 800 МГц составляет –85 дБм;
- приняв коэффициент шума аналогового тракта 5 дБ и требуемое отношение сигнал/шум 10 дБ, получаем чувствительность –70 дБм;
- максимальный уровень сигнала ограничен насыщением АЦП и выбран равным –10 дБм (с запасом 10..20 дБ). Отсюда динамический диапазон – 60 дБ;
- по теореме Найквиста для полосы 800 МГц требуется частота дискретизации не ниже 1,6 ГГц, в работе принято значение 2 ГГц (с запасом);
- исходя из допустимого ухудшения чувствительности за счёт шума квантования, получено минимальное эффективное число разрядов АЦП (ENOB) – 9,5 бит.

Для того чтобы убедиться, что рассчитанная чувствительность –70 дБм действительно обеспечивает обнаружение реальных радиолокационных сигналов на практически значимых дальностях, была построена модель линии связи. Учитывались: мощность передатчика РЛС, коэффициент усиления её антенны, потери при распространении в свободном пространстве (зависят от расстояния и частоты), атмосферные потери, усиление приёмной антенны (на БПЛА или самолёте), а также типичное ослабление сигнала по боковому лепестку (40 дБ), поскольку перехват происходит не по основному лучу РЛС [4]. Были смоделированы два характерных сценария:

1 РЛС зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) большой дальности. Рабочая частота ~10 ГГц (Х-диапазон), мощность передатчика 10 кВт, усиление антенны 44 дБи. При высоте приёмной антенны 2000 м (беспилотный летательный аппарат) и высоте антенны РЛС 10 м дальность прямой видимости составляет около 197 км. Модель показала, что сигнал превышает порог –70 дБм на расстоянии до 488 км (если бы не ограничение радиогоризонта), а с учётом горизонта – до 197 км. Таким образом, чувствительности достаточно для обнаружения на пределе радиовидимости. Результат представлен на рисунке 2.

2 РЛС ЗРК средней или малой дальности. Частота 4 ГГц (S/C-диапазоны), мощность передатчика ~38 дБВт (около 6 кВт). При тех же высотах дальность обнаружения по модели составила порядка 150 км – снижение примерно в 2,5 раза из-за меньшей мощности. При повышении частоты до 12 ГГц дальность дополнительно падает из-за увеличения потерь в атмосфере и свободном пространстве, однако остаётся в пределах 100–150 км, что подтверждает адекватность выбранной чувствительности. Результат представлен на рисунке 3.

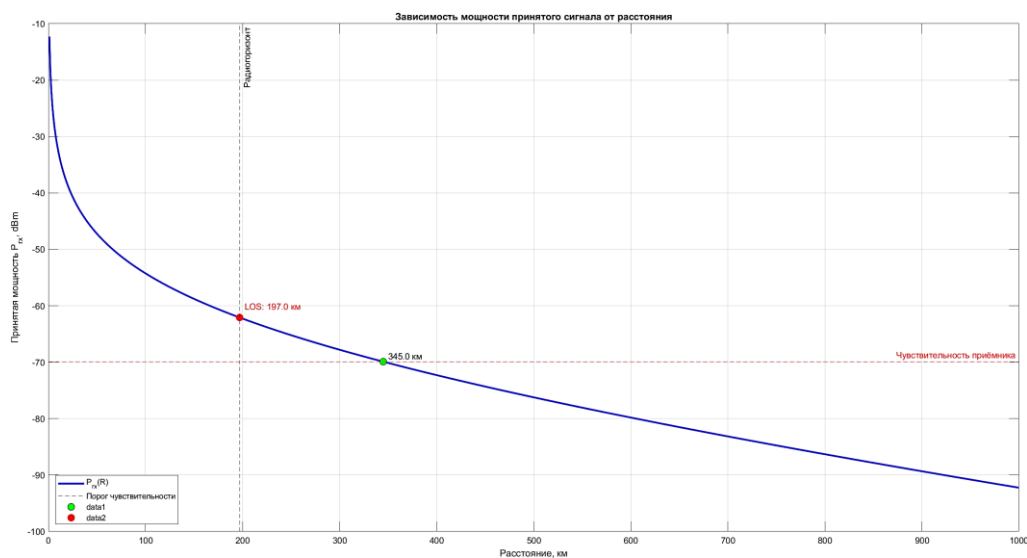


Рис. 2. Модель расчета расстояния РЛС комплекс ЗРК большого радиуса действия

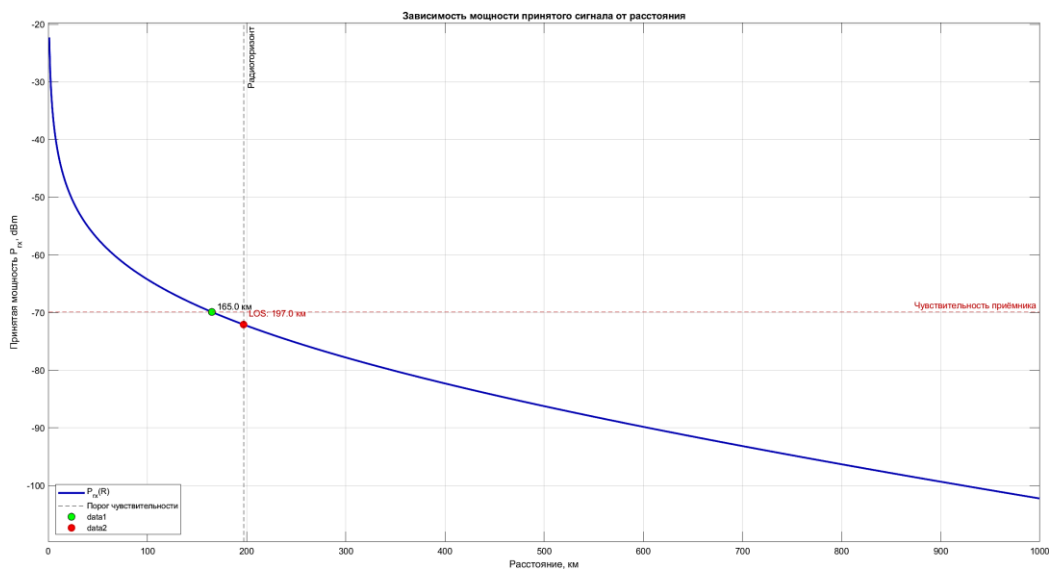


Рис.3. Модель расчета расстояния РЛС комплекс ЗРК среднего/малого радиуса действия

Результаты моделирования (рис. 2, рис. 3) показывают, что чувствительность -70 дБм является обоснованным компромиссом: она достаточно низка для перехвата сигналов РЛС различных типов на дистанциях в сотни километров, но при этом не требует чрезмерного усложнения аналогового тракта и АЦП.

Модель цифровой обработки обнаруженных сигналов

Создана интерактивная модель, которая позволяет проследить обработку сигнала от входа до получения разведпризнаков. Модель включает следующие этапы:

1 Генерация сигнальной обстановки. Формируются несколько источников: ЛЧМ-импульсы (полосы 0,5..4 МГц, длительности 120..600 нс), немодулированные зондирующие импульсы, а также аддитивный белый шум (тепловой шум приёмника -85 дБм в полосе 800 МГц и внешний шум -60 дБм);

2 Панорамный спектральный анализ. Строится спектр всего диапазона 2..18 ГГц (рисунок 4), метод Уэлча, окно Ханна). Поверх спектра наносятся 20 полупрозрачных прямоугольников, соответствующих поддиапазнам. Пользователь может кликнуть на любой прямоугольник – тем самым выбрать конкретное положение гетеродина.

3 Выделение поддиапазона и канала. При клике открывается окно с полосой ПЧ 2,1..2,9 ГГц, разбитой на 16 каналов по 50 МГц (рисунок 5). Выбор канала запускает процедуру цифровой обработки.

4 Цифровой понижающий преобразователь (DDC). Сигнал в выбранном канале переносится на нулевую частоту комплексным гетеродинированием, затем фильтруется идеальным ФНЧ (через БПФ-маску) и децимируется до частоты 60 МГц. В результате получаются синфазная (I) и квадратурная (Q) составляющие.

5 Измерение параметров. По огибающей I/Q-сигнала (после медианной фильтрации) определяется превышение порога -70 дБм. Фиксируются начало и конец импульса, вычисляется длительность. Средняя мощность импульса рассчитывается интегрированием квадрата огибающей. Мгновенная частота вычисляется как производная фазы комплексной огибающей, для ЛЧМ-сигналов дополнительно оценивается среднеквадратическая девиация частоты.

6 Визуализация. На экран выводятся: временные диаграммы I/Q и огибающей, спектр baseband (с пороговой селекцией – отображаются только бины выше порога), график мгновенной частоты, а также численные значения в диалоговом окне (рисунок 6).

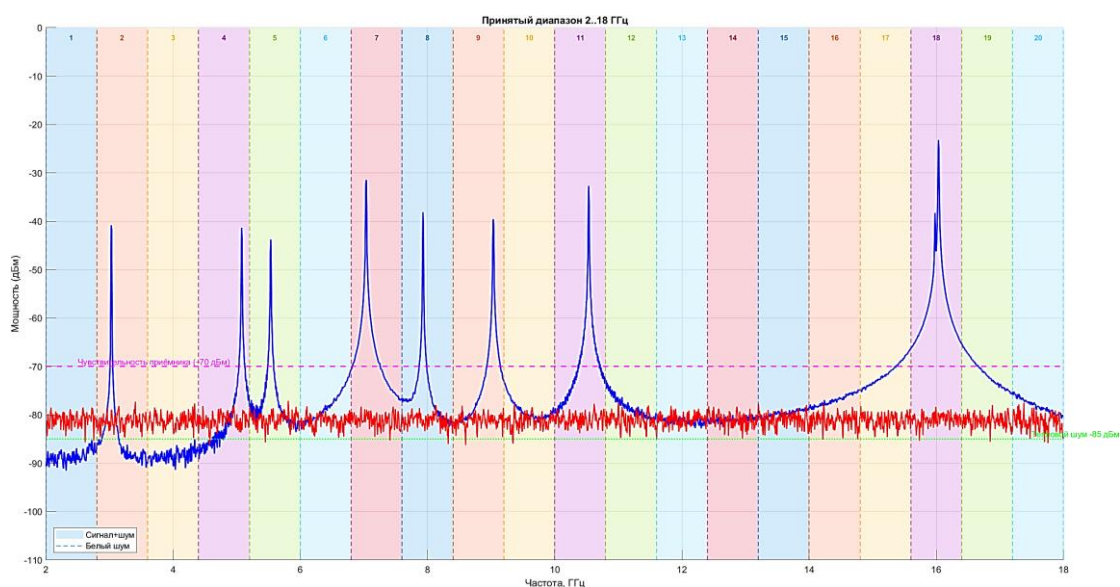


Рис. 4. Спектр всего диапазона 2..18 ГГц

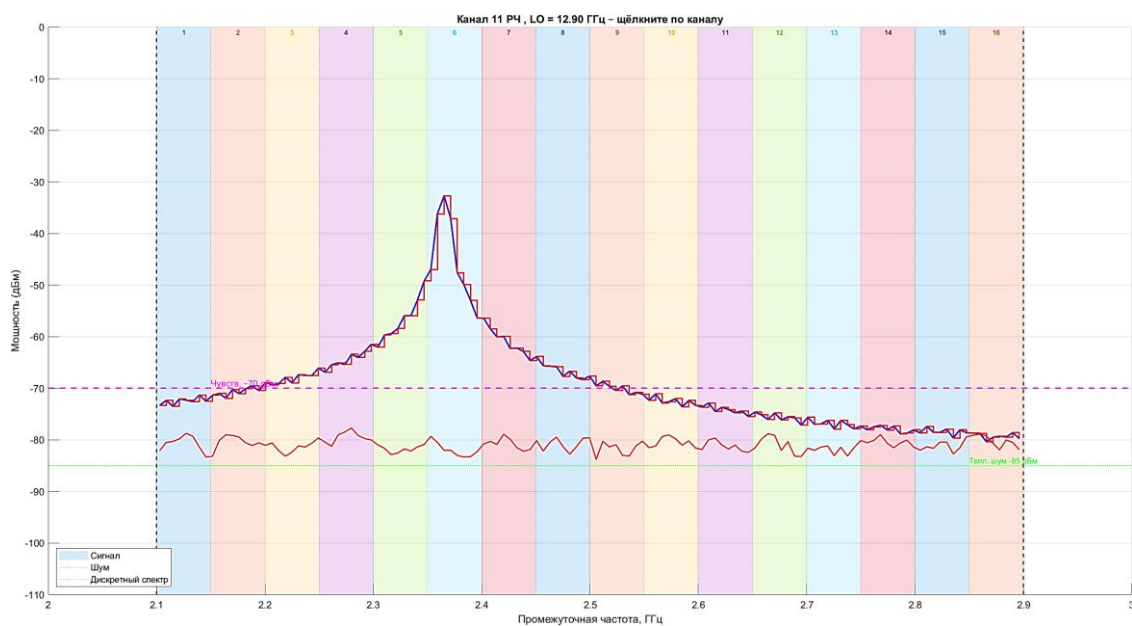


Рис. 5. Спектр сигнала перенесенного на ПЧ 2,1..2,9 ГГц

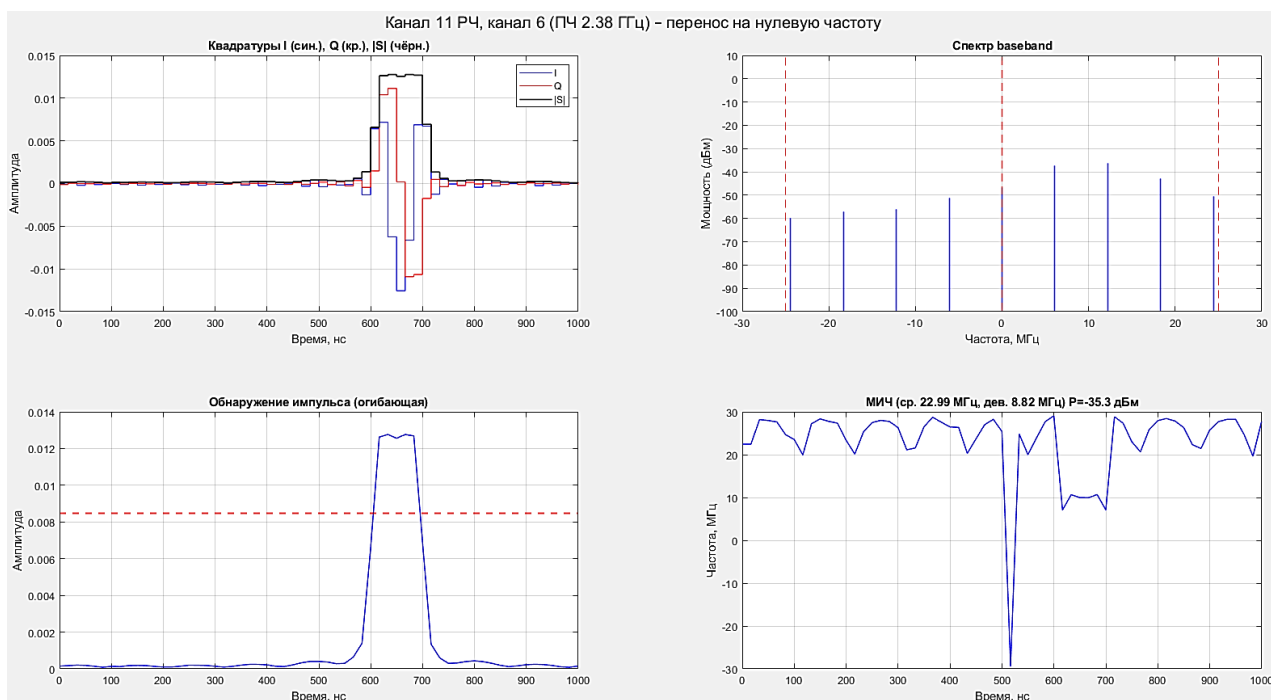


Рис. 6. Результаты цифровой обработки сигнала

Заключение

В работе обоснована архитектура приёмника РЭР – супергетеродин с цифровым понижающим преобразованием, позволяющая сочетать высокую чувствительность и избирательность с гибкостью программно-определяемых систем. Рассчитаны основные параметры: чувствительность -70 дБм, динамический диапазон 60 дБ, частота дискретизации 2 ГГц, ENOB 9,5 бит. Разработаны функциональная и принципиальная схемы, отражающие структуру аналогового и цифрового трактов. Создана MATLAB-модель, которая адекватно имитирует работу приёмника: от панорамного обзора до выделения узких каналов и измерения мощности, длительности и мгновенной частоты. Модель протестирована, погрешности не превышают 0,2 дБ по мощности и 2 нс по длительности. Данная модель может использоваться как прототип для отработки алгоритмов перед аппаратной реализацией на ПЛИС.

Список использованных источников

1. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.Воениздат, 2001. – 456 с., ил.
2. David L.A. EW101 a first course in electronic warfare / David L. Adamy. p cm. – (Artech House radar library).
3. Давыдов А. Б. Аналого-цифровые и цифровые устройства: метод. пособие / А. Б. Давыдов, М.В. Качинский, В. Б. Ключ. – Минск : БГУИР, 2007.
4. Гринкевич А. В. Радиолокация : учеб. пособие / А. В. Гринкевич. – Минск : БГУИР, 2015 – 190 с.