

УДК 621.37.037

# Приемник радиомониторинга источников радиоизлучений УКВ-диапазона частот

В статье предложен пример разработки мобильного приемника радиомониторинга источников радиоизлучений (ИРИ) УКВ-диапазона частот для контроля использования частотного ресурса. Так как наибольшее количество используемых радиостанций различными оперативными службами работают в УКВ-диапазоне частот от 30 до 512 МГц, то разработка оборудования данного класса является актуальной задачей [1]. Основные требования, которые учитывались при проектировании приемника: параллельный обзор пространства, повышение чувствительности радиоприемного тракта путем увеличения отношения сигнал/шум и разрешения по частоте при цифровой обработке сигналов от ИРИ, возможность определения пеленга на источник радиоизлучений; быстродействие при обнаружении и обработке радиосигналов от ИРИ; малые габариты и вес. Разработана схема приемного тракта, рассчитаны минимально необходимые параметры приемника для реализации поставленной задачи, такие как: рабочее отношение сигнал шум, разрешение по частоте, быстродействие Accelerated Processing Unit (APU) и размер быстрого преобразования Фурье Fast Fourier transform (FFT).

**А. Л. МАТЮШКОВ,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационных  
радиотехнологий

**Д. В. НОВИЦКИЙ,**  
аспирант кафедры информационных  
радиотехнологий

**И. Н. ЖУК,**  
аспирант кафедры информационных  
радиотехнологий

Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники

**Ключевые слова:**

Радиомониторинг, приемник  
УКВ диапазона, частотный  
ресурс, программно-  
определяемый приемник

**Введение.** Средства радиосвязи УКВ-диапазона частот нашли широкое применение у всех типов гражданских и военных служб во всем мире. Мобильный приемник радиомониторинга необходим для контроля интенсивности использования радиочастотного ресурса, выявления нелегальных радиопередатчиков, определения качества связи,

исследований побочных электромагнитных излучений и наводок.

**Основная часть.** Структурная схема разработанного приемника радиомониторинга представлена на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, приемник радиомониторинга состоит из следующих основных функциональных узлов: антенны, преселектора, АРУиПЧ

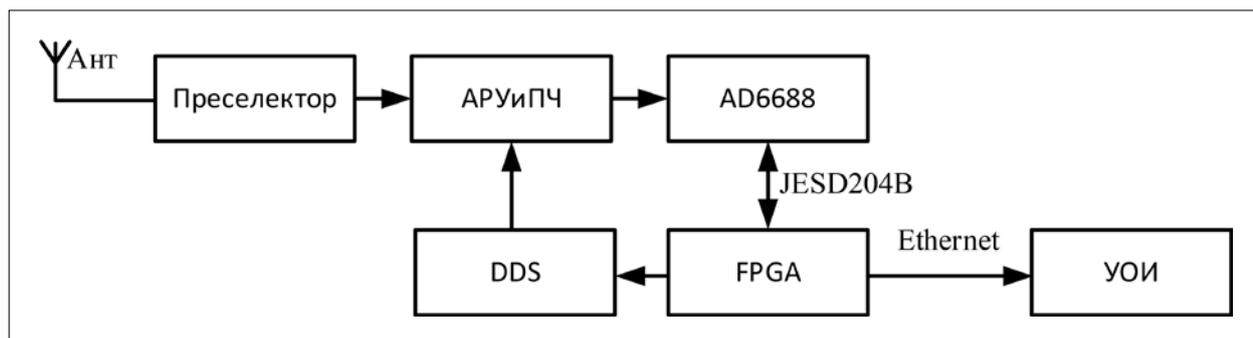


Рисунок 1 – Общая схема радиомониторинга УКВ-диапазона частот

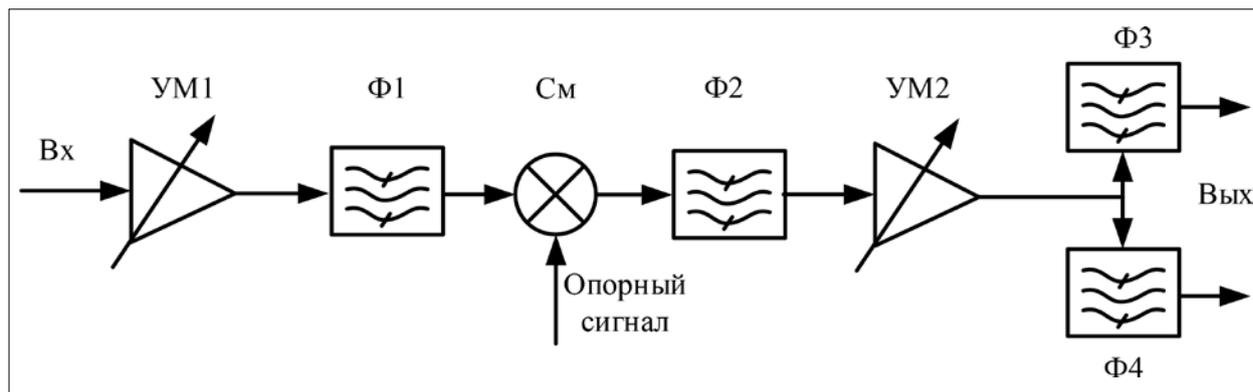


Рисунок 2 – Функциональная схема АРУиПЧ

(блок автоматической регулировки усиления и преобразования частоты), AD6688 (АЦП – аналого-цифровой преобразователь), DDS (Direct Digital Synthesizer – прямой цифровой синтезатор частоты), FPGA (ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема), УОИ (устройство отображения информации).

Ант – антенна. Для расчета и моделирования приемного тракта использовались параметры ультраширокой широкополосной логопериодической антенны П6-151. Характеристики данной антенны полностью удовлетворяют условиям поставленной задачи. Диапазон частот от 30 МГц до 6 ГГц может использоваться для задачи определения направления на источник излучения радиосигнала.

Преселектор состоит из входного широкополосного фильтра грубой селекции, с частотой пропускания 30–512 МГц.

АРУиПЧ предназначена для подстройки уровня сигнала до оптимальных значений, попадающих в динамический диапазон АЦП, и переноса сигнала на частоту обработки. Функциональная схема представлена на рисунке 2.

Сигнал с преселектора поступает на вход усилитель мощности (УМ1), который представлен в виде МШУ (маломощного усилителя мощности) с грубым шагом подстройки усиления. Чувствительность радиоприемного устройства определяется прежде всего входным усилителем, поэтому он должен быть маломощным, широкополосным и обладать линейной АЧХ (амплитудно-частотная характеристика), т. е. его усиление должно быть достаточным во всем диапазоне частот приемника. Далее он фильтруется проходя через полосовой фильтр (Ф1) и поступает на смеситель (См).

На смеситель 1 приходит сигнал с цифрового синтезатора частот (DDS – задающий управляемый генератор, на который приходит код изменения частоты от FPGA) с частотой 723 МГц (сигнал

гетеродина) и входной принятый сигнал. На выходе из-за нелинейности во время операции перемножения помимо двух сигналов суммы и разности, как у идеального смесителя, на выходе образуются суммы и разности всех частот кратных частотам входных сигналов и гармоники входных частот.

Далее сигнал поступает на полосовой фильтр 2 (Ф2), который предназначен для фильтрации паразитных спектральных составляющих выходного сигнала смесителя. Усилитель мощности 2 (УМ2 – усилитель промежуточной частоты) необходим для усиления сигнала и компенсации потерь в пассивных элементах смесителя.

Фильтры полосовые 3 и 4 (Ф3, Ф4) предназначены для разделения всего рабочего диапазона частот, от 753 МГц до 1235 МГц, на две полосы обработки, от 753 МГц до 994 МГц и от 994 МГц до 1235 МГц, для дальнейшей обработки на AD6688. Разделение сигнала на два канала осуществляется с целью снижения времени сканирования заданного диапазона частот и увеличения отношения сигнал/шум (SNR).

Основным блоком для преобразования сигнала является двухканальный приемник AD6688. В нем реализуется аналогово-цифровое преобразование, предварительная фильтрация и перенос цифрового сигнала на частоту обработки, децимация сигналов ПЧ, преобразования сигнала для обработки на FPGA с целью увеличения быстродействия. Принцип работы данного блока представлен на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, сигнал, имеющий полосу 241 МГц и частоту дискретизации 2,892 ГГц, с выхода АЦП поступает на ФНЧ (Ф1 и Ф2) для фильтрации побочных спектральных гармоник. Далее сигнал переносится на нулевую частоту (частоту обработки) на смесителях 1–4 (См1, См2, См3, См4). На смесители поступает сигнал с АЦП и сигнал цифрового управляющего генератора NCO (УГ), частота которого равна нижней частотной границе

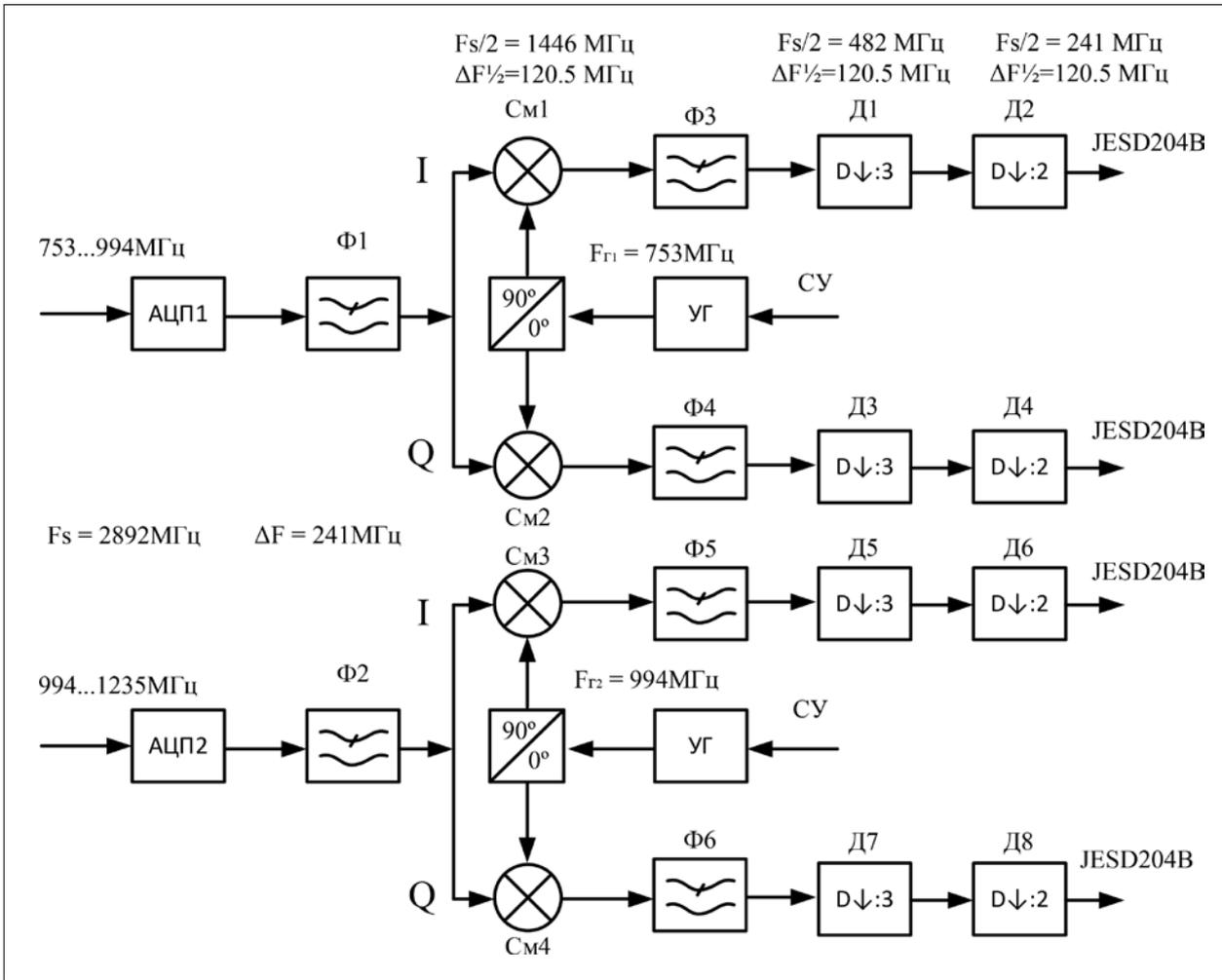


Рисунок 3 – Общая схема AD6688

спектра дискретизированного сигнала. На смесители 1 и 3 сигнал поступает со сдвигом на 90° для выделения квадратурной составляющей. Сигнал управления генератором (СУ) формируется автоматом управления, реализованном на FPGA [2]. Далее сигнал фильтруется от побочных спектральных составляющих на ФНЧ 3–6 (Ф3, Ф4, Ф5, Ф6) и поступает на дециматоры Д1–Д8 для уменьшения частоты дискретизации до значения  $2\Delta F$  (согласно критерию Найквиста) и снижения вычислительной нагрузки при обработке сигнала на FPGA. Окончательные характеристики сигнала на входе FPGA – частота дискретизации 241 МГц, полоса сигнала 120,5 МГц. Интерфейс обмена данными FPGA и AD6688 – JESD204B.

В качестве FPGA для реализации поставленной задачи достаточно использовать кристалл XILINX xc7z020. При реализации FFT средствами среды разработки Vivado для размера FFT 65536, «real time» схемы включения и 4-х каналов быстродействие преобразования будет равно 2,72 мс (данное значение было получено в среде разработки опытным

путем). Далее информация передается на УОИ через Ethernet для дальнейшего использования.

**Расчет основных характеристик.** Для оптимальной работы рассматриваемого приемника отношение «сигнал/шум» (SNR) на входе FPGA при аналогово-цифровом преобразовании равно 63,4 dB. Для увеличения отношения «сигнал/шум» при цифровой обработке сигнала дискретизация осуществляется на частоте в 6 раз большей, чем необходимо для восстановления огибающей сигнала. С учетом передискретизации сигнала SNR теоретически должно увеличиться согласно формуле:

$$\begin{aligned}
 \text{SNR}' &= 10\lg \frac{f_s}{2 \cdot \Delta F} = \\
 &= 10\lg \frac{2892 \cdot 10^6}{2 \cdot 241 \cdot 10^6} = 7,78 \text{ dB.}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Как видно из формулы 2, изменяя частоту дискретизации сигнала можно существенно улучшить

SNR, что эквивалентно увеличению чувствительности радиоприемного тракта [3]. Однако это улучшение ограничено аппаратной частью применяемой микросхемы AD6688, а именно фильтрами-дециматорами (деление частоты на 3 и 2, т. е. не более чем в 6 раз для данной реализации радиоприемника).

Поток данных на одной линии интерфейса JESD204В рассчитывается по формуле:

$$S = f_{s/12} \cdot n = 241 \cdot 10^6 \cdot 14 = 3.374 \text{ ГбитТс} \quad (3)$$

где  $n$  – разрядность АЦП, а  $f_s$  – частота дискретизации.

Разрешение по частоте при спектральном анализе источников радиоизлучений с помощью БПФ [Кестер] рассчитывается по формуле:

$$\Delta f_N = \frac{f_s}{N}, \quad (4)$$

где  $N$  – количество точек БПФ.

Для одной квадратуры преобразования сигнала рассматриваемой системы с  $f_s/2 = 241$  МГц и  $N = 65536$  точек разрешение по частоте будет равно:

$$\Delta f_N = \frac{241 \cdot 10^6}{65536} = 3677 \text{ Гц} \quad (5)$$

Этого более чем достаточно для обнаружения радиостанций с полосой сигнала, равной 12,5 кГц [4].

**Заключение.** Результаты расчетов и предлагаемая конфигурация приемника радиомониторинга УКВ-диапазона частот позволяют сделать вывод о возможности реализации мобильного приемника с повышенной чувствительностью за счет увеличения отношения «сигнал/шум», высоким быстродействием и разрешением по частоте при обнаружении ИРИ. Данное решение имеет невысокую цену, простоту реализации, небольшие габариты, а также гибкую систему настройки параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Chen, X., Yang, J., & Shi, L. X.** (2011). A fast locking all-digital phase-locked loop via feed-forward compensation technique. IEEE Transactions on.
2. Phase-Locked Loop Techniques-A Survey. Phase-Locked Loop Techniques-A Survey. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 43, NO. 6, DECEMBER 1996.
3. **William F., Egan Copyrigh.** Phase-Lock Basics, chapter 2. 2008 John Wiley & Sons, Inc.
4. **Xiang Gao**, Student Member, **Eric A. M. Klumperink**, Senior Member, **Gerard Socci**, Member, **Mounir Bohsali**, Member, and **Bram Nauta**. Spur Reduction Techniques for Phase-Locked Loops Exploiting A Sub-Sampling Phase Detector. IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 45, NO. 9, SEPTEMBER 2010.

*There was decided example of mobile receiver developing for radio researching of UHF radio emissions sources in this article. This one used for control frequency resource using. This kind of electronics developing of this class so actual because of more part of special communication system work in this frequency range, from 30 to 512 MHz. Main characteristics which were taken into account: parallel view of space, increasing the sensitivity of the receiving path because of improve signal-to-noise ratio (SNR) and frequency resolution with help digital signal processing (DSP), the ability to determine the bearing of the signal to the source of radio emissions, performance in detecting and processing radio signals, little size and weight.*

*There were developed scheme of receiver, calculated the minimum required parameters for decision of this goal. This one: SNR, frequency resolution, accelerated processing unit (APU) and size of Fast Fourier transform (FFT).*

**Keywords:** radio researching, UHF receiver, frequency resource, SDR receiver.

Получено 22.11.2022.