

УДК 621.396 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.2.38.43

Цифровая обработка сигналов с применением RTL-SDR-приемника на примере ЧМ-сигнала

И. Р. Губайдуллин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Т. Т. Мамедов, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрен прием частотно-модулированных сигналов с помощью программно-определяемого радиоприемного устройства на основе аппаратной и программной платформ проекта RTL-SDR, с последующей демодуляцией в среде MATLAB. Рассмотрен принцип работы и математическая модель SDR-приемника. В математической модели описываются процессы приема и обработки, происходящие в приемнике до дискретизации входного сигнала. В экспериментальной части описан процесс приема и обработки в среде MATLAB частотно-модулированного сигнала одной из московских радиостанций, представленного в виде дискретных отсчетов синфазной и квадратурной составляющих. Применение RTL-SDR-приемника в совокупности с математическим пакетом MATLAB позволяет осуществлять программную цифровую обработку сигналов, результатом которой стало воспроизведение передаваемой аудиоинформации в прямом эфире.

Ключевые слова: программно-определяемое радио (SDR), цифровая обработка сигналов (digital signal processing), ЧМ-сигнал (FM-signal)

Digital Signal Processing Using an RTL-SDR Dongle by the Example of FM signal

I. R. Gubaydullin, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

T. T. Mamedov, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article describes the reception of frequency-modulated signals using a software-defined radio (SDR) receiving device based on hardware and software platforms of the RTL-SDR project, and the following demodulation of the signal in the MATLAB environment. The principle of operation and the mathematical model of the SDR receiver are considered. The mathematical model describes the process of signal reception and processing that occurs in the receiver prior to the sampling of the input signal. The experimental part describes the process of receiving and processing the frequency-modulated signal of one of Moscow radio stations presented as discrete samples of the in-phase and quadrature component in the MATLAB environment. The use of RTL-SDR receiver in conjunction with the MATLAB mathematical software allows software-based digital signal processing, which resulted in the reproduction of the transmitted audio information in the live broadcast.

Keywords: Software-defined radio (SDR), digital signal processing, FM-signal

Введение

Программно определяемое радио (software defined radio, SDR) — это технология, позволяющая программно изменять радиочастотные параметры приемника. В последние 20 лет программно определяемое радио вызывает большой интерес у исследователей и разработчиков [1]. Такие устройства отличаются возможностью реализации функций физического уровня программным способом, что обеспечивает осуществление обработки различных типов сигналов без изменения аппаратной части. С появлением дешевых приемных устройств интерес к этой технологии возрос еще больше, поскольку она позволяет создать дешевое радио, работающее в диапазоне от десятков мегагерц до единиц гигагерц.

В данной статье рассмотрено применение RTL-SDR и среды MATLAB для приема и демодуляции частотно-модулированных сигналов.

Описание RTL-SDR

В общем случае в состав SDR входят: приемная антенна, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразователь частоты, средство обработки сигнала. Средством обработки сигналов может быть как ПЛИС, так и сигнальный процессор. В рассматриваемом случае обработка сигналов осуществлялась с помощью персонального компьютера.

При создании SDR важно понимать, какие функции выполняются аппаратно, а какие возможно выполнять программно. Упрощенная структурная схема RTL-SDR-приемника может быть представлена последовательным соединением двух чипов: Raphael Micro R820T и Realtek RTL2832U (рис. 1).

Микросхема R820T выполняет роль радиоприемника, работающего по супергетеродинному принципу в диапазоне частот от 24 МГц до 1850 МГц.

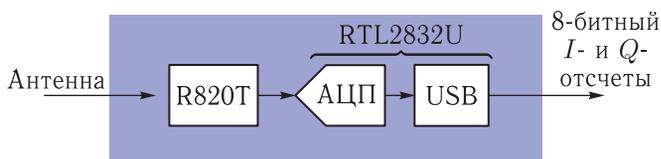


Рис. 1. Структурная схема RTL-SDR

Микросхема соответственно осуществляет: усиление, полосовую фильтрацию, перенос на промежуточную частоту 3,57 МГц [2] и низкочастотную фильтрацию. При работе с R820T необходимо задать центральную частоту f_c и коэффициент усиления G .

Известно, что чип RTL2832 содержит АЦП с частотой дискретизации 28,8 МГц, цифровые осцилляторы и прореживающие фильтры нижних частот. На выходе микросхемы формируются и передаются по USB-интерфейсу 8-битные отсчеты синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих сигнала. Частота дискретизации выходных отчетов задается программно и может составлять до 2,8 МГц.

На этом аппаратная часть SDR заканчивается и последующие операции, такие как фильтрация, демодуляция, детектирование сигнала, реализуются программно.

На рис. 2 изображена функциональная схема RTL-SDR-приемника [3].

В систему поступает входной сигнал $r(t)$:

$$r(t) = s(t) + N(t), \quad (1)$$

где $N(t)$ — шумовая составляющая сигнала, а $s(t)$ — полезный сигнал.

Входной сигнал поступает на малошумящий усилитель, основная задача которого заключается в усилении сигнала без искажений. Усиленный сигнал смешивается с сигналом гетеродина s_r :

$$s_r = e^{-j2\pi f_c t}.$$

Таким образом, происходит перемножение усиленного входного сигнала с сигналом гетеродина, работающего на отрицательной частоте несущей. Иллюстрация этого процесса представлена на рис. 3.

На выходе смесителя сигнал может быть представлен в комплексной форме, т. к. [4]

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta.$$

После смесителя сигнал поступает на встроенный фильтр нижних частот (ФНЧ), где отдельно фильтруются действительная и мнимая части сигнала, т. е. фильтром отбрасывается высокочастотная часть, образуемая при перемножении двух сигналов.

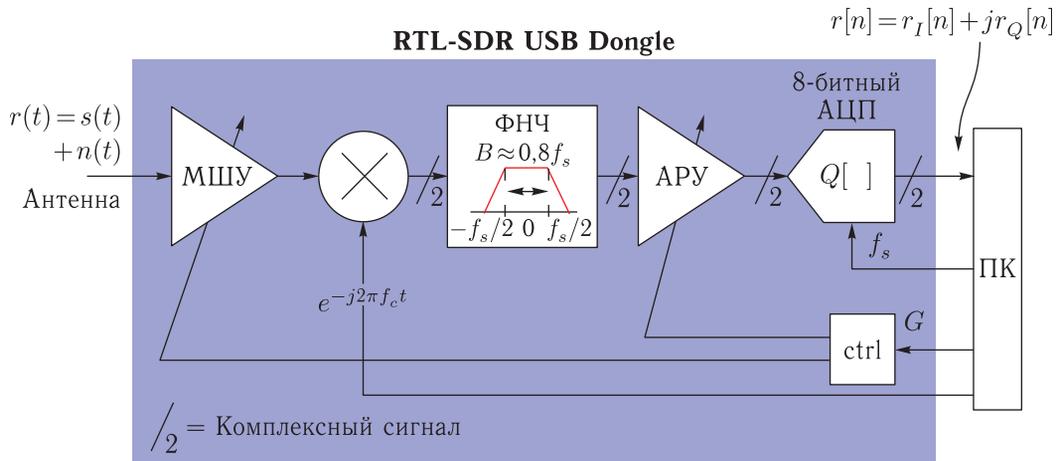


Рис. 2. Функциональная схема RTL-SDR-приемника

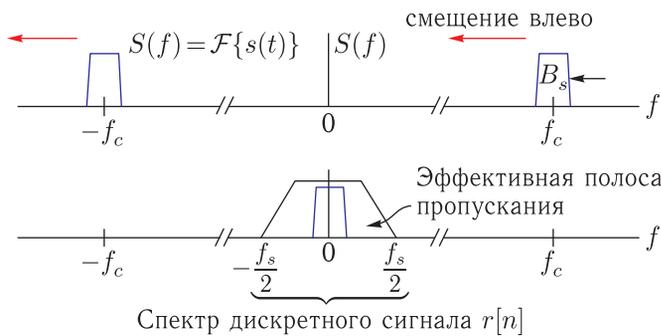


Рис. 3. Перенос сигнала на «нулевую» частоту

В дискретной форме сигнал можно описать следующим образом [5]:

$$r[n] = G \cdot LP\{r(t)e^{-j2\pi f_c t}\}_{t=n/f_s},$$

где LP — передаточная функция ФНЧ.

В частотной области сигнал описывается в виде

$$R(f) = G \cdot R(f + f_c) \cdot H_{LP}(f).$$

Последним элементом обработки сигнала для получения отсчетов синфазной и квадратурной составляющих является 8-разрядный АЦП. Выходной сигнал с АЦП описывается суммой сигналов:

$$r[n] + N[n] = (r_I[n] + jr_Q[n]) + (N_I[n] + jN_Q[n]).$$

Выходной сигнал в виде потока 8-битных отсчетов поступает с RTL-SDR-приемника по USB-интерфейсу, которые могут быть обработаны в среде MATLAB.

Анализ возможностей и перспективы применения RTL-SDR рассматриваются на примере приема и обработки частотно-модулированного сигнала с помощью MATLAB [6].

В среде MATLAB использовался дополнительно устанавливаемый пакет для работы с RTL-SDR-приемником — «Communications System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio», в котором предусмотрены средства, обеспечивающие взаимодействие с RTL-SDR и библиотекой цифровой обработки сигналов — ЦОС. Данный пакет позволяет принимать оцифрованный сигнал, для получения которого необходимо задать несущую частоту и частоту дискретизации. Затем сигнал в виде массива комплексных чисел поступает на дискриминатор, где выполняются вышеуказанные операции.

Частотная модуляция — это вид аналоговой модуляции, при котором информационный сигнал управляет частотой несущего колебания, при этом производная от фазового отклонения пропорциональна информационному сигналу [7]. Частотно-модулированный сигнал описывается выражением

$$\begin{aligned} x_c(t) &= A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi(t)) = \\ &= A_c \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_d \int_{-\infty}^t m(t) dt\right), \end{aligned}$$

где k_d — коэффициент модуляции, $m(t)$ — модулирующий сигнал.

Принятые частотно-модулированные сигналы попадают на комплексный полосовой дискрими-

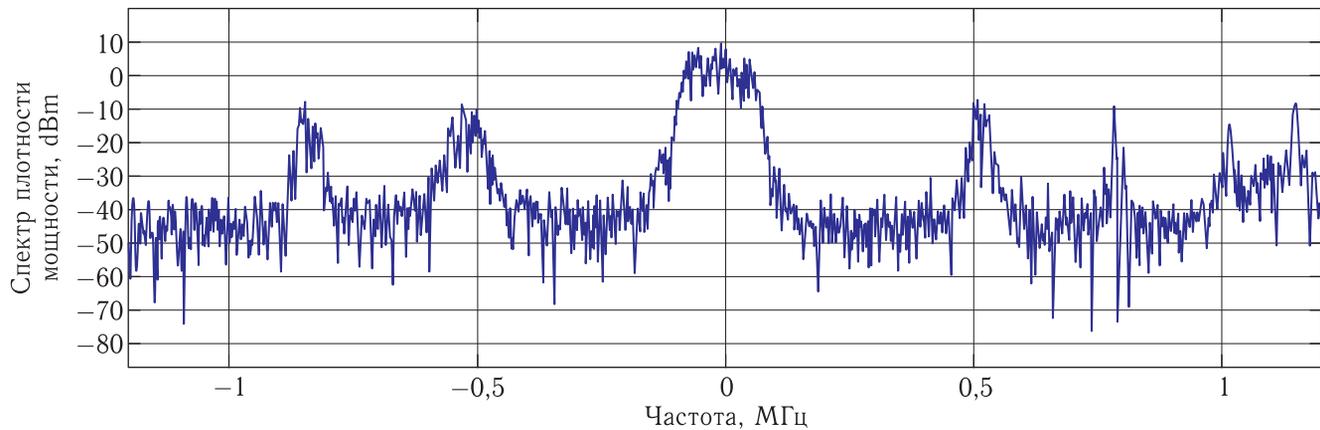
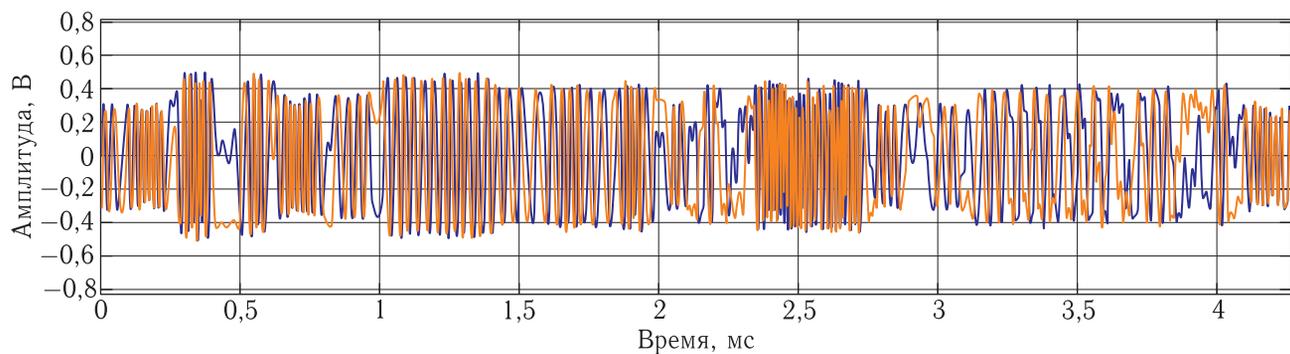


Рис. 4. Спектр входных сигналов

Рис. 5. I - и Q -составляющие входных сигналов

натор, известный также как квадрикоррелятор. На выходе квадрикоррелятора формируются действительная и мнимая части принятого сигнала:

$$\begin{aligned} x'_c(t) &= \cos(2\pi\Delta ft + \varphi(t)) + j \sin(2\pi\Delta ft + \varphi(t)) = \\ &= x_I(t) + jx_Q(t), \end{aligned}$$

где Δf — ошибка по частоте, возникающая при переносе сигнала на «нулевую» частоту.

Приведенные выше выражения касаются систем непрерывного времени, поскольку речь идет о дискретных системах. Дальнейшие выкладки касаются реализации цифровой системы обработки сигналов, поступающих с приемника RTL-SDR.

В ходе работы был реализован следующий алгоритм демодулятора, выполненный в среде разработки MATLAB.

Поступающие с выхода RTL-SDR сигналы можно выразить следующим образом:

$$r[n] = (r_I[n] + N_I[n]) + j(r_Q[n] + N_Q[n]).$$

Спектр плотности мощности входных сигналов изображен на рис. 4 [8]. В качестве центральной частоты использовалась частота одной из FM-радиостанций в г. Москве.

На вход дискриминатора поступают два потока дискретных сигналов: квадратурная и синфазная составляющие сигнала (рис. 5).

Дискриминатор выполняет параллельно две операции: формирование комплексно-сопряженных сигналов и формирование задержанных на один такт сигналов (рис. 6).

В среде MATLAB сопряженный сигнал формируется функцией *conj*, а задержанный сигнал формируется функцией *delayseq* [6]. Далее осуществляется перемножение сигналов s_3 и $s_{\text{сопр}}$. В результате формируется сигнал фазового детектора $s_{\text{ФД}}$ (см. рис. 7), описываемый выражением [9]:

$$s_{\text{ФД}}[n] = s_3[n] \times s_{\text{сопр}}.$$

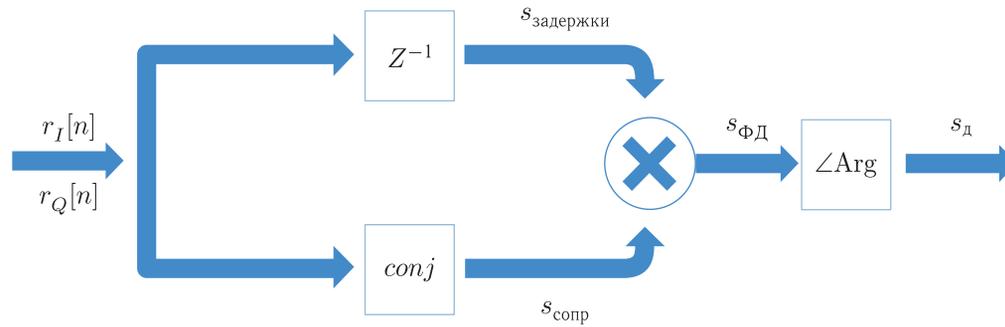


Рис. 6. Схема дискриминатора

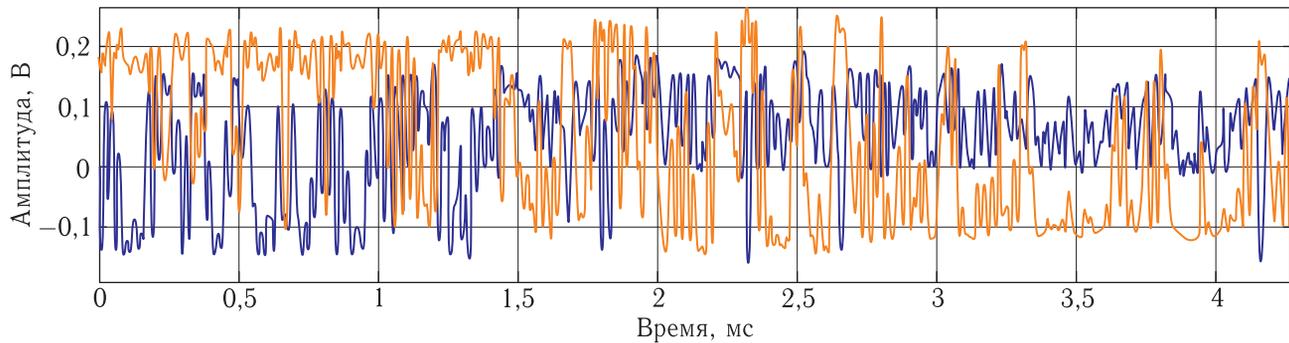
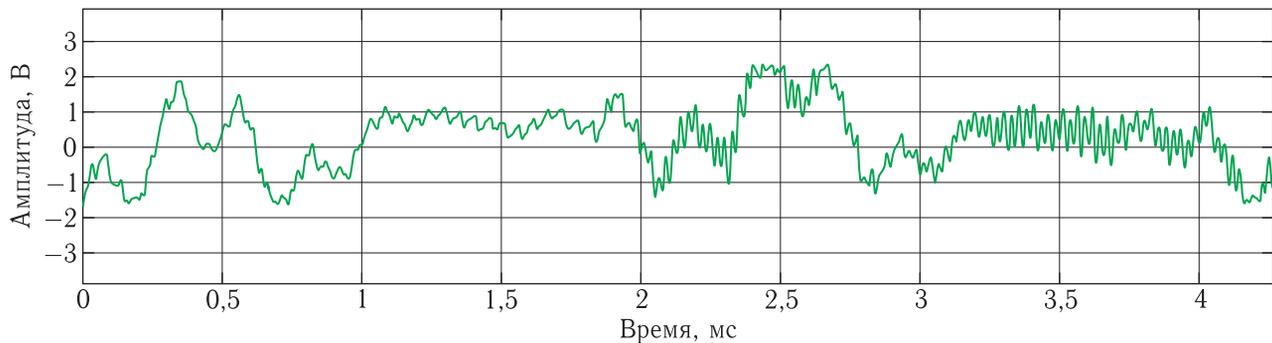
Рис. 7. Сигнал фазового детектора $s_{\text{ФД}}$ 

Рис. 8. Сигнал на выходе дискриминатора

Арктангенс от отношения мнимой составляющей $s_{\text{ФД}}$ к действительной равен мгновенной фазе и соответствует информационной составляющей принятого сигнала. MATLAB позволяет вычислять арктангенс с помощью функции *atan*, которой в качестве аргументов подается действительная и мнимая составляющие $s_{\text{ФД}}$; данная операция выполняется для каждого элемента массива. На выходе дискриминатора текущее значение сигнала можно записать:

$$s_{\text{д}}(t) = \angle s_{\text{ФД}}(t).$$

В итоге на выходе системы будет сформирован дискретный сигнал $s_{\text{д}}[n]$:

$$s_{\text{д}}[n] = \angle \{ (r_I[n] - r_Q[n]) \times (r_I[n-1] - r_Q[n-1]) \}.$$

Далее осуществляется передискретизация сигнала и его воспроизведение на звуковых динамиках с помощью функции *sound* [10]. Выходной сигнал системы отображен на рис. 8.

В результате при проведении вышеуказанных действий в ходе эксперимента из динамиков ПК была воспроизведена музыка, соответствующая той

радиостанции, несущая частота которой выбиралась в качестве центральной для RTL-SDR-приемника.

Заключение

В данной работе рассмотрены устройство и математическая модель RTL-SDR-приемника. Рассмотрен алгоритм демодуляции частотно-модулированного сигнала, генерируемого радиостанцией и принятого с помощью RTL-SDR-приемника, с последующей цифровой обработкой сигнала в системе моделирования MATLAB. Полученные результаты показали, что использование RTL-SDR-приемника в сочетании со средой MATLAB позволяет применять легко настраиваемые алгоритмы цифровой обработки сигналов для нужд радиосвязи.

Список литературы

1. *Stewart R., Kenneth B., Atkinson D., Crockett L.* Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR, Glasgow: Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde, 2015. https://www.researchgate.net/publication/287760034_Software_Defined_Radio_using_MATLAB_Simulink_and_the RTL-SDR (Дата обращения 24.05.2019).
2. *Kadman W.* R820T Rafael Micro-High Performance Low Power Advanced Digital TV Silicon Tuner, March 2013. https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked.pdf (Дата обращения 24.05.2019).
3. Communication System Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio. User guide. Mathworks, 2013. <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/rtlsdradio/> (Дата обращения 24.05.2019).
4. *Харкевич А. А.* Основы радиотехники. 3-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 512 с.
5. *Rice M.* Digital Communications: A Discrete-Time Approach. New Jersey: Pearson Education, 2009. 800 p.
6. *Дьяконов В. П.* MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2010. 976 с.
7. *Shima J.* FM Demodulation Using a Digital Radio and Digital Signal Processing, University of Florida, 1995. 88 p. <https://filepursuit.com/file/7632660-FM-Demodulation-Using-a-Digital-Radio-and-Digital-Signal-Processing-James-Michael-Shima-1995-pdf/> (Дата обращения 24.05.2019).
8. *Poularikas A.* Understanding Digital Signal Processing with MATLAB and Solutions, Boca Raton: CRC Press, 2018. 472 p.
9. *Сергиенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов: Учеб. для вузов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2007. 751 с.
10. *Дьяконов В. П.* MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.