

УДК 621.376

## Разработка установки и проведение исследований характеристик радиомодулей, работающих в нелицензируемых диапазонах частот

*А.Я. Суранов*

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

## Development of the Facility and Performance Studies Radio Modules Operating in Unlicensed Frequency Bands

*A.Y. Suranov*

Altai State University (Barnaul, Russia)

Описана установка и приведены результаты исследования некоторых характеристик модуля трансивера RFM69CW, работающего в нелицензируемом диапазоне частот. Управление режимом работы модуля и установка его параметров осуществлялись по программно реализованному интерфейсу SPI с помощью реконфигурируемого блока ввода/вывода myRIO, а регистрация сигналов и спектров — с помощью векторного трансивера NI PXIe-5644R. Программное обеспечение установки разработано в среде LabVIEW. Приведены блок-диаграммы программ конфигурирования радиомодуля и демодуляции FSK- и OOK-сигналов.

Показано изменение формы сигнала и соответствующие изменения спектра радиосигнала при изменении параметров настройки модуля в режиме передачи GFSK- и OOK-сигналов (On-Off Keying). Обнаружена немонотонность характеристики зависимости выходной мощности передатчика от установленной мощности.

Полученные результаты могут использоваться для оценки других характеристик и других видов радиомодулей, а также в учебном процессе в качестве основы лабораторных работ по курсу «Техника приема и обработки сигналов».

**Ключевые слова:** радиомодуль, нелицензируемый диапазон частот, интерфейс SPI, демодуляция FSK- и OOK-сигналов, анализ спектра радиосигнала.

DOI 10.14258/izvasu(2018)4-07

### Введение

Радиомодули, работающие в нелицензируемых (ISM) диапазонах частот, находят широкое применение в системах автоматического сбора показаний счетчиков энергоресурсов, в беспроводных сенсорных сетях, в домашней автоматике и т.п. [1–5]. Как правило, такие радиомодули имеют большой набор программируемых параметров и режимов работы. В качестве примера подобных устройств можно назвать радиомодули

The installation is described and the results of the study of some characteristics of the RFM69CW transceiver module operating in the unlicensed frequency range are presented. Controlling the mode of operation of the module and setting its parameters were carried out via a software-implemented SPI interface with the reconfigurable myRIO I/O block, and the signals and spectra were recorded using the NI PXIe-5644R vector transceiver. The installation software is developed in the LabVIEW environment. The block diagrams of the programs for configuring the radio module and demodulating FSK and OOK signals are presented.

The change in the waveform and the corresponding changes in the radio signal spectrum are shown when the module settings in the GFSK and OOK signal transmission mode are changed. A nonmonotonicity of the dependence of the output power of the transmitter on the installed power is found. The results obtained can be used to evaluate other characteristics and other types of radio modules, as well as in the educational process as a basis for laboratory work on the course "Signal reception and processing technique".

**Key words:** radio module, unlicensed frequency range, SPI interface, FSK and OOK signal demodulation, spectrum analysis of the radio signal.

серии RFM компании HopeRF, имеющие более 80 настраиваемых параметров [6].

Для эффективного использования данных радиомодулей необходимо иметь полную информацию не только о возможных настройках таких устройств, но и о влиянии этих настроек на основные параметры радиотракта, в частности на ширину спектра радиосигнала и выходную мощность. Однако в доступной справочной

документации [6] такая информация не приводится, что делает необходимым экспериментальное измерение указанных характеристик. Отметим, что, помимо прикладного назначения, экспериментальная оценка характеристик сигнала радиомодулей имеет высокую учебную ценность, поскольку позволяет студентам наглядно увидеть связь между устанавливаемыми параметрами и параметрами спектра радиосигнала.

#### Экспериментальная установка

Для решения данной задачи необходимо включить в состав экспериментальной установки аппаратные и программные средства как для управления режимами и параметрами радиомодулей, так и для измерения характеристик их сигналов. В идеале две эти системы должны работать согласованно, чтобы обеспечивать отображение радио- и демодулированных сигналов в реальном времени сразу после изменения режимов работы радиомодулей. Для дальнейшего уточнения требований к установке необходимо учесть, что основным интерфейсом модулей серии RFM является интерфейс SPI, а спектр излучения модулей может находиться в различных участках ISM-диапазона — от 315 МГц до 915 МГц.

Несмотря на то что в настоящее время наиболее широко интерфейс SPI применяется для связи с периферийными устройствами платформы Arduino, более перспективным представляется использование для реализации SPI имеющихся во многих учебных заведениях блоков реконфигурируемого ввода-вывода (RIO) [7]. Перспективность такого решения обусловлена возможностью использования единой среды программирования LabVIEW [8] как для управления режимами работы радиомодуля, так и для радиочастотного оборудования компании National Instruments, которое может применяться при измерении временных и спектральных параметров радиоизлучения.

Целью данной работы является разработка установки на базе блока NI myRIO и векторного трансмиттера NI PXIe-5644R [9] для исследования характеристик радиомодулей, работающих в нелицензируемых диапазонах частот. В качестве примера такого устройства был выбран радиомодуль RFM69CW. Вид разработанной экспериментальной установки показан на рисунке 1.

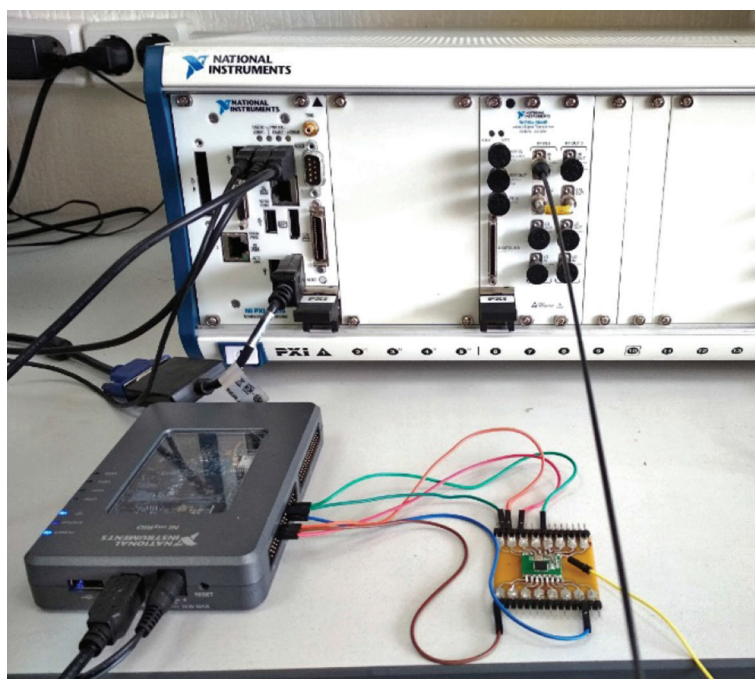


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки для исследования модулей RFM69CW

#### Программное обеспечение

Программное обеспечение установки разработано в среде LabVIEW и включает программы обработки сигнала трансмиттера и программу управления работой радиомодуля. Основным элементом програм-

мы управления радиомодулем является программа его конфигурирования. Блок-диаграмма программы конфигурирования на основе функции SPI, входящей в состав функций работы с myRIO, приведена на рисунке 2.

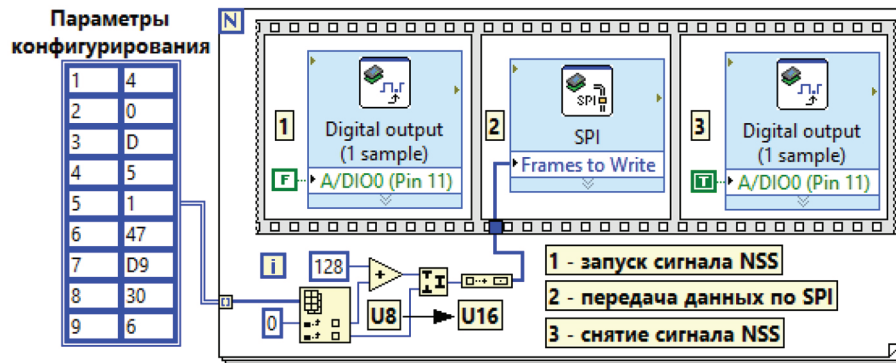


Рис. 2. Блок-диаграмма программы конфигурирования радиомодуля RFM69CW

Параметры конфигурирования для наглядности представлены в виде числового двумерного массива, где в первом столбце находятся адреса регистров, а во втором — их значения. Каждая такая пара адрес-значение вводится в цикл, и в каждой итерации цикла выполняется выделение отдельных значений с последующим объединением двух байтовых значений в одно 16-битовое слово. Добавление 128 к значению адреса необходимо для занесения 1 в старший бит слова, что указывает на операцию записи данных.

В реальной программе все конфигурируемые параметры (несущая частота, скорость передачи, девиация частоты и т.д.) задавались в виде естественных значений и затем пересчитывались

в отдельные байтовые значения, аналогичные приведенным в массиве.

Для регистрации радиосигнала модулей использовался векторный трансивер PXIe-5644R, работающий в диапазоне 65 МГц — 6 ГГц, что перекрывает весь диапазон частот ISM. Трансмиттер также работает под управлением штатного программного обеспечения на LabVIEW и может выдавать спектр мощности или два квадратурных сигнала. При этом демодуляция FSK- или ASK-сигналов может быть выполнена с помощью пакета Modulation Toolkit [10] или собственной программы, что более продуктивно для достижения учебных целей. Пример блок-диаграммы собственной программы демодуляции FSK- и OOK-сигналов показан на рисунке 3.

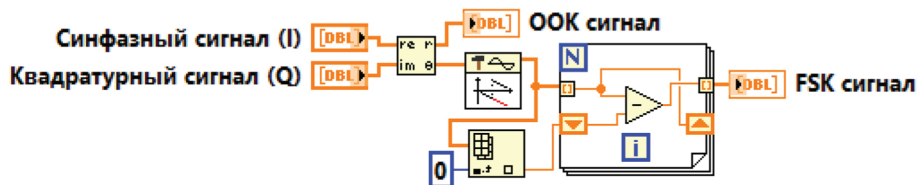


Рис. 3. Блок-диаграмма программы демодуляции FSK- и OOK-сигналов

Программа объединяет два квадратурных сигнала в комплексный сигнал, из которого выделяет огибающую и мгновенную фазы. Огибающая используется далее для детектирования OOK-сигнала, а сигнал мгновенной фазы после числового дифференцирования дает значения мгновенной частоты, пропорциональные модулирующему сигналу.

#### Результаты исследования характеристик радиомодуля

С помощью разработанного программного обеспечения были проведены следующие исследования характеристик радиосигнала модулей RFM69:

1. Исследование формы FSK- и GFSK-сигналов и ширины их спектра от значения коэффициента сглаживания BT Гауссовского фильтра.

Коэффициент сглаживания BT используется для регулирования степени сглаживания модулирующих импульсов на стороне передатчика и, соответственно, ширины спектра радиосигнала. Выражение для импульсной характеристики Гауссовского фильтра выглядит следующим образом [7, с. 66]:

$$h(t) = \sqrt{\frac{BT}{\pi}} e^{-\frac{BT}{\pi} t^2},$$

где B — полоса пропускания фильтра на уровне -3 дБ, T — длительность импульса.

На рисунке 4 показан вид демодулированных сигналов бинарной FSK (без сглаживания, BT = ∞) и бинарной GFSK при коэффициенте сглаживания BT = 0,5. Скорость передачи данных была равна 9600 бод.

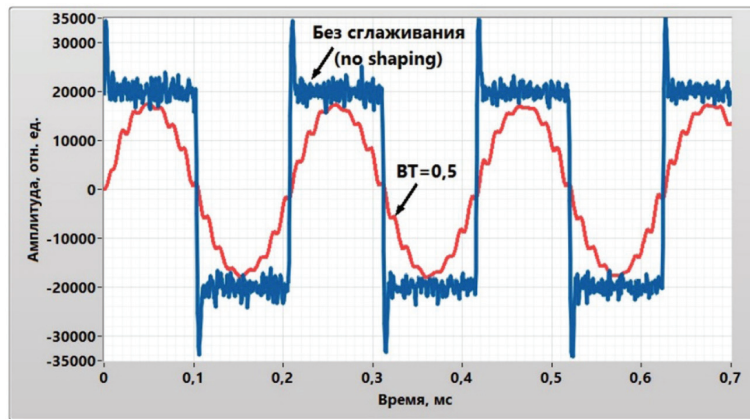


Рис. 4. Вид демодулированных сигналов FSK и GFSK

На рисунке 5 приведены спектры радиосигналов FSK и GFSK (верхняя боковая полоса), показывающие сужение ширины спектра при использовании GFSK.

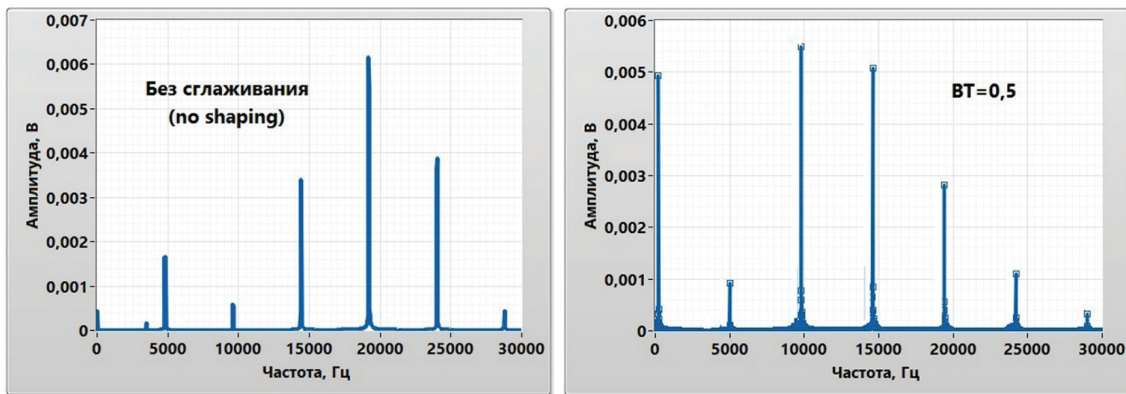


Рис. 5. Вид спектров FSK (слева) и GFSK (справа)

2. Исследование формы ООК-сигналов и ширины их спектра от значения частоты среза сглаживающего фильтра.

Аналогичные графики сигналов и спектров бинарной амплитудной манипуляции ООК приведены на рисунке 6. В этом случае сигнал сглаживался

фильтром, частота среза которого была равна удвоенной битовой скорости передачи BR. Необходимо отметить, что односторонний амплитудный спектр радиосигнала ООК без сглаживания идентичен спектру прямоугольного колебания со скважностью, равной 2.

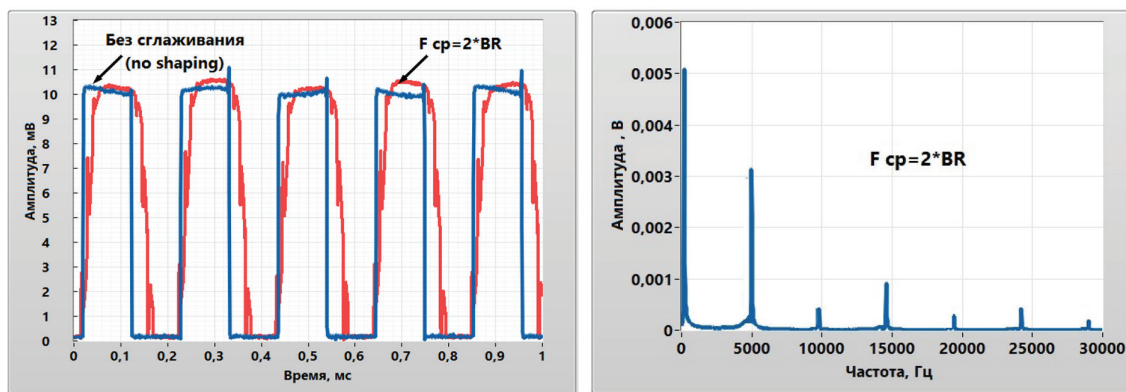


Рис. 6. Вид демодулированных сигналов ООК без сглаживания и со сглаживанием (слева) и амплитудного спектра сглаженного сигнала (справа)

Графики также показывают устранение резких перепадов сигналов и уменьшение ширины спектра при использовании сглаживающих фильтров.

3. Исследование зависимости выходной мощности от заданной мощности.

Выходная мощность модуля RFM69CW изменяется в диапазоне от -18 дБм до +13 дБм с шагом 1 дБм. Результаты измерения выходной мощности передатчика данного модуля при линейном нарастании заданной мощности приведены на рисунке 7.

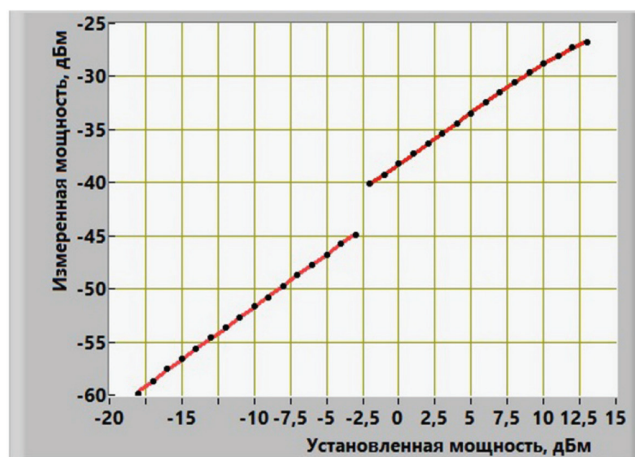


Рис. 7. Зависимость измеренной мощности от установленной

На графике зависимости измеренной мощности на рисунке 7 наблюдается скачок мощности на 5 дБм на переходе установленной мощности от -3 дБм к -2 дБм. Первый участок характеристики хорошо аппроксимируется прямой линией с наклоном 0,99. В конечной части второго участка наблюдается небольшое отклонение от линейности, и вся характеристика лучше описывается полиномом второй степени с наклоном в точке нулевого значения установленной мощности, равным 0,94.

Помимо приведенных описанная установка позволяет проанализировать и другие характеристики

радиомодема, в частности, зависимость ширины спектра от девиации частоты и скорости передачи, а при программной реализации процедуры приема она позволит оценить такую важную характеристику, как вероятность битовой ошибки (BER).

#### Заключение

Таким образом, разработанная установка и ее программное обеспечение позволили оценить степень уменьшения ширины спектра радиосигналов модуля RFM69CW при GFSK- и OOK-манипуляции, а также выявить немонотонность зависимости выходной мощности от установленной.

## Библиографический список

1. Abinayaa V., Jayan Anagha Case Study on Comparison of Wireless Technologies in Industrial Applications // International Journal of Science and Research Publications. — February 2014. — Vol. 4, issue 2.
2. Gomes C. and Paradells J. Wireless home automation networks: A survey of architectures // IEEE Communications Magazine. — 2010. — Vol. 48, № 6.
3. Gunge V. and Yalagi P. Smart Home Automation: A Literature Review, International Journal of Computer Applications. — 2016.
4. Andersson M. Short-range Low Wireless Devices and Internet of Things (IoT), 1<sup>st</sup> ed. connectBlue. — 2014.
5. Sergievskiy M.V., Syroezhkin S.N. Modern Applied Science. — 2015. — Vol. 9 (8).
6. RFM69CW ISM Transceiver module [Electronic resource]. — URL: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM69CW>.
7. NI MyRIO Design Real Systems, Fast [Electronic resource]. — URL: [http://www.ni.com/gate/gb/GB\\_ACADMYRIOFAST/US](http://www.ni.com/gate/gb/GB_ACADMYRIOFAST/US).
8. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. — М., 2011.
9. NI PXIe 5644R Руководство по эксплуатации [Electronic resource]. — URL: [http://russia.ni.com/sites/default/files/NI%205644\\_%D1%80%D1%8D.pdf](http://russia.ni.com/sites/default/files/NI%205644_%D1%80%D1%8D.pdf).
10. Суранов А.Я. Моделирование беспроводных систем передачи сигналов и данных на LabVIEW. — Барнаул, 2013.