

УДК 004.728.1

DOI: 10.46548/21vek-2020-0950-0025

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛАХ

© 2020

Тумасов Станислав Валерьевич, аспирант кафедры «Вычислительная техника»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: comp.flow@yandex.ru)

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы построения средств контроля вычислительных сетей, использующих шумоподобные сигналы. Рассмотрены стандарты и методы обработки шумоподобных сигналов в вычислительных сетях. За основу при разработке системы были выбраны доступные решения, позволяющие оценить эксплуатационные характеристики оборудования беспроводной сети на основе проекта Nexmon SDR и устройств класса RTL-SDR. Был разработан и практически реализован аппаратно-программный комплекс для контроля параметров шумоподобных сигналов. Одним из основных контролируемых параметров для анализа возможностей шумоподобного сигнала по дальности связи является отношение сигнал/шум. Разработанный прибор обеспечивает работу в диапазоне 2400(S) со значениями ширины полосы 500 кГц, 1 МГц, 2 МГц, реализуя двоичную фазовую манипуляцию. Используется технология расширения спектра методом прямой последовательности. В качестве псевдослучайных последовательностей для шумоподобного сигнала были выбраны m-последовательности. Разработан алгоритм демодуляции поступающего квадратурного сигнала с использованием средств, разработанных на языке Python. Алгоритм выполняет децимацию, фильтрацию сигнала и позволяет построить корреляционные функции. Приведены графики спектров передаваемых сигналов и корреляционных функций на выходе демодулятора для ширины полосы 2 МГц. Полученные результаты позволяют оценить качество сетей, использующих шумоподобные сигналы.

Ключевые слова: беспроводные сети, шумоподобные сигналы, m-последовательности, коды Голда, аппаратно-программный комплекс, передача информации, стандарты, вычислительные сети, протоколы, корреляционный анализ.

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR ANALYSIS OF COMPUTER NETWORKS ON SPREAD SPECTRUM SIGNALS

© 2020

Tumasov Stanislav Valerevich, postgraduate of sub-department «Computer engineering»

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: comp.flow@yandex.ru)

Abstract. The article discusses the issues of building control tools for computer networks using spread spectrum signals. The standards and methods for processing spread spectrum signals in computer networks are considered. The basis for the development of the system was chosen affordable solutions that allow to evaluate the operational characteristics of wireless network equipment based on the Nexmon SDR project and RTL-SDR class devices. A hardware-software complex was developed and practically implemented for monitoring parameters of spread spectrum signals. One of the main controlled parameters for analyzing the capabilities of a spread spectrum signal over a communication range is the signal-to-noise ratio. The developed device provides operation in the range of 2400(S) with bandwidths of 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz, realizing binary phase shift keying. The technology of spreading the spectrum using the direct sequence spread spectrum method. As pseudo-random sequences for a spread spectrum signal, m-sequences were chosen. An algorithm has been developed for demodulating the incoming quadrature signal using tools developed in Python. The algorithm performs decimation, filtering the signal and allows you to build correlation functions. The graphs of the spectra of the transmitted signals and correlation functions at the output of the demodulator for a bandwidth of 2 MHz are presented. The results obtained make it possible to evaluate the quality of networks using spread spectrum signals.

Keywords: wireless network, spread spectrum signals, m-sequences, Gold codes, hardware and software complex, information transmit, standards, computer networks, protocols, correlation analysis.

Введение. Шумоподобный сигнал (ШПС) нашёл широкое применение в беспроводных локальных сетях [1, 2, 3], в технологии «умный дом» [4], в транспортной области [5, 6], в области спорта и активного отдыха [7] и т.д. Для передачи шумоподобного сигнала используется полоса, охватывающая энергетический спектр информационных сигналов. Выделяют следующие стандарты беспроводных сетей, использующих ШПС: *Wi-Fi (IEEE 802.11b* и т.д.) [1, 2, 3], *Zigbee (IEEE 802.15.4-2003)* [4], *LoRaWAN*

[5, 6, 8] и другие. В стандарте *IEEE 802.11b* используются последовательности Баркера длиной 11 чипов, двоичная фазовая манипуляция (*BPSK*) и квадратурная фазовая манипуляция (*QPSK*), технология расширения спектра методом прямой последовательности (*DSSS*). В *IEEE 802.15.4-2003* для диапазона 2.4 ГГц используются псевдослучайные последовательности (ПСП) длиной 32 чипа совместно с квадратурной фазовой манипуляцией со сдвигом квадратур (*O-QPSK*) и технологией расширения спектра *DSSS*.

Технология *LoRa* [9] регламентирует использование псевдослучайной последовательности длиной 128 – 4096 чипов с технологией расширения спектра методом линейной частотной модуляции (CSS). Работы [1 – 6, 7] используют готовые модули, которые соответствуют стандартам и имеют узкоопределённые характеристики по длине псевдослучайной последовательности, полосе пропускания, скорости передачи информации, видам модуляции. Это налагает определённые ограничения на исследования характеристик вычислительной сети при различных скоростях передачи, базах шумоподобного сигнала, типах модуляции.

Условия применения сети могут налагать серьёзные ограничения на функциональность сети. Это может выражаться в снижении качества принимаемого сигнала, вплоть до отсутствия приёма. Поэтому в сложных условиях, например, в лесу, возникает проблема анализа бюджета радиолинии, расчёта максимальной дальности связи. Применение технологии ШПС является одним из направлений в повышении бюджета радиолинии и максимальной дальности связи. Поэтому важной задачей является оценка возможностей ШПС по увеличению дальности связи, принимая в расчёт ограничения оборудования. Но для качественной оценки возможностей ШПС важна способность изменения эксплуатационных характеристик оборудования беспроводной сети, например, базы ШПС. Известные решения являются либо достаточно сложными и дорогостоящими, либо не позволяют обеспечить полную оценку возможностей ШПС по увеличению дальности связи. Поэтому разработка доступного аппаратно-программного комплекса и более полная оценка на нём возможностей ШПС по увеличению дальности связи является актуальной проблемой. В данной работе оценивается один из основных показателей, влияющих на дальность связи – отношение сигнал/шум.

Цель работы – усовершенствовать методику определения отношения сигнал/шум шумоподобного сигнала и предложить вариант ее аппаратной реализации для оценки возможности увеличения дальности связи при разной ширине энергетического спектра сигнала.

Материалы, методы и результаты. От выбора технологии расширения спектра зависят параметры проектируемого оборудования. В этой связи была выбрана технология расширения *DSSS*, поскольку она обеспечивает большую дальность связи. Основной принцип этой технологии заключается в том, что передаваемый символ сообщения заменяется ПСП. При неизменной ширине полосы передачи с ростом базы ПСП будет уменьшаться информационная скорость.

Одними из основных параметров, влияющих на дальность связи, являются отношение сигнал/шум и максимальный уровень боковых пиков функции автокорреляции ПСП. Отношение сигнал/шум (в зарубежной литературе *SNR* – *Signal-to-Noise Ratio*) рассчитывается по следующей формуле [9]:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{\max(R_x(\tau))}{s} \right),$$

где $\max(R_x(\tau))$ – максимальное значение функции автокорреляции ПСП, s – среднеквадратическое значение функции автокорреляции ПСП.

Чем больше значение отношения сигнал/шум, тем выше качество канала связи. Чем ниже максимальный уровень боковых пиков функции автокорреляции ПСП, тем выше распознаваемость сигнала. Увеличение отношения сигнал/шум и уменьшение уровня боковых пиков позволяет увеличить дальность связи. Для расчёта отношения сигнал/шум и анализа максимального уровня боковых пиков строится автокорреляционная функция ПСП [10]. В беспроводных сетях широко применяются коды Голда и m -последовательности. С ростом длины ПСП увеличивается отношение сигнал/шум. Это подтверждает формула выигрыша для устройств обработки ШПС, представленная ниже [11]:

$$G = 10 \log_{10}(N),$$

где N – база ШПС.

Была выбрана m -последовательность в качестве передаваемой, поскольку она имеет более высокий уровень отношения сигнал/шум и низкий максимальный уровень боковых лепестков по сравнению с кодами Голда. Для экспериментальной оценки отношения сигнал/шум при разных значениях ширины полосы ШПС было принято решение разработать устройство на доступной элементной базе и программном обеспечении.

При создании устройства необходимо определиться с диапазоном частот, в котором оно будет работать. Нелицензируемые диапазоны частот не требуют разрешения на их использование, что облегчает исследования с нормативной точки зрения. Требования по нелицензируемым диапазонам частот представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Требования по нелицензируемым диапазонам частот

Диапазон	Частота, Гц	Ширина полосы, Гц	Максимальная мощность, Вт
LPD433	433×10^6	1.675×10^6	0.01
PMR446	446×10^6	0.1×10^6	0.5
868(UHF)	868×10^6	0.5×10^6	0.025
2400(S)	2400×10^6	83.5×10^6	0.1

Диапазон 2400(S) имеет самую широкую допустимую полосу сигнала, а также находится на втором месте по максимальной мощности. 2400(S) находит частое применение при исследованиях, что может дать много полезной информации. Поэтому был выбран диапазон 2400(S). Минимальная ширина полосы для сигнала была выбрана равной 500 кГц. Одними из наиболее простых в реализации являются амплитудная (*ASK*) и двоичная фазовая (*BPSK*) манипуляции. Была выбрана *BPSK*-модуляция поскольку может обеспечить увеличение чувствительности приёмника по сравнению с *ASK* [9]. При этом *BPSK* широко приме-

няется в стандартах беспроводной связи.

Большую популярность в настоящее время приобрела технология программно-конфигурируемого радио (SDR) [12, 13, 14], которая позволяет вносить изменения в эксплуатационные характеристики оборудования беспроводных сетей, например, изменять вид модуляции, базу ШПС, скорость передачи. Это даёт возможность учёным исследовать функционирование вычислительных сетей разной конфигурации, не останавливаясь на готовых модулях [15]. Особенный интерес представляют квадратурные передатчики и приёмники, поскольку они позволяют реализовывать различные виды модуляций. При анализе сетевых протоколов широкое применение нашли программные средства *GNU Radio* [16, 17], разработанные на языке *Python*, поскольку они имеют необходимый набор модулей по обработке сигналов, распространяемых по лицензии *GNU GPL*.

После выбора основных технологий и диапазона частот производился анализ возможных аппаратных и программных обеспечений передатчика и приёмника. Среди проектов, которые реализуют технологию SDR, можно выделить *Nexmon Software Defined Radio* [18]. Он взят за основу при разработке передатчика экспериментального устройства. Инструменты *Nexmon Software Defined Radio* позволяют передавать с помощью *Wi-Fi*-модуля телефона или *Raspberry Pi IQ*-отсчёты. Данные *Wi-Fi*-модули позволяют работать в диапазоне 2400(S). Для передачи был выбран смартфон *Nexus5* с *Wi-Fi*-модулем *BCM4339* [19]. При этом частота дискретизации модуля равна 40 МГц, что даёт широкие возможности в наращивании полосы передаваемого сигнала. *Wi-Fi*-модуль *Nexus5* имеет буфер на 65536 отсчётов. Универсальным средством для приёма может послужить устройство класса *RTL-SDR* [20]. *RTL-SDR* подключаются к компьютеру и передаёт отсчёты по USB-интерфейсу. Важными характеристиками устройств являются: максимальная частота дискретизации для стабильного приёма, разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и диапазон принимаемых частот. В качестве аппаратного обеспечения приёмников были взяты устройства:

1) SDR-приёмник на чипе *RTL2832U* с тюнером *R820T*. Максимальная частота дискретизации для стабильного приёма в *GNU-Radio* – 2.4 МГц, разрядность АЦП – 8 бит.

2) SDR-приёмник с тюнером *R820T2*. Максимальная частота дискретизации для стабильного приёма в *GNU-Radio* – 6 МГц, разрядность АЦП – 12 бит.

Тюнеры *R820T* и *R820T2* обеспечивает работу лишь на диапазоне частот 24–1766 МГц. Но приёмник в разрабатываемом устройстве должен поддерживать диапазон с запасом 2412–2432 МГц. Одним из решений этого вопроса являются схемы понижающего преобразования. При разработке программного обеспечения приёмника использовались возможности *Python* и *GNU Radio*. *Python* позволяет осуществлять целый комплекс операций по обработке информации

с помощью подключения различных библиотек: *Matplotlib*, *NumPy* и т.д.

Для демодуляции поступающего квадратурного сигнала был разработан алгоритм. Алгоритм представляет собой следующую последовательность действий.

1. Считывание полученных отсчётов *I* и *Q*-составляющих комплексного сигнала и отсчётов *m*-последовательности из соответствующих файлов. *M*-последовательность дополняется дублирующими соседними отсчётами для того, чтобы на чип приходилось два отсчёта.

2. Нормирование отсчётов *I* и *Q*-составляющих сигнала.

3. Расчёт БПФ и построение спектра сигнала.

4. Децимация и фильтрация отдельно для *I* и *Q*-составляющих сигнала. Децимация производится для получения 4 отсчётов сигнала на чип. Фильтрация выполняется для устранения высокочастотных помех составляющих комплексного сигнала. Использовался фильтр *Root-Raised-Cosine (RRC)*, который имеет импульсную характеристику, представленную ниже [21]:

$$h(t) = \begin{cases} 1 - \alpha + 4 \frac{\alpha}{\delta}, & t = 0 \\ \frac{\alpha}{\sqrt{2}} [z_1 \sin(z_2) + z_3 \cos(z_2)], & t = \pm \frac{T}{4\alpha} \\ \frac{\sin(z_4) + 4\alpha \frac{t}{T} \cos(z_4)}{\pi \frac{t}{T} \left(1 - \left(4\alpha \frac{t}{T}\right)^2\right)}, & t \neq 0, t \neq \pm \frac{T}{4\alpha} \end{cases}$$

где $z_1 = 1 + 2/\pi$, $z_2 = \pi/(4\alpha)$, $z_3 = 1 - 2/\pi$, $z_4 = (\pi \times (1 - \alpha) \times t)/T$, $z_5 = (\pi \times (1 + \alpha) \times t)/T$, α – коэффициент сглаживания, T – период символа.

5. Децимация и фильтрация отдельно для *I* и *Q*-составляющих сигнала. Децимация производится для получения 2 отсчётов сигнала на чип.

6. Построение взаимной корреляционной функции *m*-последовательностью отдельно для *I* и *Q*-составляющих сигнала. Взаимная корреляционная функция рассчитывалась по следующей формуле:

$$R_{xy}(k) = \sum_{i=1}^N x(i+k) y^*(i),$$

где k – сдвиг между последовательностями относительно друг друга, $x(i+k)$ – сдвинутая последовательность отсчётов $x(i)$ на k отсчётов, $y^*(i)$ – комплексное сопряжение последовательности отсчётов $y(i)$.

7. Расчёт квадратного корня из суммы квадратов функций корреляции для *I* и *Q*-составляющих сигнала. Это является результатом работы скрипта демодулятора.

Передача сигнала осуществлялась на первом канале *Wi-Fi* (2412 МГц) и на несущей частоте 2420 МГц. С помощью скрипта *Matlab* производилась BPSK-модуляция *m*-последовательностей различной длины для разной ширины полосы сигналов. Была проведена экспериментальная оценка отношения сиг-

нал/шум для m -последовательностей при разных значениях ширины полосы сигнала.

Исходя из частот дискретизации приёмников и передатчика, а также возможностей демодулятора были выбраны следующие значения ширины полосы сигнала: 500 кГц, 1 МГц, 2 МГц. На рисунке 1 представлены спектры генерируемых сигналов с шириной полосы 2 МГц и ПСП с длинами 255, 511, 1023 и 2047

чипов.

Функции корреляции на выходе демодулятора экспериментального устройства для сигналов с шириной полосы 2 МГц и ПСП с длинами 255, 511, 1023 и 2047 чипов представлены на рисунке 2. В них видно, что с ростом длины ПСП увеличиваются значения основных пиков корреляции, что приводит к росту отношения сигнал/шум – SNR.

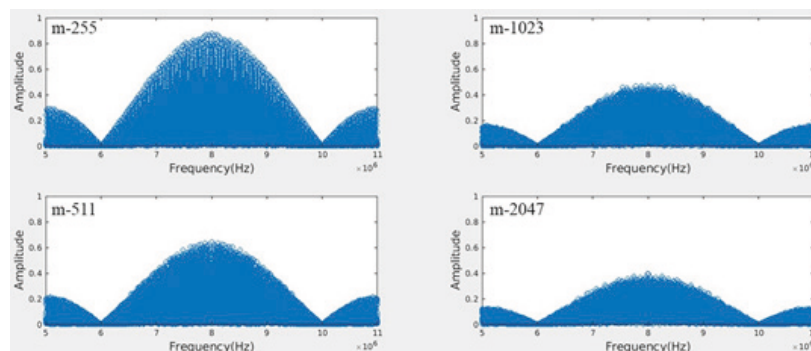


Рисунок 1 – Спектры генерируемых сигналов для разных размеров ПСП

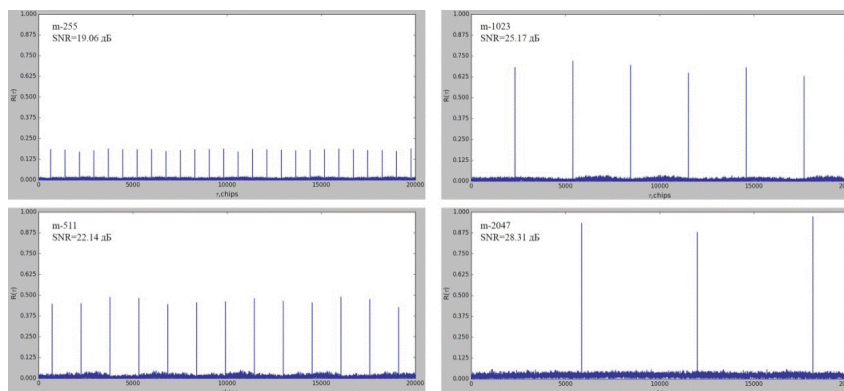


Рисунок 2 – Функции корреляции для разных размеров ПСП

Как уже отмечалось, буфер передатчика имеет длину 65536 отсчетов, что вводит ограничения на максимальную длину ПСП в зависимости от ширины полосы передаваемого сигнала. Экспериментально были получены значения отношения сигнал/шум для значений ширины полосы сигнала: 500 кГц, 1 МГц, 2 МГц и различных длин ПСП, принимая во внимание размер буфера передатчика устройства. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты, полученные экспериментально для различных значений ширины полосы сигнала

Длина m -последова- тельности, чипы	Ширина полосы, Гц					
	500×10 ³		1×10 ⁶		2×10 ⁶	
	SNR, дБ	Разм. буф., выборки	SNR, дБ	Разм. буф., выборки	SNR, дБ	Разм. буф., выборки
255	25.9806	20400	22.0787	10200	19.0587	5100
511	28.8806	40880	25.0806	20440	22.1406	10220
1023	-	81840	28.8106	40920	25.1706	20460
2047	-	163760	-	81880	28.3106	40940
4095	-	327600	-	163840	-	81900

Из таблицы 2 следует, что с ростом длины ПСП увеличивается отношение сигнал/шум, что удовлетворяет формуле усиления при обработке ШПС. Ис-

пользование более длинных ПСП с увеличением ширины полосы дало возможность получить практически одинаковое значение отношения сигнал/шум для рассматриваемых сигналов с разной шириной полосы.

Заключение. Разработано устройство, которое позволяет на доступной элементной базе с использованием открытых программных средств *GNU Radio* произвести анализ шумоподобных сигналов с различной с различной шириной частотной полосы в вычислительной сети. С помощью этого устройства проведено сравнение отношений сигнал/шум m -последовательностей с длинами 255, 511, 1023 и 2047 чипов для ширины полосы 2 МГц. Максимальное значение отношения сигнал/шум было получено на ПСП 2047 чипов. Это объясняется тем, что 2 МГц в использованном образце устройства было выбрано максимально допустимой шириной полосы передаваемых сигналов. Экспериментально с учетом размера буфера передатчика были получены значения отношения сигнал/шум для разных значений ширины полосы сигнала (500 кГц, 1 МГц, 2 МГц) и различных длин ПСП. Использование более длинных ПСП с увеличением ширины полосы даёт возможность получить практически одинаковое значение отношения

сигнал/шум для рассматриваемых сигналов с разной шириной полосы. Предложенный способ оценки отношения сигнал/шум и разработанное устройство предполагается использовать в учебном процессе кафедры «Вычислительная техника» Пензенского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пантюхин А.Р., Беляев А.С. Система определения местоположения объектов внутри помещений // Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых : сб. научных трудов VI Всероссийской конференции – Томск : Изд-во Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015г. – С. 241–243.
2. Альшаев И.А., Лаврухин В.А. О проектировании и оптимизации сетей WI-FI // Информационные технологии и телекоммуникации – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2016г. – Т. 4. – № 1. – С. 87–95.
3. Степанова И.В. Вопросы построения и проектирования систем беспроводного широкополосного доступа технологий Wi-Fi и Mesh // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт – Москва : Изд-во ООО «Издательский дом Медиа публишер», 2016г. – Т. 10. – № 2. – С. 25–33.
4. Репников А.И., Омаров А.В., Грязнов И.Е. Управление освещением на основе беспроводной сети Zigbee // Известия Волгоградского государственного технического университета – Волгоград : Изд-во Волгоградский государственный технический университет, 2018г. – № 2(212). – С. 83–85.
5. Матаева А.Б. Применение LoRa технологии для электронных билетов на железной дороге // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева – Алматы : Изд-во Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017г. – № 1(100). – С. 175–178.
6. Попов А.Ю., Кирьяненко А.В. Применение IOT технологий в сфере транспортной инфраструктуры на примере проекта «Система мониторинга парковочных мест» // «Синергия наук» – Санкт-Петербург: Изд-во Сиденко Александр Сергеевич, 2018г. – № 25. – С. 811–838.
7. Бекмагамбетова Ж.М., Липская М.А., Оразымбетова А.К., Оспанова Н.А. Ключевые особенности применения технологии LoRa при разработке сетей беспроводных датчиков // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева – Алматы : Изд-во Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017г. – № 2(101). – С. 164–170.
8. Semtech AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics – New York : Semtech corp., 2015г. – 26 с.
9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд. – Москва : «Вильямс», 2017г. – 1100 с.
10. Meel J. Spread Spectrum – Jan De Nayerlaan : De Nayer Institute, 2000г. – 100 с.
11. Диксон Р.К. Широкополосные системы // Москва: Изд-во «Связь», 1979г. – 304 с.
12. Adrien Le Naour, Olivier Goubet, Christophe Moy, Pierre Leray Spread Spectrum Channel Sounder Implementation with USRP Platforms // SDR 11 Technical Conference and Product Exposition, 2011г. – С. 285–292.
13. Тумасов С.В., Таранцев Е.К. Макет сенсорной сети с использованием технологии SDR // Информационные технологии в науке и образовании. : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015г. – С. 304–308.
14. Будников С.А., Шешковой А.С., Бондаренко В.С. Использование программно-определяемого радио для исследования трафика беспроводных сетей // «Охрана, безопасность, связь» – Воронеж : Изд-во Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2017г. – № 1. – С. 225–231.
15. Фокин Г.А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов // Труды учебных заведений связи – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2019г. – Т. 5. – № 1. – С. 78–94.
16. Manjula V. K., s. Sandya SDR Solution to IEEE802.15.4 sub-1GHz band BPSK Modem // IEEE Sponsored 3rd International conference on electronics and communication systems (ICECS 2016) – IEEE, 2016г. – С. 2551–2555
17. Будников С.А. Исследование временных характеристик информационных потоков в беспроводных сетях // Перспективные методы и средства защиты информационной инфраструктуры : сборник статей конференции – Анапа : Изд-во ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2019г. – С. 257–265.
18. Matthias Schulz, Daniel Wegemer and Matthias Hollick. Nexmon: The C-based Firmware Patching Framework. URL: <https://nexmon.org> (дата обращения 18.01.2020)
19. Matthias Schulz, Jakob Link, Francesco Gringoli, and Matthias Hollick. Shadow Wi-Fi: Teaching Smartphones to Transmit Raw Signals and to Extract Channel State Information to Implement Practical Covert Channels over Wi-Fi. // Accepted to appear in Proceedings of the 16th ACM International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2018), 2018г. – С. 256–268.
20. Губайдуллин И.Р., Мамедов Т.Т. Цифровая обработка сигналов с применением RTL-SDR-приёмника на примере ЧМ-сигнала // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы – Москва : Изд-во Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем, 2019г. – Т. 6. – № 2. – С. 38–43.
21. S. Daumont, R. Basel, Y. Louet, Root-Raised Cosine filter influences on PAPR distribution of single carrier signals // 2008 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP 2008) – IEEE, 2008г. – С. 841–845

Статья поступила в редакцию 06.05.2020

Статья принята к публикации 10.06.2020