

УДК 621.372.512

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-115-119

Построение систем передачи информации по принципу интернета вещей

А. Н. Киченко, кандидат технических наук, 18-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия

В промышленности и в системах вооружения большое место занимают устройства, которые обладают интеллектуальными возможностями. Вычислительные ресурсы могут быть использованы более эффективно, если устройства объединены в беспроводную сеть, по которой происходит управление объектами. Такая сеть может быть подсистемой глобального интернета либо представлять автономную локальную сеть. Для построения локальной сети одной из ключевых проблем является выбор радиомодулей, на основе которых реализуется беспроводной обмен данными. При выборе модулей следует учитывать частотный диапазон и функциональные возможности. Если по частотному диапазону разработчики и пользователи имеют ограничения, то к функциональным возможностям в современных системах передачи информации предъявляются самые разнообразные требования. Своими специфическими требованиями обладают системы передачи информации, которые используются в военных целях. Особое внимание обращается на достоверность передачи информации в сложной электромагнитной обстановке, потребление энергии и противодействие организованным помехам. В настоящей статье анализируются технические характеристики радиомодулей, предназначенных для передачи сигналов в различных частотных диапазонах. Проанализированы также возможные протоколы взаимодействия локальных сетей, и на основании проведенного исследования разработаны рекомендации по их использованию при проектировании систем передачи информации по принципу интернета вещей для систем передачи информации в сложной помеховой обстановке, которая характерна для военных систем.

Ключевые слова: радиомодуль, вид модуляции, скорость передачи информации, частотный диапазон, топология сети.

Введение

Бурные события последних лет демонстрируют реальное применение информационных технологий в быту, промышленности и двойном деле. Одной из них является технология интернета вещей (Internet of Things, IoT) – это множество физических объектов, подключенных к интернету и обменивающихся данными [1–5].

Обмен данными может осуществляться как с участием человека, так и без него. Приведенное определение подразумевает, что IoT – некая единая и цельная концепция. Однако применительно к промышленности оборонного комплекса и в военном деле дистанционный обмен данными большого количества объектов требуется осуществлять без использования интернета и сотовых систем. При проектировании таких специальных систем передачи информации прежде всего следует проанализировать возможные варианты реализации физического, канального и сетевого уровня модели OSI.

Преимущества IoT, привлекающие внимание военных, должны быть согласованы с необходимостью создания специальных устройств, обладающих повышенной степенью защиты, зачастую на базе гражданских моделей, как это видно на примере смартфонов и планшетов. Это необходимо для того, чтобы информация надежно передавалась между объектами в условиях радиоэлектронного конфликта, который неизменно присутствует в большинстве современных систем связи.

Целью настоящей статьи является проведение анализа особенностей построения и разработка рекомендаций по применению различных радиомодулей и протоколов сетевого взаимодействия специальных сетей передачи информации.

Предпочтительные диапазоны частот

Важнейшим вопросом создания беспроводных систем передачи информации является выбор частотного диапазона [6–8]. Чаще всего используются два основных: 868...915 МГц

и 2450 МГц; также встречается 433 МГц. Однако последний очень широко используется бесконтрольно и потому часто бывает сильно замусорен. Скорости в нем маленькие, антенны, наоборот, большие, а дальность связи от диапазона 868...915 принципиально не отличается. При этом частоты 868 и 915 МГц нелегализуемые (то есть пользователю не надо получать лицензию на использование частот). Диапазон 2450 МГц также нелегализуемый. Его плюсы – минимальные габариты антенны, минусы – не слишком большая дальность, сильное затухание в препятствиях и наличие в том же диапазоне Wi-Fi, Bluetooth и микроволновок. На практике 2450 МГц обычно используются в помещениях, а 868...915 МГц – как на улице, так и в помещениях.

Радиомодули для построения локальных сетей

Радиомодуль 2.4G nRF24L01+ – это однокристалльный РЧ-трансивер безлицензионного ISM-диапазона 2,4...2,5 ГГц, состоящий из интегрального синтезатора частоты, усилителя мощности, кварцевого генератора, демодулятора, модулятора и модуля аппаратного протокола Enhanced ShockBurst [9, 10]. Данный модуль берет на себя функции анализа потери пакетов данных и их повторной отправки, снижая нагрузку на управляющий микроконтроллер. Применение такого радиомодуля является хорошим решением при соединении типа точка – точка. Устройство работает с гауссовой частотной модуляцией. Это модифицированная версия частотной модуляции, где поток входных данных фильтруется в цифровом виде посредством фильтра Гаусса.

Существуют два режима работы модуля nRF24L01. В первом режиме ShockBurst (прямой) хост (микроконтроллер) записывает во внутренний буфер данные размером 256 байт с выбранной скоростью передачи через последовательный периферийный интерфейс. После того как все данные были отправлены во внутренний буфер, логика, управляющая процессом, инициирует радиопередачу со скоростью 1 Мбит/с или 250 Кбит/с.

Во втором режиме работы модуля nRF24L01 можно сгенерировать контрольный полином циклического избыточного кода аппаратно в схеме передатчика и подтвердить передачу на основе этого избыточного циклического кода в приемнике. Модули с микросхемой nRF24L01 достаточно надежны, поэтому могут успешно использоваться для решения сложных задач,

независимо от отсутствия поддержки радиопrotocolов.

Есть и более простые радиомодули, работающие на частотах 433 и 868 МГц. Чаще всего это набор из двух составляющих – передатчика и приемника. Однако этот комплект имеет существенные ограничения по функциональности, поскольку в такой конфигурации невозможно реализовать двустороннюю передачу данных. В них используется амплитудная модуляция.

Широкое распространение получили системы сбора и управления информацией, построенные по технологии LoRa (сокращение от Long Range) [11, 12]. LoRa – проприетарная технология, для ее реализации требуется аппаратный модем, выпускаемый компанией Semtech. Чипы управляются по SPI от внешнего контроллера. Сети по этой технологии строятся чаще по топологии «звезда». При этом обеспечивается дальность – от нескольких километров в плотной городской застройке до 30...50 км прямой видимости. Диапазон 868...915 МГц. Скорость до 37,5 кбит/с, которая падает с увеличением расстояния между приемником и передатчиком. В качестве головного элемента звезды рекомендуется применение чипа SX1301, который обеспечивает взаимодействие между сетью LoRa и Ethernet. Эта микросхема представляет цифровой процессор канала радиосвязи, способный обслуживать до 5 тысяч оконечных устройств на каждый квадратный километр в условиях интерференционных помех. Отличительные характеристики SX1301:

- чувствительность до $-142,5$ дБм при совместной работе с маломощными трансиверами SX125x;
- возможность работы с отрицательным отношением сигнал/шум (до -9 дБ);
- эмуляция 49x LORA-демодуляторов и 1x (G) FSK-демодулятора;
- двойной цифровой TX&RX-радиоинтерфейс;
- динамическая адаптация канала под различные скорости передачи (DDR, Dynamic data rate);
- 10 параллельных программируемых каналов демодуляции.

На оконечных устройствах устанавливаются чипы серии SX127x, которые характеризуются тем, что внутренние регистры памяти позволяют динамически изменять рабочую частоту, ее девиацию вид модуляции, выходную мощность и многие другие параметры, а также устанавливать режимы работы всех периферийных блоков. Это позволяет использовать один

и тот же беспроводной модуль для решения разных задач.

Основным видом модуляции в этих модулях является ЛЧМ, однако приемопередатчики серии SX127x поддерживают следующие виды модуляции: FSK, GFSK, MSK и GMSK. Радиоприемный тракт выполнен по схеме с однократным квадратурным преобразованием на низкую промежуточную частоту. Из полезных функций следует отметить встроенный блок сверхбыстрой автоподстройки частоты (AFC), схемы индикации уровня мощности принимаемого сигнала (RSSI) с широким динамическим диапазоном 127 дБ и автоматической регулировки усиления.

Энергопотребление в режиме приема не превышает 13 мА при напряжении питания 3,3 В и ширине полосы пропускания 500 кГц.

Радиоприемный тракт обладает следующими селективными свойствами:

- избирательность по соседнему каналу не менее 72 дБ (при $SF = 12$);
- подавление зеркального канала не менее 66 дБ;
- динамический диапазон блокировки 82,5 дБ при отстройке на ± 1 МГц; 89 дБ – при ± 10 МГц;
- интермодуляционные искажения 3-го порядка $-12,5$ дБм.

В радиопередающем тракте сигнал гетеродина модулируется с помощью цифрового модулятора, после чего усиливается. Можно использовать один из трех усилителей мощности: первый обеспечивает усиление до +14 дБм (20 мВт), остальные два при использовании рекомендованной согласующей цепи выдают до +20 дБм (100 мВт). Ток потребления в режиме передачи вырастает: при выходной мощности +13 дБм он составляет 28 мА.

Микросхемы SX1276/7/8/9 имеют схожую с SX1272/3 структуру и принципы функционирования, но широкий диапазон рабочих частот, обеспечивающий гибкость применения и включающий не требующие лицензирования ISM-частоты 433, 868 и 915 МГц: 137...1020 МГц (у SX1276 и SX1277), 137...525 МГц (у SX1278) и 137...960 МГц (у SX1279).

В последнее время появилась информация об оригинальной отечественной разработке «Стриж» [13–15]. Разработчики предлагают строить сеть передачи данных по топологии «звезда», в которой абонентские устройства передают данные на частоте 868 МГц, а центральная станция обладает мощным передатчиком на частоте 446 МГц. Это увеличивает емкость сети, а также в некоторых случаях обеспечивает лучшее покрытие сети.

«Стриж» обладает несколько превосходящими LoRa характеристиками по дальности, существенно меньшей скоростью и двумя отдельными каналами – на прием и передачу. Наличие центральной станция с мощным передатчиком позволяет увеличить емкость сети, определяемую тем, со сколькими устройствами центральная станция физически успеет провести радиобмен, а также в некоторых случаях обеспечить лучшее покрытие сети. Сеть «Стриж» использует собственный протокол Marcato 2.0. Этот протокол является закрытым. Протокол обеспечивает шифрование XTEA с использованием 256-битного ключа. В сети используется сверхузкополосный метод с дифференциальной двоичной фазовой манипуляцией DBPSK. Такой подход приводит к повышению эффективности использования частотного спектра. Так, например, в полосе LoRa в 125 кГц, необходимой для кодирования одного канала, можно использовать более 1250 устройств «Стриж». Ширина полосы сигнала, рекомендуемая для стандартной сети LoRaWAN, составляет 125 кГц. У «Стрижа» ширина полосы сигнала составляет 100 Гц. У стандартной сети LoRaWAN восемь широких каналов по 125 кГц, а у «Стрижа» – 5 тыс. узких по 100 Гц каждый. Узкий канал имеет несколько особенностей. Например, он требует стабильности частоты кварцевых резонаторов, задающих рабочую частоту абонентского устройства. В противном случае необходимо использование дорогих термокомпенсированных генераторов, у которых погрешность по частоте на порядок меньше.

Главной сложностью использования системы «Стриж» является отсутствие доступной информации о структуре устройств и протоколов взаимодействия. Хотя можно предположить, что при отсутствии отечественных микросхем-трансиверов разработчики используют чип Semtech SX1276. Он как раз обладает двумя радиочастотными каналами, которые можно настроить на разные частоты; при этом, помимо LoRa-демонов, в этих чипах есть и FSK-демодуляторы.

Таким образом, для построения сетей связи по типу интернета вещей можно рекомендовать три варианта реализации физического уровня, основные технические характеристики этих вариантов приведены в таблице.

Для разработчиков систем передачи информации военного назначения предпочтительным с точки зрения возможности использования оригинальных протоколов является радиомодуль nRF24L01. Вместе с тем высокий частотный диапазон ограничивает дальность передачи без дополнительной ретрансляции.

Сравнительные характеристики радиомодулей

Comparative characteristics of radio modules

Характеристики	LoRa	Стриж	nRF24L01	Примечание
Частота	868 МГц	868 МГц	2,4...2,5 ГГц	
Протокол	LoRaWAN	Marcato2.0	произвольный	
Модуляция	ЛЧМ	DBPSK	GFSK	
Количество каналов	8	5000	128	
Ширина полосы сигнала	125 кГц	100 Гц	1 МГц	
Скорость связи	До 50 кбит/с	100 бит/с	До 2Мбит/с	
Разделение каналов	CDMA, TDMA	FDMA, TDMA	FDMA.TDMA	
Помехоустойчивость	средняя	высокая	высокая	
Дальность связь	48 м	50 м	100 м	Без усилителей мощности
Радиорелейные и ячеистые сети	да	нет	да	

Выводы

На основании проведенного анализа имеющихся на рынке радиомодулей можно сформулировать следующие рекомендации по их использованию при проектировании сетей связи по типу интернета вещей применительно к промышленности и военному делу.

1. Целесообразно строить закрытые локальные сети без выхода в глобальный Интернет. Это существенно сократит вероятность несанкционированного внешнего воздействия.

2. Предпочтительно использовать нелицензированные диапазоны частот, что сократит затраты на развертывание и эксплуатацию сетей связи.

3. Выбор радиомодуля определяется характером решаемых задач, объемом передаваемой информации, требуемой скоростью обмена, конфигурацией объектов, энергетическими возможностями и климатическими условиями.

4. После выбора радиомодуля необходимо провести моделирование сети интернета вещей в условиях радиоэлектронного конфликта.

Библиографические ссылки

1. Вишняков В. А. Средства и примеры разработок систем интернета вещей // Вестник связи. 2022. № 5. С. 54–58.
2. Рентюк В. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям интернета вещей. Часть 4. Большой радиус действия // Control Engineering. 2018. Т. 3, № 175. С. 82–88.
3. Головской В. А. Математическая модель функционирования когнитивной радиосистемы // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 3. С. 1–20.
4. Дорожная карта по направлению развития сквозной цифровой технологии беспроводной связи на период с 2019 по 2024 г. М. : Национальный центр информатизации, 2019. 44 с.
5. Батулин А. С., Хворенков В. В., Шишаков К. В. Современные решения по повышению энергоэффективности радиолиний для технического обновления

радиостанций интегрированных систем связи // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 4. С. 47–62. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-47-62

6. Михалев О. А., Сорокин К. Н., Аванесов М. Ю. Управление радиочастотным спектром в когнитивной сети радиосвязи // Информатика и Космос. 2017. № 1. С. 57–66.

7. Liu S., Pan Ch. (2023) Dynamic spectrum sharing based and deep reinforcement learning in mobile communication. Sensors, 2622, pp 1-16.

8. Борисов В. И., Вилков С. В. Технологическая платформа развития систем управления, связи и радиоэлектронной борьбы // Теория и техника радиосвязи. 2023. № 1. С. 5–11.

9. Роенков Д. Н., Коротченко В. Д., Левченко С. А. Программно-конфигурируемое радио – будущее технологической железнодорожной радиосвязи // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 2. С. 17–21.

10. Липатников В. А., Петренко М. И. Модель самоорганизующейся сети радиосвязи, функционирующей в сложной сигнально помеховой обстановке // Труды учебных заведений связи. 2023. № 9 (2). С. 72–80.

11. Роенков Д. Н., Яронова Н. В. Основы технологии LoRa. Перспективы ее применения // Автоматика, связь, информатика. 2017 № 4. С. 31–35.

12. Седунов Д. П., Жунусова А. С., Зырянова Ю. О. Расчет параметров системы беспроводного сбора данных сети LoRaWAN // Техника радиосвязи. 2021. Вып. 2 (49). С. 31–41. DOI: 10.33286/2075-8693-2021-49-31-412 (IEEE).

13. Mehrdad H., Ali N., Vikram I., Shyamnath G. (2020) TinySDR: Low-Power SDR Platform for Over-the-Air Programmable IoT Testbeds: 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'20). Santa Clara, CA, USA, 2020, pp. 1031-1046.

14. Прасолов А. А., Роцинский Р. С., Федоров А. С. Концепция построения систем интернета вещей в России на базе технологии NB-IoT // Экономика и качество систем связи. 2022. № 4. С.14–32.

15. Галкин В. А. Основы программно-конфигурируемого радио. М. : Горячая линия – Телеком, 2020. 372 с.

References

1. Vishnyakov V.A. (2022) [Means and examples of development of the Internet of things systems]. *Vestnik svyazi*, no. 5, pp. 54-58 (in Russ.).
2. Rentyuk V. (2018) [Brief guide to wireless technologies of the Internet of things. Part 4: Large range]. *Vestnik svyazi Rossii*, vol. 3, no. 175, pp. 82-88 (in Russ.).
3. Golovskoy V.A. (2024) [Mathematical model of functioning of the cognitive radio system]. *Zhurnal radioelektroniki*, no. 3, pp. 1-20 (in Russ.).
4. Roadmap for the development of end-to-end digital technology Wireless Communication Technologies for the period from 2019 to 2024. Moscow: National Center for Informatization, 2019, 44 p. (in Russ.).
5. Baturin A.S., Khvorenkov V.V., Shishakov K.V. (2022) [Modern solutions for increasing the energy efficiency of radio lines for technical upgrade of radio stations of integrated communication systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 25, no. 4, pp. 47-62 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-4-47-62
6. Mikhalev O.A., Sorokin K.N., Avanesov M.Yu. (2017) [Radio frequency spectrum management in a cognitive radio communication network]. *Informaciya i Kosmos*, no. 1, pp. 57-66 (in Russ.).
7. Liu S., Pan Ch. (2023) Dynamic spectrum sharing based and deep reinforcement learning in mobile communication. *Sensors*, 2622, pp. 1-16.
8. Borisov V.I., Vilkov S.V. (2023) [Technological platform for the development of control, communication and electronic warfare systems]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, no. 1, pp. 5-11 (in Russ.).
9. Roenkov D.N., Korotchenko V.D., Levchenko S.A. (2022) [Software-defined radio - the future of technological railway radio communication]. *Avtomatika, svyaz', informatika*, no. 2, pp. 17-21 (in Russ.).
10. Lipatnikov V.A., Petrenko M.I. (2023) [Model of a self-organizing radio communication network operating in a complex signal-interference environment]. *Trudy uchebnykh zavedenij svyazi*, no. 9, pp. 72-80 (in Russ.).
11. Roenkov D.N., Yaronova N.V. (2017) [Fundamentals of LoRa technology. Prospects of its application]. *Avtomatika, svyaz', informatika*, no. 4, pp. 31-35 (in Russ.).
12. Sedunov D.P., Zhunusova A.S., Zyryanova Yu.O. (2021) [Calculation of parameters of the wireless data collection system of the LoRaWAN network]. *Tekhnika radiosvyazi*, is. 2, pp. 31-41 (in Russ.). DOI: 10.33286/2075-8693-2021-49-31-412
13. Mehrdad H., Ali N., Vikram I., Shyamnath G. (2020) TinySDR: Low-Power SDR Platform for Over-the-Air Programmable IoT Testbeds: 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'20). Santa Clara, CA, USA, 2020, pp. 1031-1046.
14. Prasolov A.A., Roshchinsky R.S., Fedorov A.S. (2022) [The concept of building Internet of Things systems in Russia based on NB-IoT technology]. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*, no. 4, pp.14-32 (in Russ.).
15. Galkin V.A. (2020) [Fundamentals of software-defined radio]. Moscow: Hot Line - Telecom Publ., 2020, 372 p. (in Russ.).

Construction of Information Transmission Systems Based on the Internet of Things Principle

A.N. Kichenko, PhD in Engineering, 18th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia

In industry and in weapons systems, devices with intelligent capabilities are increasingly taking up space. Computing resources can be used more efficiently if devices are combined into a wireless network through which objects are controlled. Such a network can be a subsystem of the global Internet or represent an autonomous local network. When building a local network, one of the key problems is the choice of radio modules on the basis of which wireless data exchange is implemented. When choosing modules, the frequency range and functionality should be taken into account. If developers and users have limitations in the frequency range, then the most diverse requirements are imposed on the functionality in modern information transmission systems. Information transmission systems used for military purposes have their own specific requirements. Particular attention is paid to the reliability of information transmission in a complex electromagnetic environment, energy consumption and counteraction to organized interference. This article analyzes the technical characteristics of radio modules designed to transmit signals in various frequency ranges. Possible protocols for interaction of local networks are also analyzed. Based on the analysis, recommendations were developed for their use in the design of information transmission systems applying the principle of the Internet of Things for information transmission systems in a complex interference environment, which is typical for military systems.

Keywords: radio module, modulation type, transmission speed, frequency range, network topology.

Получено 15.10.2024

Образец цитирования

Киченко А. Н. Построение систем передачи информации по принципу интернета вещей // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 115–119. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-115-119

For Citation

Kichenko A.N. (2024) [Construction of Information Transmission Systems Based on the Internet of Things Principle]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 115-119 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-115-119