

Нещерет Іван Григорович<sup>1</sup>  
Злобін Кирило В'ячеславович<sup>1</sup>  
Цикало Юрій Григорович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна

<sup>2</sup> Військова частина А0707, Гайсин, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ СТОСОВНО ВИКОРИСТАННЯ РАДІОМОДУЛЯ nRF24L01 У ВІЙСЬКОВІЙ ТЕХНІЦІ

Сьогодні, прийнятно-передавальна апаратура зазнала суттєвого розвитку, здебільшого, завдяки цифровізації. Цифрова техніка стає все популярнішою під час прийому й передачі інформації. Восьмирозрядні мікроконтролери (наприклад, nRF24L01) володіють достатньою швидкістю обробки даних. Забезпечивши аналого-цифрове перетворення та маючи можливості в програмуванні даних мікроконтролерів, відкриваються перспективи для реалізації трансивера. Серія виробів провідної корпорації Nordic Semiconductor містять вбудовані високопродуктивні мультиплексори, що з'єднані з Flash-пам'яттю (ядром) мікроконтролера індустріального стандарту 8052 (наприклад, nRF24L01), та підтримує декілька стандартів конфігурації послідовного порту. Ці вироби є першими інтегрованими схемами, які можна назвати «інтелектуальними прийомо-передавачами» для систем збирання та обробки даних на одному кристалі. На першому етапі обробка фізичних сигналів полягає в необхідності отримання інформації, що міститься в них. Ця інформація наявна в амплітуді сигналу, в частоті або спектральному складі, у фазі чи у відносних часових залежностях декількох сигналів. У деяких випадках бажано змінити формат інформації, яка знаходиться в пакеті сигналу. Наприклад, зміна формату відбувається під час передавання звукового сигналу в телефонній системі з багатоканальним доступом і частотним розділенням. У випадку цифрового зв'язку аналогова звукова інформація спочатку перетворюється на цифрову за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Цифрова інформація, що втілює в собі індивідуальні звукові канали, мультиплексується (багатоканальний доступ з часовим розділенням (TDMA)) та передається через послідовну цифрову лінію зв'язку. Метою статті є проведення аналізу особливостей побудови та надання рекомендації щодо застосування радіомодуля nRF24L01 у техніці військового призначення, а також – порівняння основних принципів та стандартів моделювання сигналів і завод в електронних системах, принципів дискретизації, кодування сигналів.

**Ключові слова:** радіозв'язок, амплітудна модуляція, частотна модуляція, бездротовий зв'язок, комунікаційний пристрій, супутникова навігація, Інтернет речей.

### Вступ

Забезпечення основних вимог до систем бездротового зв'язку, забезпечення стійкості бездротового радіозв'язку від завадоперешкод, оперативна доставка інформації та даних із забезпеченням необхідного рівня захисту вимагає цифрової обробки сигналу та шифрування даних. Безпека інформації – найважливіший елемент у технології бездротового зв'язку. Використовуючи бездротове з'єднання, необхідно звертати увагу на захист особистих даних. Можна легко підключитися до незахищених бездротових маршрутизаторів. Проблема полягає в тому, що будь-хто, хто підключений до бездротового маршрутизатора, що використовується користувачем, може отримувати доступ до його даних та займатися діяльністю, яка є незаконною згідно з українським законодавством. Наприклад, це може включати нелегальне

завантаження фільмів та музики з піратських сайтів, порушуючи законодавство про авторське право.

В бездротовому зв'язку використовується широкий діапазон електромагнітного спектру, від радіохвиль низької частоти в кілька кілогерц до видимого світла, частота якого складає приблизно  $8 \cdot 10^{14}$  Гц. Взагалі, якщо проаналізувати весь електромагнітний спектр, то можна зробити висновок, що фактично всі діапазони можна використовувати для передавання даних. Радіо, мікрохвильовий, інфрачервоний діапазони, а також видиме світло можуть бути використані для передавання сигналів за допомогою амплітудної, частотної чи фазової модуляції хвиль. Ультрафіолетове, рентгенівське і гамма випромінювання були б навіть кращими завдяки їхнім високим частотам, однак їх складно генерувати і модулювати, вони погано проходять крізь будинки і, крім того, вони небезпечні для всього живого.

**Постановка проблеми.** Знання умов розповсюдження електромагнітного поля дуже важливе для визначення небезпечних відстаней, на яких можливий несанкціонований доступ технічних засобів розвідки до даних, що містяться у сигналах, які перехоплюються. В разі потреби, простір, у межах якого існує небезпека перехоплення, контролюється, щоб виключити наявність технічних засобів розвідки. В інших випадках, потрібно вдаватися до заходів захисту даних, що переносяться електромагнітними полями, які є інформативними для розвідки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1; 6–8] докладно описано приклади обробки і перетворення отриманого інформаційного або керуючого сигналу та їх обробки. Останнім часом, сама організація і методи передачі даних або інформації каналами бездротового зв'язку, зазнали значних змін. За таких умов, для забезпечення високої пропускну здатності радіоканалів приймаються інноваційні технічні рішення. Відповідно, для практичної реалізації бездротового зв'язку необхідні знання і розвиток методів цифрової обробки сигналів з урахуванням специфіки поширення сигналів у системах радіозв'язку. І хоча протягом останніх років з'явилася значна кількість технічної літератури, що присвячена даній проблематиці, проте питання методів передачі даних або інформації каналами бездротового зв'язку висвітлене не достатньо. Досі відчувається дефіцит простих публікацій на тематику цифрової обробки сигналів в системах мобільного і бездротового зв'язку з урахуванням сучасного рівня та тенденцій розвитку телекомунікацій.

**Мета статті.** Проведення аналізу особливостей побудови та надання рекомендації щодо використання радіомодуля nRF24L01 у техніці військового призначення, а також – порівняння основних принципів та стандартів моделювання сигналів і завад в електронних системах, принципів дискретизації, кодування сигналів.

### Виклад основного матеріалу дослідження

У сучасних комунікаційних пристроях, крім стандарту GSM [2], також використовуються інші радіоінтерфейси, наприклад WI-FI та Bluetooth. Без WI-FI було б неможливо підключитися до мережі Інтернет через маршрутизатори доступу, які дозволяють передавати дані. А одне з найвідоміших, але не єдине застосування Bluetooth – це можливість підключення до віддалених аудіосистем, наприклад, автомобільні комплекти гучного зв'язку або бездротові навушники.

На споживчому ринку спостерігається зростання передових технологій, що базуються на бездротових з'єднаннях. Крім технології зв'язку GSM, тепер можна використовувати, наприклад, супутникову Global Positioning System (далі – GPS) навігацію або інші конкуруючі системи

супутникової навігації. Ця технологія стала настільки доступною, що зараз використовується не лише для комунікаційної навігації, а й для геотегування фотографій та інших подібних можливостей.

Паралельно з розвитком супутникової навігації, технологія Інтернету речей Internet of Things (далі – IoT) також стрімко розвивається. Термін IoT вперше було означено у 1999 році. Це концепція комунікації між об'єктами, що використовують технологію для взаємодії цих об'єктів з навколишнім середовищем. Також концепція передбачає керування певними діями пристроїв без втручання людини. Отже, всі пристрої в офісах, будинках, автомобілях, без втручання користувача виконують обробку інформації, її аналіз та обмін між собою, і залежно від результату, приймають рішення для виконання певної дії.

Масове використання радіозв'язку користувачами, які мають кваліфікацію та ліцензію Укрчастотнагляду і допущені до роботи з приймально-передавальними пристроями, вимагає дотримання регламенту. Для таких комунікаційних пристроїв смуги частот, на яких вони працюють, можуть бути виділені без отримання дозволів. Пристрої, що працюють у цих діапазонах, мають дотримуватися законодавчо визначеної обмеженої потужності та використовувати лише виділені частоти (діапазони). Найчастіше це діапазони «Промисловість, наука, медицина» (Industrial, Scientific and Medical (далі – ISM)), що зарезервовані для промислових, наукових та медичних потреб. У різних країнах використовуються різні частоти для бездротових пристроїв. Під час проектування пристрою, що працює в діапазоні ISM, важливо враховувати відповідні частоти.

Комунікаційні пристрої ISM радіозв'язку мають багато переваг. Вони характеризуються зручністю та вигідністю виробництва, а також простотою у налаштуванні. Водночас – забезпечують необмежену мобільність у визначеному діапазоні частот. Але вони також мають і недоліки. Один з таких недоліків полягає в тому, що передача по радіоканалах зв'язку вимагає все більш складного шифрування сигналу для запобігання перехопленню даних або їх модифікації в злочинних цілях. Іншою проблемою можуть бути електромагнітні завади, що викликають згасання чи спотворення сигналу.

*Загальні поняття і принципи передачі даних та модуляції їх сигналу.*

З технічної точки зору, для передачі даних потрібен радіомодем та система прийомо-передавача, тобто трансивер [3]. Модем перетворює цифровий сигнал, що складається з послідовності нулів і одиниць, в аналоговий сигнал, який може бути переданий через радіоканал. Одним із найбільш відомих методів є модуляція Frequency Shift Keying (далі – FSK) (рис. 1), або частотна модуляція (далі – ЧМ) та її варіації.

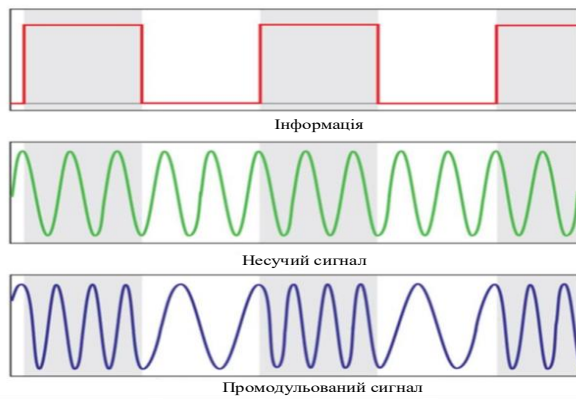


Рисунок 1 – Частотна модуляція

Дані модуляції полягають у дискретній зміні частоти носія залежно від інформаційного біта, який передається. Модуляція FSK та її модифікація є більш стійкими до завад, і тому їх ефективніше використовувати. В частотній модуляції відповідно до модульовального сигналу  $S_m(t)$  змінюється частота або початкова фаза опорного сигналу. Так, за фазової модуляції сигнал може бути формалізований виразом:

$$\varphi(t) = kSm(t) . \quad (1)$$

Отже, частотно-модульований сигнал визначається за формулою 2:

$$S_{pm}(t) = A \cos(\varphi_0 + kSm(t)) . \quad (2)$$

Інший вид модуляції – це модуляція Amplitude Shift Keying ASK (далі – ASK), або амплітудна модуляція (далі – AM) [4]. Для кращого розуміння – це сигнал з логічного нуля, коли амплітуда сигналу носія дорівнює нулю, а сигнал логічної одиниці має максимальне значення. Тому, модем перетворює промодульований сигнал у послідовність нулів і одиниць, як показано на рисунку 2, для передачі інформації кореспонденту.

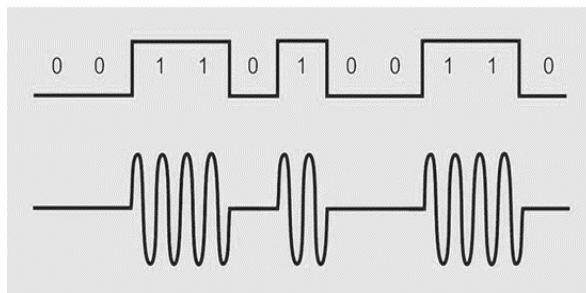


Рисунок 2 – Перетворення аналогово промодельованого сигналу в цифровий

Припустимо, що  $S(t)$  – інформаційний сигнал ( $S(t) \leq 1$ ) та  $U_c(t)$  – опорний сигнал. Тоді амплітудно-промодельований сигнал буде мати такий вигляд:

$$U_{am}(T) = U_c(t) [1 + mS(t)] , \quad (3)$$

де  $m$  – певна константа, що називається коефіцієнтом модуляції. Вищезазначена формула описує сигнал носій  $U_c(t)$ , промодельований за амплітудою сигналом  $S(t)$  з коефіцієнтом

модуляції  $m$ .

Організувати та забезпечити радіозв'язок можна по-різному. У невибагливих рішеннях використовуються прості радіо модулі. Вони ефективно виконують свою роль передачі за технологією точка-точка. Прикладом може служити зчитування температури з датчика, встановленого на зовнішній поверхні. Основна схема (метеостанція) відправляє по радіоканалу запит на замір температури, а датчик (термометр) відправляє обмірюване значення. Такі модулі мають вбудовану просту логіку і буфери даних. У більш сучасних системах можуть бути механізми підтвердження відправлених пакетів даних (інформацій) та захисту їх за допомогою контрольних сум (поліномів). Це рішення має одну перевагу – низька вартість на апаратному рівні.

У спеціалізованих пристроях, модулі радіозв'язку виконані з використанням спеціально розроблених та стандартизованих протоколів обміну даних. Універсального рішення тут немає, і стандарт радіозв'язку обирається відповідно до вимог програмного забезпечення. На прикладному рівні протоколи обміну даними описуються за допомогою багаторівневих моделей. У кожній з цих моделей існує поділ на нижній фізичний рівень, що включає апаратні рішення, та вищі рівні, які визначаються для конкретного протоколу. У бездротових інтерфейсах фізичний рівень являє собою радіоприймач, який працює в заданому діапазоні частот з певною модуляцією та вихідною чутливістю. Інтерфейс повинен мати можливість модулювати сигнал носій частотного каналу потоком цифрових даних, які передаються, і демодулювати отримані дані.

Стандарти бездротового зв'язку добре задокументовані на законодавчому рівні, тому їхню кодову реалізацію може бути здійснено без проблем. Однак в екстрених умовах воєнного часу це вимагає значних зусиль та затрат часу з боку фахівців у галузі програмування. Тому на ринку доступні готові модулі, що складаються з високочастотної компоненти підключеної до мікроконтролера, який містить прошивку, що виконує більшість функцій, необхідних для встановлення з'єднання, передачі та обробки помилок. Залежно від версії, реалізовано підтримку двох нижніх рівнів: обладнання та доступу до media access control (далі - MAC-каналу) або всього протоколу з елементами прикладного рівня.

Основні переваги частотної модуляції у порівнянні з амплітудною модуляцією:

- вища завадостійкість;
- енергетично більш вигідна, так як пелюстки корисного сигналу більші за амплітудою, ніж частотний носій.

Основні недоліки частотної модуляції у порівнянні з амплітудною модуляцією:

- більш широкий спектр гармонік;
- потребує більш складної конструкції модулятора та демодулятора.

*Практичні приклади радіомодулів передачі даних.*

Якщо потрібно забезпечити з'єднання типу точка-точка [5], оптимальним рішенням будуть прості радіомодулі. Наприклад, модулі на базі мікросхеми nRF24L01, від провідного виробника Nordic Semiconductor, які стали своєрідним

стандартом. Своєю популярністю вони завдячують поєднанню невисокої ціни та широких можливостей. Модулі з мікросхемою nRF24L01 широко використовуються в середовищі Arduino, що також сприяє її великій популярності.

Блок-схема ядра модуля nRF24L01 зображено на рисунку 3.

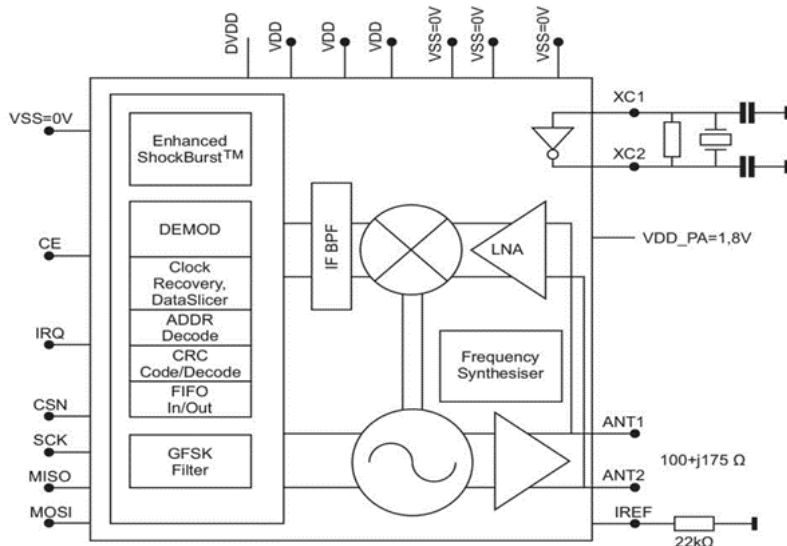


Рисунок 3 – Блок-схема ядра модуля nRF24L01

Пристрій працює у діапазоні ISM 2,4 – 2,5 ГГц з Гаусівською частотною модуляцією. Це модифікована версія частотної модуляції, де потік вхідних даних фільтрується в цифровому вигляді за допомогою фільтра Гауса. Схема має вбудований радіотракт із синтезатором частот, підсилювачем проміжної частоти та високочастотним підсилювачем. Він може діяти як передавач, так і приймач у напівдуплексному режимі. Доступний радіодіапазон поділено на 125 каналів. Час перемикання між каналами менше ніж 200 мкс.

Є два режими роботи модуля nRF24L01:

у першому режимі Shock Burst (прямий) хост (мікроконтролер) записує до внутрішнього буфера дані розміром 256 байт із вибраною швидкістю передачі через послідовний периферійний інтерфейс. Після того, як усі дані були відправлені до внутрішнього буфера, логіка, яка керує процесом, ініціює радіопередачу зі швидкістю 1 Мбіт/с або 250 Кбіт/с. У прямому режимі дані надсилаються зі швидкістю, яку хост відправляє на чіп nRF24L01;

у другому режимі роботи модуля nRF24L01 можна згенерувати контрольний поліном циклічного надлишкового коду апаратно у схемі передавача та підтвердити передачу на основі цього циклічного надлишкового коду у приймачі. Модулі з мікросхемою nRF24L01 досить надійні, тому можуть успішно використовуватися для вирішення складних завдань, незважаючи на відсутність підтримки радіопротоколів.

Є і більш простіші радіомодулі, що працюють на частотах 433 МГц та 868 МГц. Найчастіше, це

набір з двох складових – передавача та приймача. Проте цей комплект має суттєві обмеження функціональності, оскільки у такій конфігурації неможливо реалізувати двосторонню передачу даних (сигналу). В них використовувалася амплітудна модуляція.

### Висновки й перспективи подальших досліджень

В даній статті проведено аналіз особливостей побудови та застосування радіомодуля nRF24L01 у техніці військового призначення. За результатом аналізу технологій побудови пристроїв Інтернету речей обґрунтовано доцільність використання безпроводних технологій та встановлено, що для обміну даними в таких системах у всьому світі надаються неліцензовані радіочастотні діапазони, які можуть використовуватися без оформлення спеціального дозволу і абсолютно безкоштовно за умови дотримання вимог щодо ширини смуги частоти, випромінюваної потужності. А отже впровадження даної технології надасть змогу зменшити собівартість побудови Інтернету речей у військових цілях.

Також в статті розглянуто основні методи розширення спектру частот для адаптивної селекції каналів зв'язку для пристроїв Інтернет речей, їх недоліки та переваги.

Подальшими науковими дослідженнями буде розпрацювання науково-дослідної роботи та розроблення дослідно-конструкторської роботи щодо застосування радіомодуля nRF24L01 на зразках військової техніки.

### Список бібліографічних посилань

1. Білинський Й. Й., Огородник К. В., Юкиш М. Й. Електронні системи. Вінниця : ВНТУ, 2018. 208 с.
2. Кузьмин І. В., Кедрю В. А. Основи теорії інформації та кодування. Київ : Вища школа, 2003. 220 с.
3. Бойко В. І., Гурій А. М., Жуйков В. Я. та ін. Основи технічної електроніки: У 2 кн. Кн.2 Схемотехніка: підручник. Київ: Вища школа, 2007. 510 с.
4. Овчарук А. А., Барась С. Т., Овчарук Т. І. Квадратурна амплітудна модуляція зі змінним значенням частоти-носія. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 4/9. С. 47–51.
5. Рябенський В. М., Жуйков В. Я., Гулий В. Д. Цифрова схемотехніка : навч. посібник. Львів : «Новий світ-2000», 2009. 736 с.
6. Сайко В. Г., Оксіюк О. Г., Дікарєв О. В. Основи цифрового оброблення сигналів в системах цифрового радіозв'язку : навч. посібник. Київ : ДУТ, 2016. 128 с.
7. Бабак В. П. Обробка сигналів у радіоканалах цифрових систем передавання інформації: Навч. посібник за заг. ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака. Київ : Книжкове вид-во НАУ, 2005. 476 с.
8. Кривуца В. Г., Барковський В. В., Беркман Л. Н. Математичне моделювання телекомунікаційних систем: навчальний посібник. Київ : Зв'язок, 2007. 270 с.

### CONSTRUCTION FEATURES AND RECOMMENDATIONS FOR USE nRF24L01 RADIO MODULE IN MILITARY TECHNOLOGY

Neshcheret Ivan <sup>1</sup>  
Zlobin Kirilo <sup>1</sup>  
Tsykalo Yurii <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technologies, Kyiv, Ukraine,*  
<sup>2</sup> *Military unit A0707, Haisyn, Ukraine*

Today, receiving and transmitting equipment has undergone significant development, mostly due to digitalization. Digital technology is becoming increasingly popular when receiving and transmitting information. Eight-bit microcontrollers (for example, nRF24L01) have sufficient data processing speed. Having provided analog-digital conversion, possibilities in programming data of microcontrollers, it is possible to implement a transceiver. A series of products from the leading Nordic Semiconductor Corporation contain embedded high-performance multiplexers that are connected to the flash memory (core) of an industry-standard 8052 microcontroller (such as the nRF24L01), and support multiple serial port configuration standards. These products are the first integrated circuits that can be called "intelligent transceivers" for data collection and processing systems on a single chip. At the first stage, the processing of physical signals consists in the need to obtain the information contained in them. This information is available in the amplitude of the signal, in the frequency or spectral composition, in the phase or in the relative time dependences of several signals. In some cases, it is desirable to change the format of the information contained in the signal packet. For example, the format change occurs during the transmission of an audio signal in a telephone system with multiple access and frequency division. In the case of digital communication, the analog audio information is first converted to digital using an analog-to-digital converter. Digital information representing individual audio channels is multiplexed (time division multiple access (TDMA)) and transmitted over a serial digital communication line. The purpose of the article is to conduct an analysis of construction features and provide a recommendation for the use of the nRF24L01 radio module in military equipment, as well as a comparison of the basic principles and standards of modeling signals and interference in electronic systems, principles of discretization, signal coding.

**Keywords:** radio communication, amplitude modulation, frequency modulation, wireless communication, communication device, satellite navigation, Internet of things.

### References

1. Bilinsky, Y. Y. and Ogorodnyk, K. V., (2018). *Electronic systems*. Vinnytsia: VNTU.
2. Kuzmin, I. V., Kedru, V. A., (2003). *Basics of information theory and coding*. Kyiv: Vysha Shkola.
3. Boyko, V. I. Gurii, A. M., Zhuykov, V. Y. and others, (2007). *Basics of technical electronics*. Kyiv: Higher School.
4. Ovcharuk, A. A., Baras, S. T., Ovcharuk, T. I., (2011). Quadrature amplitude modulation with a variable value of the carrier frequency. *Eastern-European journal of advanced technologies*, 4/9, 47-51.
5. Ryabenkiy, V. M., Zhuykov, V. Y., Guly, V. D., (2009). *Digital circuitry: teacher. Manual*. Lviv: «New World-2000».
6. Saiko, V. G., Oksiyuk, O. G., Dikarev, O. V., (2016). *Fundamentals of digital signal processing in digital radio communication systems*. Kyiv : DUT.
7. Babaka, V. P., (2005). *Signal processing in radio channels of digital information transmission systems*. Kyiv : NAU.
8. Kryvutsa, V. G., Barkovsky, V. V., Berkman, L. N., (2007). *Mathematical modeling of telecommunication systems*. Kyiv : Zvyazok.