

Volodymyr Buriachok,

Doctor of Science, professor at department of Information and Cyber Security

Borys Grinchenko,

Kyiv University, Ukraine

Volodymyr Sokolov,

Master of Science, senior lecturer at department of Information and Cyber Security

**ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ АНАЛІЗАТОРІВ
СПЕКТРУ НА БАЗІ RISC ПРОЦЕСОРІВ ATMEL
ATMEGA328 I ARM CORTEX-M3**

**ZWIĘKSZONA PRĘDKOŚĆ ANALIZATORÓW
WIDMA W OPARCIU O PROCESORY RISC ATMEL
ATMEGA328 I ARM CORTEX-M3**

**INCREASE THE SPEED OF SPECTRUM
ANALYZERS BASED ON ATMEL ATMEGA328 AND
ARM CORTEX-M3 RISC PROCESSORS**

Streszczenie

Artykuł analizuje fizyczne podstawy analizy widma i zagrożenia bezpieczeństwa z powodu niemożności zapewnienia wystarczającego poziomu integralności danych i dostępności w sieciach bezprzewodowych. Zbadano urządzenie do budowy spektroanalizatorów. Przeprowadzana jest analiza sprzętu i obwodów systemów. W oparciu o te dane budowane są rozwiązania, które pozwalają stworzyć samodzielne urządzenie oparte na procesorach Atmega328 i Cortex-M3. Opracowano schemat strukturalny i rozwiązano kwestie kordynacji interfejsów istniejących modułów i tablic. Opracowywane są procedury uzyskiwania danych i ich wyświetlania. Oprogra-

mowanie układowe z modułem opartym na płytach Arduino Nano i STM32F103C8 zostało opracowane. Wszystkie wyniki są praktycznie potwierdzone na sprzęcie, a przykłady sprzętu i oprogramowania implementacji analizy widma przez jedno urządzenie na różnych platformach są podane.

Słowa kluczowe: analiza spektrum, sieci bezprzewodowe, siła sygnału, ARM, AVR, STM32.

Abstract

The paper analyzes the physical fundamentals of spectrum analysis and security threats due to the inability to provide sufficient level of data integrity and availability in wireless networks. The device for the construction of spectrum analyzers was searched. The analysis of hardware and circuitry of systems is made. Based on these data, solutions are built that allow you to make a stand-alone device based on the Atmega328 and Cortex-M3 processors. The structural scheme is developed and the questions of coordination of interfaces of existing modules and boards are solved. Procedures for obtaining data and displaying them are developed. The firmware with a module based on Arduino Nano and STM32F103C8 boards has been developed. All results are practically confirmed on hardware, and examples of hardware and software implementation of spectrum analysis by one device on different platforms are given.

Keywords: spectrum analysis, wireless networks, signal strength, ARM, AVR, STM32.

Анотація

У роботі були проаналізовані фізичні основи аналізу спектру і загрози безпеці за рахунок неможливості забезпечити достатній рівень цілісності і доступності даних у безпроводових мережах. Проведено пошук пристроїв для побудови спектроаналізаторів. Зроблено аналіз апаратного забезпечення і схемотехніки систем. На основі цих даних побудовані рішення, які дозволяють зробити окремий автономний пристрій на базі процесорів Atmega328 та Cortex-M3. Розроблено структурні схему і вирішені питання узгодження інтерфейсів існуючих модулів та плат. Розроблена процедури отримання даних і їх відображення. Створені прошивки з модулем на базі плат Arduino Nano та STM32F103C8. Всі результати практично підтверджені на апаратному забезпеченні, та наведені приклади апаратно-програмної реалізації аналізу спектру одним пристроєм на різних платформах.

Ключові слова: аналіз спектру, безпроводові мережі, рівень сигналу, ARM, AVR, STM32.

Огляд проблематики

Отримання інформації про енергетичну складову ефіру в даний момент складає одну із важливіших частин забезпечення цілісності передавання даних. При чому передавання даних безпроводовими каналами зв'язку в завантажених мережах (особливо в міських умовах) призводить до необхідності стеження за станом ефіру не тільки в момент початку передавання даних, а і під час передавання. У вирішенні даної задачі допомагають окремі датчики, які постійно сканують доступний діапазон і працюють разом з основним передавачем.

Основна мета аналізу спектру - отримати актуальну інформацію про перешкоди і збої, та швидко підлаштуватися під зміни. Різні методи аналізу спектру дозволяють організувати отримання інформації різними методами і порівнювати їх один з одним. Вибір методу дозволяє знаходити оптимальне співвідношення між точністю, швидкістю і вартістю кінцевої системи [1].

Зростання кількості безпроводових мереж (особливо в густонаселених міських районах) призводить до їх взаємного впливу одна на одну. Крім того, збільшується число мобільних пристроїв і вбудованих систем, які можуть використовуватись в якості безпроводової точки доступу (наприклад, сімейства модулів ESP8266, ESP32, Onion Omega2 Plus тощо). Для того щоб вирішити проблему ефективного використання частотних ресурсів можна застосувати різні методи:

- централізоване планування безпроводової інфраструктури, правові обмеження на рівні передачі сигналу або потужності [2];
- регулярний моніторинг і ручна адаптація систем, наприклад, використання направлених антен [3];
- впровадження адаптивних систем налаштування (динамічний вибір каналу) на рівні протоколу (IEEE 802.11f, IEEE 802.11k), моніторинг і автоматичне налаштування на рівні приймача деякі виробники (Atheros Spectral Scan Mode) використовують додаткові пристрої для збору інформації про стан безпроводової системи [4].

Але вище наведені методи часто не враховують вплив інших безпроводових технологій, які працюють в тому ж частотному діапазоні, наприклад, за стандартами

IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee, MIWI, WirelessHART, ISA100.11) та інші нестандартні пристрої, також треба враховувати побутові та промислові шуми.

Багато виробників безпроводового обладнання вбудовують алгоритми динамічного вибору каналу, але спектр сканується знаходиться лише в області розташування точки доступу, не зважаючи на положення клієнта. Точка доступу запускається на вільному каналі в місці її знаходження, це в деякій мірі підвищує продуктивність всієї мережі, але не робить її оптимальною (не можливо врахувати всі параметри в поточної мережі: поляризація, висота екранування і відбивання, а також переміщення користувачів). На додаток до інформації від точки доступу слід розглядати частотні налаштування в місці знаходження користувачів (всіх або вибірково) і, на підставі отриманих даних, вибрати найкращий частотний канал. Для того щоб зібрати інформацію, можна використовувати існуючі безпроводові карти, але їх дальність видимості часто обмежується тільки стандартними мережами IEEE 802.11 (і деякі карти навіть не бачать «приховані» мережі). Далі буде розглянуто варіанти реалізації аналізатора спектра частот на різних платформах [5].

Теоретичні засади

Аналізаторам спектра присвоюються коефіцієнти важливості, засновані на їх розташуванні. Точки доступу перемикаються в тихий режим, дані збираються з усіх доступних аналізаторів спектра і безпроводових мережевих плат, усереднюються і обирається найбільш вільний канал. Ініціалізується передача по новому каналу. Процес сканування повторюється [6].

Середнє значення рівня сигналу в каналі:

$$L^{ch} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i, \quad (1)$$

де індекс ch - номер каналу; N - число точок, які належать одному і тому ж каналу; L_i - вимір в точці i^{th} , дБмВт. Для одного циклу вимірювання рекомендується опитувати кожен точку близько 100 разів, відповідно замість L_i краще використовувати середнє значення для числа вимірів.

Середній сигнал від усіх j пристроїв:

$$\overline{L^{ch}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \mu_j L_j^{ch}, \quad (2)$$

де M - кількість аналізаторів спектра; μ - коефіцієнт важливості конкретного пристрою; L_j^{ch} - середній рівень сигналу для конкретного пристрою з (1).

nRF24L01 є однокристальний приймач діапазону 2,4 ГГц, призначений для систем з низьким живленням. Конфігурується і керується через послідовний периферійний інтерфейс (SPI). За допомогою цього інтерфейсу доступні регістри пристрою. Вбудований модулятор заснований на пакетному передаванні даних і підтримує різні режими від ручного управління до автономної роботи. Внутрішня черга (FIFO) забезпечує однорідний потік даних.

Порівняльний аналіз апаратного забезпечення

Розглянемо дві поширені плати (див. табл. 1), на базі яких можна побудувати аналізатор спектру з доступним приймачем: Arduino Nano (на мікроконтролері

ATmega328) і SMT32F103C8 (на Cortex-M3).

Таблиця 1

Основні технічні характеристики

Характеристика	Arduino Nano	STM32F103C8
Мікроконтролер	ATmega328	Cortex-M3
Архітектура	AVR	ARM 32
Робоча напруга, В	1,8-5,5	2,0-3,6
Пам'ять, Кб	32	64
SRAM, Кб	2	20
Частота, МГц	16	72
Аналогові виходи	8	16
Цифрові виходи	22	26
ШІМ	6	16
Сила струму, мА	19	27
Розміри, мм	18×45	23×53

Два варіанти процесорів є представниками RISC-процесорів. В таблиці 2 наведено коротке порівняння головних відмінностей архітектур процесорів на основі AVR Atmel та ARM Cortex.

Таблиця 2

Основні відмінності між AVR та ARM мікроконтролерами

Характеристики	AVR	ARM
Шина (Біт)	8	32
Комунікація	UART, USART, SPI, I2C, USB.	UART, USART, LIN, I2C, SPI, CAN, USB.
Швидкість (Такт/цикл)	1	1
Пам'ять	Flash, SRAM, EEPROM	Flash, SDRAM, EEPROM

Характеристики	AVR	ARM
Архітектура інструкцій	RISC	RISC
Архітектура пам'яті	Модифікована гарвардська	Модифікована гарвардська
Споживання енергії	Низьке	Низьке
Ціна по відношенню до функціоналу	Середня	Низька

Найбільш помітною відмінністю мікроконтролерів є ширина шини, ARM Cortex працює з 32-бітною шиною, що в чотири рази більше за AVR архітектуру. Більша бітність дозволяє використовувати більше пам'яті без додаткових зусиль, швидше виконує операції. Наприклад, множення двох 16-бітних значень займає лише один такт, а у AVR значно більше, так як вхідні дані доводиться спочатку розділяти. Ще однією перевагою на користь ARM є більша кількість інтерфейсів, що забезпечує широке поле варіантів використання та взаємодії з пристроями.

Два варіанти, що порівнюються, привабливі у зв'язку з тим, що мають значну аудиторію користувачів, а через це детальну документацію, великий набір бібліотек, багато додаткового матеріалу і розробок для них.

Практична реалізація спектроаналізаторів

Для першого тестового макету задіяний мікроконтролер Arduino Nano, радіочастотний трансивер nRF24L01 та екран OLED I2C 128×64 (можливе також використання екрану розміром 128×32). Для програмування плати використовуватиметься середовище розробки Arduino IDE для операційної системи Windows. Живлення платформи буде здійснюватися від USB персонального комп'ютера або від автономного джерела потужністю 2 Вт.

В зібраній апаратній системі використовуються:

- плата Arduino Nano на базі Atmel Atmega328;
- радіочастотний приймач nRF24L01;
- екран OLED I2C роздільною здатністю 128×64 точки;
- з'єднувальні кабелі SPI, I2C, USB.

На рисунку 1 показаний макет для дослідження на платформі Arduino Nano.



Рис. 1. Загальний вигляд апаратної платформи Arduino Nano

Програмне забезпечення платформи Arduino Nano складається з середовища для розробки Arduino IDE та бібліотек SPI.h (для роботи з трансивером через SPI), Wire.h (для керування роботою приймача), Adafruit_GFX.h та Adafruit_SSD1306.h (для роботи OLED екрана).

Другий макет побудований на базі апаратно-програмної платформи STM32F103C8. Так як для порівняння двох процесорів необхідні однакові умови, то відповідно і всі складові системи аналізатора спектру аналогічні з аналізатором на основі Arduino Nano, замінений лише

плата на STM32F103C8 на базі Cortex M-3 (див. рис. 2).



Рис. 2. Загальний вигляд апаратної платформи STM32F103C8

Для програмування мікроконтролера Cortex M-3 також було обране середовище розробки Arduino IDE. Щоб мати змогу працювати з ним, перш за все, необхідно змінити стандартний завантажувач пристрою, який дозволить прошивати плати через апаратний USB, а за допомогою програми Flash Loader Demonstrator змінюється прошивка. Також необхідно встановити драйвер для даної плати і модуль STM32 для роботи в середовищі Arduino IDE. Після вищенаведених кроків у списку бібліотек будуть знаходитись аналогічні з Arduino бібліотеки, але для роботи з архі-тектурою Cortex: SPI.h, Wire.h, Adafruit_GFX.h та Ada-fruit_SSD1306_STM32.h.

Екран має роз'єм послідовних ліній даних SDA та тактування SCL, які підключаються до аналогових виходів мікроконтролерів (див. табл. 3).

Таблиця 3

Підключення роз'ємів екрану

Роз'єми I2C	Виходи STM32F103C8	Виходи Arduino Nano
SDA	B7	A4
SCL	B6	A5

Модуль ініціалізується за I2C-адресою 0x3C. Використання Adafruit-бібліотек (GFX та SSD1306) забезпечує можливість виведення тексту та графічної інформації, наприклад, вертикальні лінії будуються за допомогою функції `display.drawFastVLine()`.

Так як програмне забезпечення для двох платформ здійснюється на однаковій мові та в одному середовищі роз-робки, трансивер nRF24L01 ініціалізується аналогічно на Arduino та STM32, з'єднання модуля через SPI виконується по схемі, приведений на рис. 3.



роз'єм
NRF24L01 +

Рис. 3. Позначення роз'ємів для з'єднання через SPI

Для роботи з модулем написані функції, які здійснюють керування модулем: зміну регістрів (getRegister, set-Register), ввімкнення та вимкнення трансивера (powerUp, powerDown, enable, disable), отримання даних з пристрою (setRX, scanChannels) та виведення результатів сканування на екран (outputChannels).

Особливістю отримання даних від модуля nRF24L01 + є наявність у нього лише одного прапора (_NRF24_RPD), що вказує що рівень отриманого сигналу вище або нижче мінус 64 дБмВт. Сканування проводиться кожні 976,5625 кГц, таким чином покривається діапазон 2,400-2,525 ГГц.

Так як для даної частоти чутливість приймача становить мінус 85 дБмВт [7], то при отриманні 200 вимірювань рівень сигналу розраховується за формулою:

$$P_i = L_{min} + \frac{2(L_{av}-L_{min})}{N} \sum_{j=1}^N p_{ij}, \quad (3)$$

де L_{min} - мінімальний рівень, дБмВт; L_{av} - рівень спрацьовування прапора, дБмВт; N - кількість вимірювань; p_{ij} - результат одиничного вимірювання (0 або 1).

З (3) отримуємо окремий випадок для нашого виміру:

$$P_i = -85 + 0.21 \sum_{j=1}^{200} p_{ij}. \quad (4)$$

Результат виводиться у вигляді графіка з 128 значень на екрані. З метою збільшення точності результатів можна збільшити кількість вимірювань. У стандартній програмі виконується 200 ітерацій, але кількість точок вимірювання можна збільшити до 400 з частковою втратою продуктивності. Після проведених змін, помітно, що

платформа з STM32F103C8 працює стабільно, а плата Arduino Nano не здатна забезпечити роботу аналізатора спектру. Оптимальним для процесора Atmega328 була кількість вимірювань не більше 250 разів.

Також варто звернути увагу, що глобальні змінні використовують 1653 байтів (80%) динамічної пам'яті, і залишають 395 байтів для локальних змінних. Низький обсяг доступної пам'яті може призвести до проблеми зі стабільністю роботи.

Наступна робота

Після детального тестування приладів і їх перевірки можна виготовити більш компактне рішення для серійного випуску.

Практична значимість дослідження полягає в тому, що матеріали і результати виконаної роботи можуть бути використані при проектуванні окремої системи аналізу спектру або елементів вже існуючих систем.

Для бази даних апаратних реалізацій можна побудувати комплексну систему для контролю частотного простору і організувати централізоване подання результатів та їх аналіз.

Висновки

Хоча аналізатори спектру побудовані на різних платформах з відмінними архітектурами, але завдяки тому, що використовуються однакові модулі та алгоритми, вдалось порівняти процесори. А також було знайдено оптимальні значення кількості вимірювань за цикл для процесорів, щоб забезпечити їхню стабільну роботу. З заявлених виробником характеристик і дослідів видно, що плата Arduino Nano поступається STM32F103C8, але також може

виконувати функцію аналізатора разом з радіомодулем nRF24L01.

Доцільність практичного використання обумовлена наявністю переваг:

- реалізація з використанням доступних та поширених процесорів;
- автономний аналіз спектру в режимах реального часу;
- оптимізоване програмне забезпечення збільшує швидкодію аналізаторів;
- можливість побудувати комплексну систему для контролю частотного простору.

Перелік літератури:

1. Tshiluna, N. B., et al., “Analysis of Bluetooth and Wi-Fi Interference in Smart Home,” *2016 International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE)*, Durban, 2016, pp. 13-18.
2. Chandra, R., Mahajan, R., Moscibroda, T., Raghavendra, R., & Bahl, P., “A Case for Adapting Channel Width in Wireless Networks,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 4, 2008, p. 135.
3. Astapenya, V., Sokolov, V., “Modified Accelerating Lens as a Means of Increasing the Throughput, Range and Noise Immunity of IEEE 802.11 Systems,” *2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, 2015, pp. 267-269.
4. Robitzsch, S., Murphy, L., & Fitzpatrick, J., “An Analysis of the Received Signal Strength Accuracy in 802.11a Networks Using Atheros Chipsets: A Solution Towards Self Configuration,” *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011.

5. Sokolov, V., Carlsson, A., & Kuzminykh, I., "Scheme for Dynamic Channel Allocation with Interference Reduction in Wireless Sensor Network," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Informatics. Science and Technology (PIC S&T)*, 2017, pp. 564-568.
6. Scott Armitage, "Low-Cost 2.4-GHz Spectrum Analyzer," *Circuit Cellar*, issue 189, 2006, pp. 18-22.
7. "Spectrum Analyzer for 2.4 GHz Band - Elektronika.ba," Elektronika.ba, 2018:
8. <http://www.elektronika.ba/712/spectrum-analyzer-for-24-ghz-band/> [dostęp: 27.10.2018].