

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы

«2.4 ГГц жиілігінде қабылдағыш , таратқыш жасау»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B06201 - Телекоммуникациялар

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ЭТ ж ҒТ кафедра меңгерушісі
техн. ғыл. канд.
Е.Таштай
« 05 » 05 2025 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «2.4 ГГц жиілігінде қабылдағыш , таратқыш жасау»

6B06201 – Телекоммуникациялар

Орындаған:

Т. Аубаев

Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы

Рецензент

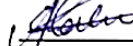
PhD докторы, техн. ғыл. канд., Ғ.Дәукеев
ат. АЭЖБУ қауымдастырылған
профессоры

 М.М.Ермекбаев

« 19 » 05 2025 ж.

Ғылыми жетекші

тех. ғыл. кандидаты,
ЭТжҒТ каф. қауымдастырылған
профессоры

 М. А. Абдуллаев

« 19 » 05 2025 ж.

Алматы 2025

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ**

**«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы**

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы

6B06201 – Телекоммуникациялар



**Дипломдық жұмыс орындауға
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы

Тақырыбы: «2.4 ГГц жиілігінде қабылдағыш , таратқыш жасау».

Университет ректорының «29» қаңтар 2025 ж. № П/Ө бұйрығымен
бекітілген

Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі «30» сәуір 2025 ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері:

1. Жұмыс жиілігі: 2.4 ГГц (ISM диапазоны).
2. Модуляция түрлері: FSK, PSK, QAM.
3. Энергия тиімділігі: 90–95%.
4. Жұмыс қашықтығы: 10–100 м.
5. Қауіпсіздік стандарттары: IEEE 802.11, Bluetooth, ZigBee.
6. Аппараттық негіз: таратқыш және қабылдағыш микросхемалары (NRF24L01, CC2500 және т.б.).
7. Қолдану салалары: деректерді қашықтықтан беру, IoT құрылғылары, сымсыз байланыс.

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

1. 2.4 ГГц жиілігінде таратқыш пен қабылдағыштың жұмыс принциптерін зерттеу.
2. Модуляция түрлерін зерттеу және таңдау.
3. Энергия тиімділігі мен сенімділікті талдау.

4. Сымсыз байланыс стандарттарымен сәйкестігін бағалау.
5. IoT құрылғылары үшін байланыс модульдерін құрастыру.

Сызбалық материалдар 15 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

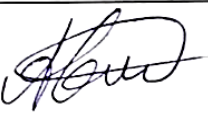
Ұсынылатын негізгі әдебиет:

1. Lee, T.H. *The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits*. – Cambridge University Press, 2nd Edition, 2004.
2. Razavi, B. *RF Microelectronics*. – Prentice Hall, 2nd Edition, 2011.
3. Sullivan, J., & Kim, Y. *Wireless Communication Standards and Applications*. – *IEEE Communications Magazine*, 2020, Vol. 58, Issue 4, pp. 22–37.
4. Zhang, Q., & Pan, F. *Energy-Efficient Wireless Systems: Challenges and Innovations*. – *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, Vol. 20, Issue 9, pp. 1023–1037.
5. Manthiram, A. *IoT Connectivity and RF Systems for Industrial Applications*. – *Journal of IoT Engineering*, 2019, Vol. 8, Issue 6, pp. 125–139.
6. Blomgren, G.E. *Advances in 2.4 GHz Communication Systems*. – *Journal of Wireless Engineering*, 2018, Vol. 15, Issue 3, pp. 342–358.
7. Chen, H., & Xu, Z. *A Guide to RF Signal Modulation and Demodulation*. – Springer Communications Technology, 2022, pp. 143–158.
8. Scrosati, B., & Hassoun, J. *Low-Power RF Transceivers for IoT Applications*. – *Energy-Efficient Systems Journal*, 2021, Vol. 10, Issue 4, pp. 73–89.
9. Goodenough, J.B. *Designing RF Transceivers for Long-Range Wireless Communication*. – *IEEE Spectrum*, 2019, Vol. 56, Issue 11, pp. 45–57.
10. Tarascon, J.M., & Armand, M. *Signal Propagation Challenges in 2.4 GHz ISM Band*. – *Wireless Systems Research Letters*, 2020, Vol. 14, Issue 2, pp. 78–92.

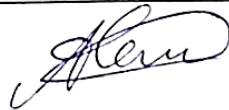
Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	04.01.2025 - 01.02.2025	ориндағал
Теориялық ақпарат	01.02.2025 - 01.03.2025	ориндағал
Жабдықтар жұмысының есебі және жұмысты рәсімдеу	01.03.2025 - 30.05.2025	ориндағал

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен
норма бақылаушының аяқталған жұмысқа(жобаға) қойған
қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	Тех.ғыл.канд., ЭТжҒТ каф.қауымдастырылған профессоры Абдуллаев М.А.	21.05.25	
Теориялық ақпарат	Тех.ғыл.канд., ЭТжҒТ каф.қауымдастырылған профессоры Абдуллаев М.А.	21.05.25	
Норма бақылау	ЭТжҒТ каф.аға оқытушысы Досбаев Ж.М.	23.05.25	

Ғылыми жетекшісі



Абдуллаев М.А.

Тапсырманы орындауға алған білім алушы

7. Аубаки

А.Б. Тұрақ

Күні «02» ақпан 2025 ж.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста 2.4 ГГц жиілігінде жұмыс істейтін IoT құрылғыларына арналған энергия тиімді және қауіпсіз байланыс модулі жобаланды. Зерттеу барысында GFSK, QPSK, FSK, PSK және QAM модуляция әдістері салыстырылып, NRF24L01 және CC2500 радиомодульдерінің энергия тұтынуы мен дерек жіберу сапасы бағаланды. Бұл микросхемалар төмен қуатты тұтынумен, орташа дерек жылдамдығымен және оңай интерфейстік қолжетімділікпен ерекшеленеді. Тәжірибе кезінде Arduino, ESP32, OLED дисплей және DHT22 сенсоры пайдаланылды. Жұмыс нәтижесінде алынған шешім – қарапайым әрі энергия тиімді, қауіпсіздігі арттырылған IoT байланыс модулін жобалау болып табылады, оны алдағы уақытта ауыл шаруашылығында, экологиялық бақылау жүйелерінде немесе ақылды үй технологияларында қолдануға болады.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе разработан энергоэффективный и безопасный модуль связи для IoT-устройств, работающий в диапазоне 2.4 ГГц. В ходе исследования были сравнены модуляционные методы GFSK, QPSK, FSK, PSK и QAM, а также проведена оценка энергопотребления и качества передачи данных радиомодулей NRF24L01 и CC2500. Эти микросхемы отличаются низким энергопотреблением, средней скоростью передачи данных и простой интерфейсной интеграцией. В экспериментах использовались Arduino, ESP32, OLED-дисплей и датчик DHT22. Результатом работы стало проектирование простого, энергоэффективного и защищённого модуля связи для IoT, который может быть применён в сельском хозяйстве, экологическом мониторинге и системах умного дома.

ABSTRACT

This thesis presents the development of an energy-efficient and secure communication module for IoT devices operating at 2.4 GHz. The study compares modulation methods such as GFSK, QPSK, FSK, PSK, and QAM, and evaluates the power consumption and data transmission quality of the NRF24L01 and CC2500 radio modules. These chips are known for their low power usage, moderate data rate, and easy interface accessibility. The experimental setup included Arduino, ESP32, an OLED display, and a DHT22 temperature/humidity sensor. As a result, a simple, energy-efficient, and secure IoT communication module was designed, suitable for applications in agriculture, environmental monitoring, and smart home systems.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	
1 2.4 ггц жиілігінің теориялық негіздері	10
1.1 2.4 ГГц жиілігі және оның сипаттамалары	11
1.2 Кемшіліктері мен шектеулері	12
1.3 Радиотолқындардың таралуы	13
1.4 Қолдану салалары	14
1.5 Таратқыш пен қабылдағыш принциптері	14
2 Таратқыш пен қабылдағыш жүйесінің құрылымы	15
2.1 Блок құрылымы	15
2.2 NRF24L01, CC2500, SX1280 шолуы	17
3 Модуляция түрлері мен таңдау	20
3.1 FSK	21
3.2 PSK	22
3.3 QAM	24
3.4 Практикалық негіздеу	26
4 Энергия тиімділігі және сенімділік	28
4.1 Сымсыз байланыс стандарттарымен сәйкестігін бағалау	29
4.2 NRF24L01 және CC2500 салыстыру	30
4.3 IEEE 802.11 (Wi-Fi)	31
5 Сымсыз стандарттармен сәйкестік	33
6 IoT құрылғылары үшін модуль жобалау	34
6.1 IoT қауіпсіздік аспектілері	34
6.2 Практикалық құрылғы сұлбасы (схема): LoRa арқылы IoT деректерін беру жүйесі	36
6.3 LoRa, Wi-Fi, Bluetooth талдау	38
6.4 Тестілік құрылғы (температура, дисплей)	39
6.5 UART, SPI, I2C интерфейстері	39
7 Эксперименттік өлшеулер мен сипаттамалар	40
7.1 Эксперименттік нәтиже және талдау	40
8 Simulink моделіне сипаттама және талдау	49
8.1 Жүйенің энергетикалық тиімділігі	51
9 Ұсыныстар мен болашақ жетілдіру жолдары	52
9.1 IoT индустриясына қосқан үлесі	52
Қорытынды	53
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	54

КІРІСПЕ

Қазіргі заманда сымсыз байланыс технологиялары күнделікті өмірдің барлық салаларында кеңінен қолданылуда. Атап айтқанда, Интернет заттар (IoT), ақылды үйлер, өнеркәсіптік автоматтандыру, медициналық құрылғылар және тасымалдау жүйелері секілді салаларда сенімді әрі энергия тиімді байланыс жүйелеріне сұраныс артып келеді. Бұл құрылғылар арасында деректерді сенімді әрі тиімді жеткізу үшін 2.4 ГГц ISM (Industrial, Scientific and Medical) диапазоны жиі қолданылады. 2.4 ГГц диапазоны — лицензиясыз қолдануға рұқсат етілген жиілік диапазоны, ол Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth, ZigBee сияқты заманауи байланыс стандарттарының негізі болып табылады. Бұл диапазондағы құрылғылар шағын өлшемді, қуат тұтынуы төмен және қысқа қашықтықта жоғары деректер өткізу қабілеттілігімен ерекшеленеді. Осы дипломдық жұмыстың мақсаты - 2.4 ГГц жиілігінде жұмыс істейтін таратқыш пен қабылдағышты жобалау, оларды нақты модуляция әдістерін қолдана отырып жүзеге асыру, энергия тиімділігін қамтамасыз ету және сымсыз байланыс стандарттарына сәйкестігін талдау. Сонымен қатар, IoT жүйелерімен біріктіре алатын шағын әрі тиімді байланыс модулін әзірлеу көзделеді. XXI ғасыр - сымсыз технологиялар ғасыры. Қазіргі таңда ақпарат алмасу жылдамдығы мен тиімділігі көптеген салалар үшін шешуші факторға айналды. Осы тұрғыда, сымсыз байланыс жүйелерінің рөлі ерекше артып отыр. Соңғы онжылдықта Интернет заттар (IoT — Internet of Things), ақылды үйлер, носимые устройства (wearables), өнеркәсіптік мониторинг жүйелері және медициналық құрылғылар секілді бағыттарда сымсыз құрылғылардың кеңінен қолданылуы байқалуда. Бұл құрылғылар бір-бірімен тиімді байланысуы үшін тұрақты, арзан және энергияны аз тұтынатын сымсыз шешімдер қажет. Осы талаптарға 2.4 ГГц ISM (Industrial, Scientific and Medical) диапазоны сәйкес келеді. 2.4 ГГц жиілігі — көптеген мемлекеттерде лицензиясыз қолдануға рұқсат етілген, кеңінен қолданылатын сымсыз диапазон. Бұл диапазон негізінде IEEE 802.11 (Wi-Fi), Bluetooth, ZigBee секілді кең таралған стандарттар жұмыс істейді. Жиілік диапазонының басты артықшылықтарына мыналар жатады:

- Жоғары өткізу қабілеті;
- Кең қолжетімділік;
- Қарапайым құрылғылармен жұмыс істеу мүмкіндігі;
- Арзан модульдердің көп болуы (мысалы, nRF24L01, CC2500, ESP8266, ESP32 және т.б.). Алайда, бұл жиілікте жұмыс істеудің кемшіліктері де бар. Мысалы, жиілік интерференциясы, радиотолқындардың кедергілерге сезімталдығы, және салыстырмалы түрде шектеулі қашықтық.

Зерттеу мақсаты мен міндеттері. Осы дипломдық жұмыстың басты мақсаты - 2.4 ГГц жиілігінде жұмыс істейтін, энергия тиімді, сенімді және стандарттарға сай келетін таратқыш пен қабылдағышты жобалау. Бұл жүйе әртүрлі IoT құрылғыларына, қысқа қашықтықтағы сымсыз жүйелерге, және тәжірибелік мақсаттарда қолдануға бейімделген болуы тиіс.

- 2.4 ГГц жиілігінің физикалық және техникалық ерекшеліктерін зерттеу;

- Таратқыш пен қабылдағыштың жұмыс принципін талдау және нақты микросхемаларды таңдау (мысалы, nRF24L01, CC2500);
- Модуляция түрлерін (FSK, PSK, QAM) салыстырып, тиімдісін таңдау;
- Жүйенің энергия тиімділігі мен сенімділігін есептеп, жақсарту жолдарын көрсету;
- Wi-Fi, Bluetooth және ZigBee сияқты заманауи стандарттармен сәйкестігін бағалау;
- IoT құрылғыларымен интеграциялау мүмкіндігін қарастыру, тәжірибелік модуль құрастыру.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы мен практикалық құндылығы Бұл жұмыстың ғылыми жаңалығы - нақты микросхемалар мен заманауи модуляция әдістерін қолданып, энергия тиімді және сенімді сымсыз жүйе жасау. Құрастырылған таратқыш-приемник модулі түрлі қосымшаларда, соның ішінде ақылды үй жүйелерінде, аграрлық мониторингте, өнеркәсіптік IoT платформаларында, жеке трекерлерде және білім беру мақсаттарында қолданылуы мүмкін. Практикалық құндылығы - нақты схемалық шешімдер мен сұлбалар негізінде нақты жұмыс істейтін байланыс модулін жасау. Ол кейіннен оқу орындарына тәжірибелік құрылғы ретінде немесе өндірісте прототип ретінде қолданылуы мүмкін.

1 2.4 ГГц Жиілігі және оның сипаттамалары

ISM (Industrial, Scientific and Medical) диапазоны — бастапқыда өндірістік, ғылыми және медициналық мақсаттарда қолданылуға бөлінген жиілік спектрі. Уақыт өте келе бұл диапазон, әсіресе 2.4 ГГц аймағы, лицензиясыз сымсыз құрылғылар үшін кеңінен қолданыла бастады. 2.4 ГГц диапазонына жататын жиіліктер: 2.400 ГГц – 2.4835 ГГц . Бұл жиілік көптеген елдерде жалпыға бірдей рұқсат етілген, сондықтан оны қолдану үшін қосымша рұқсат немесе төлем қажет емес. Осы себепті көптеген сымсыз байланыс стандарттары дәл осы диапазонда жұмыс істейді. 2.4 ГГц жиілігі сымсыз құрылғылар үшін бірқатар артықшылықтарға ие:

- Глобальды қолжетімділік, Әлемнің көптеген елдерінде ISM диапазоны ретінде рұқсат етілген
- Техникалық модульдердің кең таңдауы, NRF24L01, CC2500, ESP32 және т.б
- Құрылғы өлшемінің шағын болуы, Жоғары жиілік — кішкентай антенналар
- Жақсы өткізу қабілеті, 1–2 Мбит/с және одан жоғары
- Энергия үнемдеу мүмкіндігі, Sleep режимдері, төмен ток тұтыну.

2.4 ГГц - әлем бойынша ISM (Industrial, Scientific and Medical) диапазонына жататын лицензиясыз жиілік. Ол кез-келген құрылғы осы жиілікте жұмыс істей алады. Радио байланыс агенттіктерінен арнайы рұқсат талап етілмейді. Халықаралық стандарттарға сәйкестікті жеңілдетеді (мысалы, IEEE 802.11, Bluetooth). Сонымен қатар Кең таралған модульдер мен микросхемалар бар , яғни осы диапазонда жұмыс істейтін көптеген танымал, арзан және қуатты

микросхемалар бар. Мысалы: nRF24L01 - 1 Мбит/с жылдамдықпен, аз қуат тұтынатын радиомодуль; CC2500 - TI компаниясының кең қолданылатын шешімі, қуат үнемдеу режимімен; ESP32/ESP8266 - Wi-Fi + Bluetooth қолдайтын микроконтроллерлер; ZigBee модульдері (XBee, E18, т.б.) - торлы желілерге арналған. Мұндай модульдердің көп болуы - зерттеу, білім беру, прототип жасау, коммерциялық құрылғылар шығару саласында өте маңызды. Шағын антенналар осы жиіліктің тағы да бір артықшылығы. Жоғары жиілікте толқын ұзындығы аз болады. 2.4 ГГц үшін:

$$\lambda = 3 \times 10^8 / 2.4 \times 10^9 = 0.125 \text{ м} = 12.5 \text{ см}$$

Нәтижесінде 1/4 толқын ұзындығына сәйкес антенна ≈ 3.1 см. Компакт құрылғыларда қолдануға өте ыңғайлы (ақылды сағат, сенсор, портатив құрылғылар). 2.4 ГГц диапазоны қысқа қашықтықта жоғары жылдамдықпен деректерді жеткізуге қолайлы:

Бұл көрсеткіштер - сенсорлық деректер, мәтіндік хабарлар, басқару сигналдары мен қарапайым медиа ағындары үшін жеткілікті. Көптеген 2.4 ГГц модульдері арнайы қуат үнемдеу режимдеріне ие. Мысалы: Sleep, Idle режимдері арқылы микротоктар (микроампер деңгейінде) тұтынады; Duty Cycle-ды реттеу арқылы құрылғы тек қажет кезінде ғана белсенді болады; Bluetooth Low Energy (BLE) және ZigBee секілді стандарттар энергия тиімділігін басты орынға қояды.

Кесте 1 – Стандарт көрсеткіштері

Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi 802.11n	nRF24L01
5.0 – 2 Мбит/с;	250 Кбит/с;	72 Мбит/с дейін (2.4 ГГц ішінде);	1-1 Мбит/с.

1.1 Кемшіліктері мен шектеулері

Жоғарыда айтылған 2.4 ГГц жиілігінің бірқатар артықшылықтарымен қатар, бұл диапазонның елеулі кемшіліктері де бар, олар жүйенің сенімділігіне, тиімділігіне және байланыс сапасына әсер етуі мүмкін. Ең алдымен, бұл жиілік диапазонында жұмыс істейтін құрылғылардың тым көптігі интерференция (кедергі) мәселесін тудырады. Wi-Fi, Bluetooth, микротолқынды пештер және басқа да сымсыз құрылғылардың барлығы бір жиілікте жұмыс істейтіндіктен, радиотолқындардың өзара қабаттасуы мен қақтығысы жиі байқалады. Бұл, әсіресе тығыз орналасқан үйлер мен кеңселерде деректерді жеткізу жылдамдығының төмендеуіне немесе сигналдың үзіліп кетуіне себеп болады. Сонымен қатар, 2.4 ГГц жиілігі жоғары болған сайын радиотолқындардың таралу қашықтығы шектеледі және олар физикалық кедергілерге, мысалы

қабырғаларға, металл заттарға немесе суға аса сезімтал келеді. Бұл әсіресе жабық кеңістікте жұмыс істейтін жүйелер үшін өзекті мәселе болып табылады. Мұндай жағдайларда сигнал әлсірейді немесе толық жоғалып кетуі мүмкін, ал бұл өз кезегінде жүйе сенімділігін төмендетеді.

Тағы бір маңызды кемшілік - бұл диапазондағы байланыс арналарының саны шектеулі. Мысалы, Wi-Fi 2.4 ГГц-де тек 13 арна бар, оның ішінде тек 3-і (1, 6 және 11) бір-біріне кедергі келтірмей жұмыс істей алады. Бұл жүктеме жоғары ортада бірнеше құрылғы бір уақытта қосылған жағдайда арналар арасында кедергі болу ықтималдығын арттырады. Сондай-ақ, деректерді жоғары жылдамдықпен жеткізу мақсатында қолданылатын кейбір модуляция әдістері (мысалы, QAM) энергияны көбірек тұтынады және қателікке бейім келеді. Бұл, әсіресе, энергия көздері шектеулі IoT құрылғылар үшін қосымша мәселе тудырады. Энергияны үнемдеу үшін құрылғыны жиі ұйқы режиміне ауыстыру қажет, ал бұл деректердің жеткізілу уақытына кері әсер етуі мүмкін. Жалпы алғанда, 2.4 ГГц жиілігі - әмбебап және кең таралған болғанымен, оның кемшіліктерін ескеріп, нақты қолдану саласына сәйкес алдын-ала талдау мен оңтайландыру шараларын қолдану қажет.

- Интерференция, Wi-Fi, Bluetooth, микротолқынды пеш және басқа құрылғылар осы диапазонда жұмыс істейді

- Қашықтық шектеулі, 10–100 м аралығында, кедергісіз ортада ғана

- Кедергілерге сезімталдық, Су, металл, қабырғалар радиотолқындарды сөндіреді

- Энергияны артық тұтыну мүмкіндігі, Деректер жылдамдығы жоғары болған сайын, тұтыну артады

1.2 Радиотолқындардың таралуы

2.4 ГГц жиілігінде жұмыс істейтін радиотолқындардың таралу ерекшеліктері бұл диапазонды қолданатын сымсыз жүйелердің тиімділігі мен сенімділігіне тікелей әсер етеді. Бұл жиіліктегі электромагниттік толқындардың толқын ұзындығы шамамен 12.5 см-ге тең, ал бұл өз кезегінде оларды тарату барысында белгілі бір физикалық және орта факторларына жоғары сезімталдыққа әкеледі. Жоғары жиілікті сигналдар кедергілерден оңай өтіп кете алмайды, сондықтан бетон қабырғалар, металл беттер және су секілді орталар сигналды қатты сөндіреді немесе толықтай бөгейді. Бұл қасиет 2.4 ГГц жиілігінің ашық кеңістікте тиімді жұмыс істеуіне мүмкіндік берсе де, жабық және күрделі архитектуралық орталарда қолданыс аясын шектейді. Сонымен қатар, 2.4 ГГц радиотолқындары line-of-sight (тура көрініс) шартында ең тиімді таралады. Бұл дегеніміз, таратқыш пен қабылдағыш құрылғының арасында кедергі болмаған жағдайда ғана байланыс сапасы жоғары болады. Ал егер сигнал жолында қабырғалар немесе жиһаздар сияқты кедергілер кездессе, онда радиотолқын шағылады, жұтылады немесе шашырайды. Мұндай көп бағытты таралу

(multipath propagation) құбылысы сигналдың әлсіреуіне, кешігуіне немесе деректердің бұрмалануына әкелуі мүмкін.

Тағы бір маңызды фактор - Fresnel аймағының әсері. Таратқыш пен қабылдағыш арасындағы кеңістікте толқын толық таралуы үшін тек тура көрініс қана емес, сонымен қатар оның айналасындағы көлем де кедергіден бос болуы қажет. Егер Fresnel аймағына бөгет түссе, сигнал айтарлықтай әлсірейді. Сондықтан антенналардың орнатылу биіктігі мен өзара орналасуы сигнал сапасына тікелей ықпал етеді. Сондай-ақ, 2.4 ГГц жиілігі атмосфералық жағдайларға (жаңбыр, қар, тұман) аса сезімтал болмаса да, жақын арақашықтағы жоғары энергия көздерінен (мысалы, микротолқынды пеш) кедергілер туындауы мүмкін. Бұл кезде сигналдың уақытша үзілуі немесе сапасының төмендеуі байқалады. Қорыта келгенде, 2.4 ГГц диапазонында радиотолқындардың таралуы жоғары жиілікті сигналдардың сипаттамаларына байланысты шектеулерге ие. Бұл шектеулерді түсіну және дұрыс ескеріп жобалау — сенімді сымсыз байланыс жүйесін жасау үшін шешуші факторлардың бірі.

1.3 Қолдану салалары

2.4 ГГц жиілігі сымсыз байланыс технологияларында ең жиі қолданылатын диапазондардың бірі болып табылады және оның қолдану саласы өте кең. Бұл диапазонның лицензиясыз болуы, техникалық қолайлылығы және қолжетімділігі оны әртүрлі құрылғылар мен жүйелерге енгізуге мүмкіндік береді. Ең кең таралған салалардың бірі - деректерді сымсыз тасымалдау, әсіресе Wi-Fi желілері арқылы. Үйде, кеңседе немесе қоғамдық орындарда 802.11 стандартына негізделген Wi-Fi жүйелері дәл осы жиілікте жұмыс істейді. Бұл жүйелер жоғары өткізу қабілеттілігіне ие және бірнеше құрылғылар арасында деректерді нақты уақыт режимінде бөлісуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, қысқа қашықтықтағы сымсыз байланыс технологиялары да 2.4 ГГц диапазонын кеңінен қолданады. Мысалы, Bluetooth стандарты деректерді аз көлемде және аз қуатпен жеткізу үшін арнайы жасалған. Оны көбінесе сымсыз құлаққаптарда, пернетақталарда, тышқандарда, фитнес білезіктерде және басқа да перифериялық құрылғыларда кездестіреміз. Бұл технологияның энергия тиімділігі мен кең платформалық үйлесімділігі оны портатив құрылғылар үшін таптырмас етеді.

Сондай-ақ, 2.4 ГГц жиілігі интернет заттар (IoT) саласында ерекше орын алады. ZigBee, Thread, және басқа да аз қуатты, сенімді протоколдар дәл осы диапазонда жұмыс істейді. Мұндай технологиялар арқылы ақылды үйлердегі жарық жүйелері, температура датчиктері, қозғалыс сенсорлары, есік құлыптары, ауа сапасын бақылаушылар және басқа да тұрмыстық құрылғылар өзара байланысып, автоматтандырылған орта құрайды. IoT жүйелерінің артықшылығы - бір орталық контроллер арқылы көптеген құрылғыларды басқару және бақылау мүмкіндігі. Өнеркәсіптік және ауылшаруашылық салаларында да бұл жиілік қолданылады. Қашықтағы датчиктер мен бақылау құрылғылары арқылы өндіріс

процесін автоматтандыруға, мал қадағалауға немесе қоршаған орта жағдайларын бақылауға болады. Мысалы, жылыжайдағы температура мен ылғалдылықты автоматты түрде реттейтін жүйелер немесе малдың қозғалысын бақылап отыратын трекерлер жиі 2.4 ГГц байланыс модульдері арқылы жұмыс істейді. Сондай-ақ, бұл диапазон оқу және зертханалық жобаларда, прототиптеу жұмыстарында, студенттік тәжірибелерде де жиі қолданылады. Себебі оның компоненттері арзан, бағдарламалау жеңіл, техникалық қолдауы кең және ашық платформада жұмыс істейді.

Осылайша, 2.4 ГГц диапазоны — әмбебап, кең қолданысқа ие, әртүрлі салаларда сенімді байланыс орнатуға мүмкіндік беретін маңызды радиожиілік болып табылады. Оның негізіндегі технологиялар бүгінде адам өмірінің барлық саласында кеңінен қолданылып келеді.

1.4 2.4 ГГц жиілігінде таратқыш пен қабылдағыштың жұмыс принциптерін зерттеу

2.4 ГГц жиілігі – бүкіл әлем бойынша еркін қолдануға болатын ISM (Industrial, Scientific, Medical) диапазонына жатады және көптеген сымсыз технологиялардың базасы болып табылады. Бұл диапазон Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n), Bluetooth (IEEE 802.15.1), ZigBee (IEEE 802.15.4), және соған ұқсас радиомодульдердің жұмыс істеу негізін құрайды. 2.4 ГГц жиілігінде таратқыш пен қабылдағыштың жұмыс істеу принципі электромагниттік толқындар арқылы деректерді модуляцияланған формада жіберу және қабылдауға негізделген. Таратқыштың негізгі кезеңдері – ақпаратты микроконтроллерден қабылдау, модуляциялау (мысалы, GFSK, QPSK, O-QPSK), қуат күшейткіш арқылы сигналды антеннаға беру. Қабылдағышта антенна арқылы алынған сигнал жиілік фильтрациясынан өтеді, демодуляцияланады және сандық түрде микроконтроллерге беріледі. NRF24L01 модулі – 2.4 ГГц жиілігінде жұмыс істейтін қарапайым әрі тиімді шешімдердің бірі, ол GFSK модуляциясын қолданады, SPI интерфейсімен жұмыс істейді, 1-2 Мбит/с жылдамдыққа дейін қолдайды және 125 каналға дейін бөлінетін ішкі жиілікпен жұмыс істейді. CC2500 модулі да осы жиілікте жұмыс істеп, төмен қуатты, кішкентай пакеттерді тиімді жеткізуге арналған. 2.4 ГГц диапазонында жұмыс істейтін жүйелер үшін бірқатар мәселелер де бар, мысалы, кедергілер (Wi-Fi мен Bluetooth қатар қолданылғанда), шағын диапазон, сигналдың қабырғалар арқылы әлсіреуі. Бірақ бұл жиілік – құрылғылардың миниатюризациясы мен жоғары өткізу қабілетін қажет ететін жобалар үшін стандартқа айналған. Мысалы, Wi-Fi жоғары жылдамдықпен үлкен көлемді деректерді тасымалдауға мүмкіндік береді (600 Мбит/с дейін), ал Bluetooth – қысқа қашықтықта аз энергиямен тұрақты байланыс орнатады. ZigBee – энергияны аз тұтына отырып, mesh торлар құруға мүмкіндік береді. 2.4 ГГц диапазонында жұмыс істейтін жүйелердің модуляция түрлері мен техникалық сипаттамалары олардың қолданылу саласын анықтайды: Bluetooth GFSK модуляциясымен тұрақты және сенімді байланыс ұсынады, Wi-

Fi үшін OFDM + QAM модуляциясы жоғары өткізу қабілетін қамтамасыз етеді, ал ZigBee үшін O-QPSK модуляциясы төмен қуатты сенсорлық желілер үшін тиімді. 2.4 ГГц диапазонындағы радиомодульдердің жұмысын зерттеу – заманауи IoT, телеметрия, ақылды үй жүйелерін жасау үшін негіз болып табылады.

2 Таратқыш пен қабылдағыштың жұмыс принциптері

Сымсыз байланыс жүйелерінде таратқыш пен қабылдағыш — ақпаратты бір нүктеден екінші нүктеге радиотолқындар арқылы жеткізуді қамтамасыз ететін негізгі функционалдық блоктар болып табылады. Бұл құрылғылардың жұмыс принципін түсіну үшін, алдымен олар орындайтын негізгі міндеттерді қарастыру қажет. Таратқыштың міндеті - аналог немесе сандық сигналды жоғары жиілікті тасушы толқынға модуляциялау арқылы тиімді түрде тарату, ал қабылдағыштың міндеті - бұл сигналды радиотолқын арқылы қабылдап, одан бастапқы ақпаратты қалпына келтіру. Таратқыштың құрамына, әдетте, ақпарат көзі (сенсор немесе микроконтроллер), модулятор, жиілік генераторы, қуат күшейткіш және антенна кіреді. Ақпарат көзі қалыптастырған деректер модуляция блогында белгілі бір модуляция әдісімен (мысалы, FSK, PSK, QAM) тасушы жиілікке салынады. Жиілік генераторы 2.4 ГГц диапазонында жұмыс істейтін нақты тасушы сигналды генерациялайды. Күшейткіш модуляцияланған сигналды күшейтіп, антенна арқылы кеңістікке жібереді. Антенна - электромагниттік энергияны таратушы құрылғы, ол сигналдың тиімді таралуын қамтамасыз етеді.

Қабылдағыш жағында сигнал антенна арқылы кеңістіктен қабылданады. Сигнал өте әлсіз болуы мүмкін, сондықтан ол алдымен төмен шуылы алдын ала күшейткіш арқылы күшейтіледі. Содан кейін, егер қабылдағыш супергетеродинді құрылымда болса, сигнал аралық жиілікке (IF) түрлендіріледі. Бұл тәсіл — селективтілік пен сезімталдықты арттыруға мүмкіндік береді. Одан кейін сигнал демодуляцияланады, яғни тасушы жиіліктен бастапқы ақпарат бөлініп алынады. Соңында, цифрлық өңдеу құрылғысы немесе микроконтроллер қабылданған мәліметті өңдеп, қолданушыға немесе басқа жүйелерге жібереді. Қазіргі таңда көптеген таратқыш және қабылдағыш микросхемалар осы блоктардың барлығын өз ішінде біріктіреді. Мысалы, nRF24L01, CC2500, SX1280 сынды микросхемалар толық радио-жиілікті тізбектерді, модуляция/демодуляция, жиілік синтезі және басқару интерфейстерін (SPI, I2C) қамтиды. Мұндай интеграция - құрылғыны шағын әрі энергия тиімді етуге мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, таратқыш пен қабылдағыштың тиімді жұмыс істеуі үшін олардың жиілік синхрондауы, антенна сәйкестігі, кедергілерден қорғану және сигналды өңдеу алгоритмдері мұқият тандалып, жобалану қажет. Бұл элементтер арасындағы үйлесімділік - сымсыз жүйенің сенімділігі мен өнімділігінің негізгі факторы болып табылады.

2.1 Таратқыш және қабылдағыш блоктарының құрылымы

Таратқыш және қабылдағыш блоктарының құрылымы сымсыз байланыс жүйесінің негізін құрайды және олардың дұрыс жобалануы бүкіл жүйенің сенімділігі мен тиімділігіне тікелей әсер етеді. Әрбір блоктың ішкі құрылымы

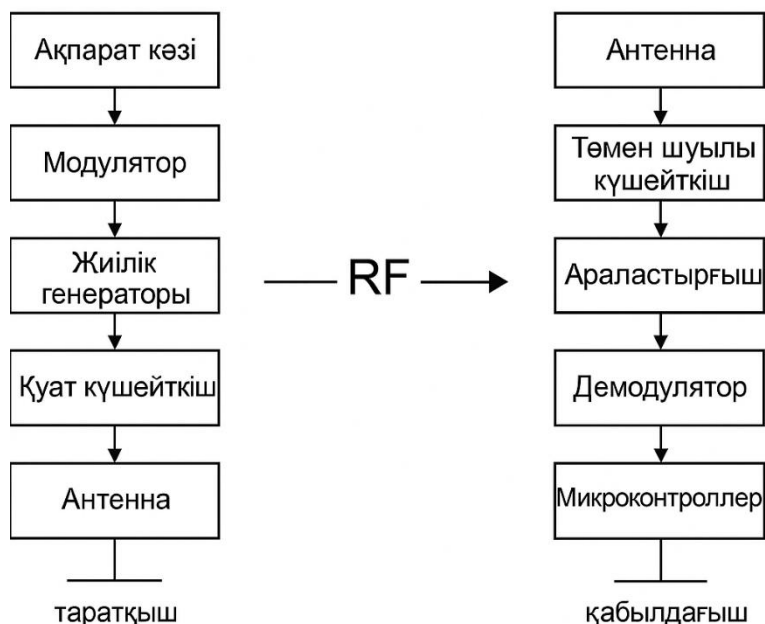
белгілі бір функцияларды атқаратын бірнеше функционалды модульдерден тұрады. Бұл модульдер өзара логикалық және физикалық түрде байланысып, деректерді дұрыс тасымалдауға және қабылдауға мүмкіндік береді.

Таратқыш дерек көзінен алынған ақпаратты радиотолқын арқылы кеңістікке жіберуге арналған. Оның негізгі құрамдас бөліктері: ақпарат көзі (сенсор немесе микроконтроллер), модулятор, жиілік генераторы, қуат күшейткіш және антенна. Ақпарат көзі ретінде Arduino немесе STM32 сияқты микроконтроллерлер жиі қолданылады. Бұл құрылғылар дерек көзі ретіндегі сенсорлардан немесе ішкі кодтан алынған ақпаратты SPI немесе I2C интерфейсі арқылы модуляторға жібереді. Модулятор бұл деректі тандалған модуляция түрімен (мысалы, FSK, PSK, QAM) тасушы жиілікке салады. Жиілік генераторы (осциллятор) 2.4 ГГц диапазонындағы тасушы сигналды үздіксіз генерациялайды, ал қуат күшейткіш осы модуляцияланған сигналдың амплитудасын арттырады. Соңында сигнал антенна арқылы кеңістікке жіберіледі. nRF24L01 және CC2500 секілді микросхемалар бұл блоктардың көбісін өз ішіне біріктірген, оларда жиілік синтезі, модуляция, пакеттерді басқару және адрестік сәйкестік сияқты функциялар бағдарламалық түрде орындалады.

Қабылдағыш құрылымы да осыған ұқсас, бірақ оның жұмыс бағыты керісінше. Бірінші кезеңде антенна кеңістіктегі электромагниттік толқынды қабылдайды. Қабылданған сигналдың қуаты өте әлсіз болатындықтан, ол алдымен төмен шуылы күшейткіш (Low Noise Amplifier, LNA) арқылы күшейтіледі. Одан кейін сигнал жиі супергетеродинді архитектура негізінде араластырғыш блогына түседі, мұнда ол жергілікті осциллятор сигналына араластырылып, аралық жиілікке (IF – Intermediate Frequency) түрлендіріледі. Бұл кезең селективтілік пен сүзгілеу сапасын арттырады. Түрлендірілген сигнал сүзгіден өтіп, демодуляторға келіп түседі. Демодулятор тасушы жиіліктен бастапқы ақпаратты бөліп алады. Бұл ақпарат микроконтроллерге беріледі, ал ол оны өңдеп, қолданушыға көрінетін формаға келтіреді (мысалы, дисплейге шығару немесе UART арқылы басқа жүйеге жіберу). Қазіргі таңда қолданылатын көптеген микросхемаларда жоғарыда аталған блоктардың барлығы біріктірілген. Мысалы, nRF24L01 чипі ішіне кірістірілген LNA, модулятор/демодулятор, жиілік синтезаторы, пакеттерді адрес бойынша сұрыптайтын блоктар және CRC тексеру схемасы бар. Мұндай біріктірілген құрылым жүйені жеңіл жобалауға, шағын өлшемде жинауға және қуат тұтынуды азайтуға мүмкіндік береді. Байланыс жүйесінің екі жағы – таратқыш пен қабылдағыш – белгілі бір жиіліктік және адрестік сәйкестікке келтірілуі тиіс. Бұл үшін бағдарламалық конфигурация кезінде бірдей арна нөмірі, дерек жылдамдығы, модуляция түрі және қабылдаушы адрестері көрсетіледі. Сонымен қатар, бұл құрылғылар арасындағы байланыс бір жақты (unidirectional) немесе екі жақты (bidirectional) болуы мүмкін, ол қолдану мақсатына қарай таңдалады. Жалпы алғанда, таратқыш және қабылдағыш блоктарының құрылымын нақты түсіну – жүйенің сапасын арттырып қана қоймай, болашақта оны жетілдіру мен кеңейтуге жол ашады. Радиожүйенің әрбір ішкі элементінің рөлі айқын анықталып, олардың

арасындағы байланыс логикалық тұрғыда үйлестірілген болса, жүйе сенімді, тұрақты және энергия тиімді болып жұмыс істейді.

Таратқыш және қабылдағыш блоктарының құрылым



2-сурет – Таратқыш және қабылдағыш блоктарының құрылымы

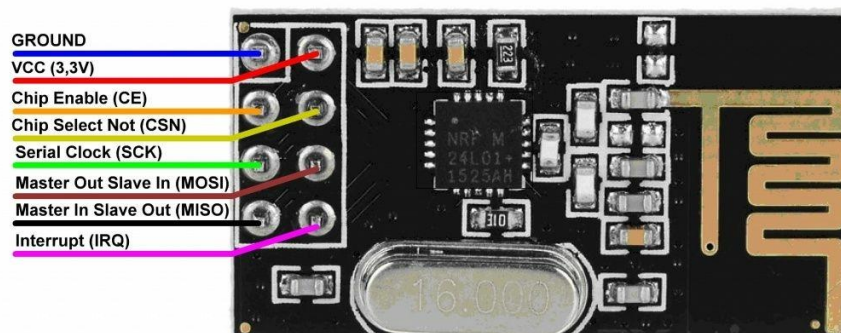
2.2 NRF24L01, CC2500, SX1280 сияқты микросхемаларға шолу

2.4 ГГц диапазонында жұмыс істейтін заманауи радиомикросхемалар – сымсыз деректер алмасу жүйелерінің негізі болып табылады. Бұл чиптер аз қуат тұтынуы, шағын өлшем, жоғары сенімділік және нақты уақыттағы байланыс ұйымдастыру мүмкіндігінің арқасында IoT жүйелерінен бастап, өнеркәсіптік автоматикаға дейінгі көптеген салаларда кеңінен қолданылады. Солардың ішінде кең таралғандары – nRF24L01, CC2500 және SX1280 микросхемалары. Олардың әрқайсысының архитектурасы, техникалық мүмкіндіктері және қолдану аясы өз ерекшеліктерімен сипатталады.

nRF24L01 – бұл Nordic Semiconductor компаниясы ұсынған жоғары интеграцияланған радиомодуль. Ол 2.4-

2.525 ГГц диапазонында жұмыс істейді және 1 МГц қадаммен 126 түрлі каналға бөлінген. Бұл модульдің басты артықшылықтарының бірі – екіжақты (duplex) байланыс қолдауы мен автоматты пакеттік байланыс басқаруы. nRF24L01 ішінде CRC (цикликалық артық код), автоматты қайта жіберу (auto retransmit), және AСK механизмі бар. Микросхема деректерді 250 Кбит/с, 1 Мбит/с немесе 2 Мбит/с жылдамдықпен жібере алады. Жұмыс істеу үшін тек SPI

интерфейсі қажет, ол Arduino, STM32, ESP32 және басқа микроконтроллерлермен толық үйлесімді. Қуат тұтынуы өте төмен: күту режимінде бірнеше микроамппен шектеледі, ал белсенді режимде шамамен 11 мА. Радиусы ашық кеңістікте 100 метрге дейін жетеді. Бұл модуль көптеген білім беру жобаларында, ойыншықтарда, сенсор желілерінде және шағын IoT жүйелерінде жиі қолданылады.



2.1-сурет – NRF24L01 модулі

CC2500 – Texas Instruments компаниясының өнімі, ол да 2.4 ГГц ISM диапазонында жұмыс істейді, бірақ конфигурация жағынан әлдеқайда икемді. Бұл микросхема әртүрлі модуляция әдістерін қолдайды: 2-FSK, GFSK, MSK, OOK, ASK, сонымен қатар кеңейтілген регистрлік басқару арқылы әрбір параметрді нақты реттеуге мүмкіндік береді. CC2500 құрылғысында жиілік синтезаторы, алдын ала күшейткіш (LNA), RSSI өлшегіші, автоматты пакеттік құрылым және CRC бақылау модулі бар. Бұл чип жоғары селективтілік пен нақты сигналды өңдеу талап етілетін жүйелер үшін тиімді, дегенмен оны бағдарламалау nRF24L01-мен салыстырғанда күрделірек. Энергия тұтынуы да салыстырмалы түрде төмен – қабылдау кезінде 13–15 мА, ал күту режимінде небәрі 400 нА. CC2500 көбіне өнеркәсіптік қашықтан басқару жүйелерінде, сымсыз пульттерде, телеметрияда және арнайы стандарттармен жұмыс істейтін құрылғыларда қолданылады.



2.2-сурет – CC2500 және SX1280 модулі

CC2500 – Semtech компаниясының соңғы буын LoRa технологиясын 2.4 ГГц диапазонына бейімдеген микросхемасы. Бұл құрылғы тек дәстүрлі FSK немесе FLRC модуляциясын ғана емес, LoRa (Long Range) модуляциясын да

қолдана алады, бұл оны ерекше етеді. LoRa – кеңейтілген қамту аймағын қамтамасыз ететін, төмен деректер жылдамдығымен жоғары сенімділікке қол жеткізетін технология. SX1280 дәл осы қасиеттерді 2.4 ГГц диапазонында жүзеге асырады. Бұл чип әсіресе RTLS (real-time location systems), дрондар, арена ішіндегі трекинг, роботтар арасындағы тұрақты байланыс үшін өте тиімді. Қашықтық – 300 метрден 1 км-ге дейін жетуі мүмкін, бұл дәстүрлі 2.4 ГГц құрылғылармен салыстырғанда едәуір артық. Чип ішінде AES шифрлау, CRC бақылау, автоматты пакет қайта жіберу, LoRa-specific деректер құрылымы, RSSI және SNR өлшеуіштер және wake-on-radio функциясы бар. Қуат тұтынуы режимге байланысты: LoRa режимінде TX қуаты – 18 дБм-ге дейін, ал RX – 4.2 мА. Әдебиетте осы микросхемалардың техникалық ерекшеліктері мен қолдану мүмкіндіктері кеңінен зерттелген. Мәселен, [1] еңбекте nRF24L01 және CC2500 модульдері салыстырмалы түрде зерттеліп, олардың деректер өткізу қабілеті, энергия тиімділігі және модуляция әдістері бойынша айырмашылықтары нақты көрсетілген. Авторлар оқу мақсатындағы қарапайым жүйелер үшін nRF24L01 тиімді екенін, ал өнеркәсіптік күрделі жобаларда CC2500 артық екенін атап өткен. Сондай-ақ, SX1280 микросхемасы 2.4 ГГц диапазонында LoRa технологиясын қолданудың заманауи тренді ретінде ұсынылады. Бұл микросхема энергияны тиімді пайдалана отырып, алыс қашықтыққа сенімді байланыс орнатуға мүмкіндік береді және жоғары кедергілер жағдайында да жұмыс істей алады. Жалпы алғанда, nRF24L01 — жеңіл құрылымдар мен оқу мақсатындағы жобалар үшін мінсіз шешім, CC2500 — кеңейтілген басқару және жоғары параметрлік дәлдік қажет жағдайлар үшін тиімді, ал SX1280 — алыс қашықтық пен интерференцияға төзімді жүйелерге лайық. Бұл микросхемалардың әрқайсысы жобаның мақсатына байланысты тандалып, тиімді сымсыз байланыс жүйесін құруға мүмкіндік береді. Олар 2.4 ГГц диапазонының әлеуетін толық ашуға және нақты қосымшаларда жоғары нәтиже алуға арналған.

3 Модуляция түрлері мен таңдау

Модуляция – ақпараттық сигналды (мысалы, температура мәнін) тасушы сигналға (жоғары жиілікті) қосу процесі. Бұл процесс деректі антенна арқылы тиімді тарату үшін қажет.

Кесте 3-Қарастырылған модуляция түрлері

Модуляция түрі	Ашылуы	Ерекшеліктері
FSK	Frequency Shift Keying	0 және 1 биттер үшін әртүрлі жиілік қолданылады; қарапайым және сенімді
PSK (BPSK, QPSK)	Phase Shift Keying	Сигналдың фазасы арқылы ақпарат беріледі; спектрал тиімділігі жоғары
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Амплитуда мен фазаның комбинациясы; өте жоғары өткізу қабілеті
LoRa модуляциясы	Chirp Spread Spectrum (CSS)	Кең жолақты сигнал арқылы ұзақ байланыс және төмен қуат тұтыну

Кесте 3.1-Салыстырмалы талдау кестесі

Критерий	FSK	PSK	QAM	LoRa (CSS)
Жүзеге асыру күрделілігі	Төмен	Орташа	Жоғары	Орташа
Шуға төзімділік	Жоғары	Орташа	Төмен	Өте жоғары
Өткізу қабілеті	Орташа	Жоғары	Өте жоғары	Төмен/орташа
Энергия тиімділігі	Жоғары	Орташа	Төмен	Өте жоғары
Қашықтық	Орташа	Төмен	Төмен	Өте үлкен

LoRa технологиясында SF (Spreading Factor) параметрі модуляцияның негізгі сипаттамаларының бірі болып табылады, ол сигналдың кеңейтілу деңгейін анықтайды және байланыс жылдамдығы мен қашықтығына тікелей әсер етеді. SF мәні неғұрлым жоғары болса (мысалы, SF12), соғұрлым сигнал ұзақ қашықтыққа жетеді, бірақ дерек жылдамдығы азаяды және кідіріс артады, ал төмен SF (мысалы, SF7) жағдайында байланыс жылдамдығы артады, бірақ қашықтық пен сенімділік төмендеуі мүмкін. LoRa технологиясында дерек жылдамдығы шамамен 0.3 – 50 kbps аралығында өзгереді, бұл конфигурацияға және арна жағдайына байланысты. Осы жобада LoRa-ның Chirp Spread Spectrum модуляциясы ең тиімді таңдау болып табылады, себебі ол аз қуат тұтынады, бірнеше километрге дейін сенімді байланыс орната алады және шу мен интерференцияға төзімділігі жоғары. LoRa сенсорлық желілер, ауыл шаруашылығы мониторингі, смарт қала жүйелері және экологиялық бақылау жүйелері үшін дәл осы қасиеттерімен ерекшеленеді. Сондықтан дәл осы

жобадағы құрылғы үшін LoRa — қашықтық, энергия тиімділігі және сенімділік талаптарын ең жақсы қанағаттандыратын технология.

Кесте 3.2-LoRa модуляциясының техникалық параметрлері

Параметр	Мәні (типтік)
Chirp түрі	Up chirp / Down chirp
Bandwidth (BW)	125 / 250 / 500 кГц
Spreading Factor (SF)	7–12
Coding Rate	4/5, 4/6, 4/7, 4/8
Дерек жылдамдығы	0.3–50 кбит/с
Энергия тиімділігі	Өте жоғары
Қолдану жиілігі	433/868/915 МГц (аймаққа қарай)

3.1 FSK (Frequency Shift Keying)

FSK (Frequency Shift Keying) — цифрлық сигналдарды беру кезінде жиілікті өзгерту арқылы жүзеге асатын жиілікке негізделген модуляция әдісі. Бұл модуляция түрінде логикалық "1" және "0" екі түрлі жиілікке сәйкес келіп, ақпарат сол жиіліктердің ауысуымен тасымалданады. Мысалы, логикалық «1» үшін — $f_1f_1f_1$, ал «0» үшін — $f_0f_0f_0$ жиілігі қолданылады. Бұл тәсіл аналогты FM (Frequency Modulation) принципіне ұқсас, бірақ сандық сигналдар үшін бейімделген нұсқасы болып табылады.

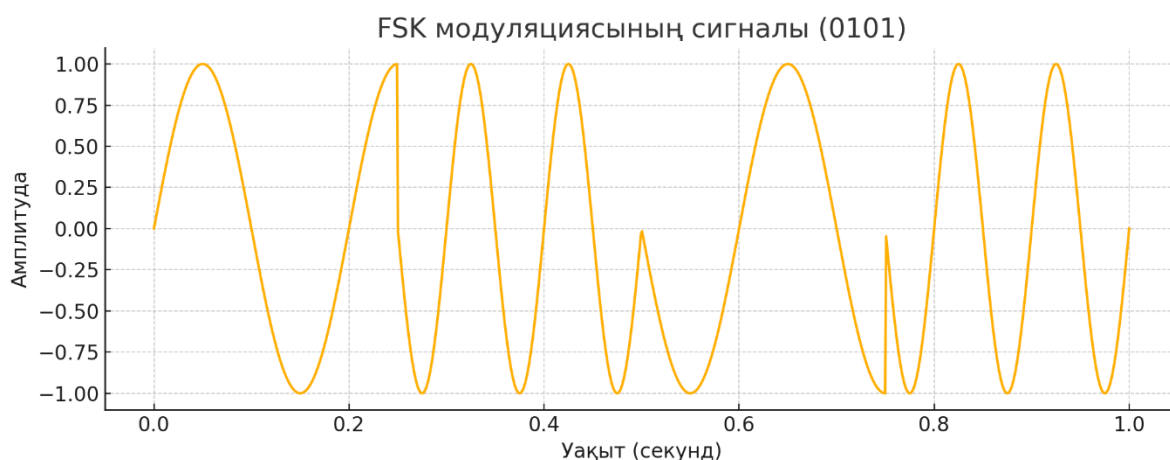
FSK-нің негізгі артықшылығы — оның кедергілерге төзімділігі және бірқалыпты спектрлік тығыздығы, бұл оны телеметрия, радиобайланыс, IoT құрылғылары және аз жылдамдықтағы сенімді жүйелер үшін өте тиімді етеді. Сонымен қатар, FSK модуляциясын жүзеге асыру аппараттық жағынан да, бағдарламалық жағынан да қарапайым. Көптеген микросхемалар (мысалы, nRF24L01, CC2500) бұл модуляцияны аппараттық деңгейде қолдайды.

FSK модуляциясы бірнеше нұсқада болуы мүмкін. Ең қарапайым түрі — 2-FSK, яғни екі жиілікпен жұмыс істейтін нұсқасы. Кейбір жүйелерде 4-FSK немесе одан да жоғары нұсқалар қолданылуы мүмкін, мұнда бір уақытта бірнеше бит беріледі. Бірақ жиілік саны артқан сайын жүйенің күрделілігі де өседі.

Модуляция кезінде жиіліктердің арасы жеткілікті үлкен болуы керек, себебі қабылдағыш екі жиілікті нақты ажырата білуі қажет. Бұл жиіліктердің арасындағы айырмашылықты $\Delta f = |f_1 - f_0|$ деп белгілейді. Егер $f \Delta f$ аз болса, онда сигнал қабылдағышта ажыратылмауы немесе қателіктерге алып келуі мүмкін. FSK-ның басты артықшылықтарына мыналар жатады:

- Жоғары кедергіге тұрақтылық (әсіресе амплитудалық кедергілерге);
- Жеңіл генерация және демодуляция;
- Төмен қуат тұтыну — бұл IoT құрылғылар үшін маңызды;
- Салыстырмалы түрде тар спектр — канал тиімділігін арттырады. Алайда, FSK-да кейбір шектеулер де бар. Біріншіден, өткізу қабілеті (data rate) QAM

немесе PSK секілді күрделі модуляция түрлеріне қарағанда төмен болады. Екіншіден, бірнеше құрылғы бір арнада жұмыс істесе, жиіліктік интерференция болуы мүмкін.



3-сурет – FSK модуляциясы.

FSK модуляциясының қолданылуы бойынша көптеген ғылыми еңбектерде оның қарапайымдылығы мен энергия тиімділігі атап өтіледі. Мысалы, [3] зерттеуінде төмен қуатты сымсыз сенсорлық желілер үшін 2-FSK модуляциясының тиімділігі көрсетілген. Авторлар бұл модуляция түрінің аз қуатпен жұмыс істеуге мүмкіндік беретінін және кедергіге төзімді екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, [2] жұмысында FSK модуляциясы мен оның спектрлік сипаттамалары талданып, өткізу қабілетін арттыру үшін жиілік айырмасын оңтайландыру әдістері ұсынылған. Бұл еңбектер FSK-ны тек дәстүрлі радиобайланыс жүйелерінде ғана емес, сонымен қатар заманауи IoT және телеметриялық құрылғыларда да қолданудың ғылыми негізін ашады. Жалпы, FSK — төмен немесе орташа жылдамдықтағы деректерді сенімді түрде тасымалдау қажет болатын жүйелер үшін тамаша шешім. Ол қарапайым сенсорлық желілерде, телеметриялық құрылғыларда, сандық рациялар мен бастапқы деңгейдегі сымсыз жүйелерде жиі қолданылады. Бұл модуляция түрі 2.4 ГГц диапазонындағы көптеген радиомикросхемаларда стандартты түрде жүзеге асырылады және шағын жүйелер үшін қолайлы.

3.2 PSK (Phase Shift Keying)

PSK (Phase Shift Keying) — цифрлық модуляция әдісі, мұнда ақпарат тасушы сигналдың фазасын өзгерту арқылы беріледі. Бұл әдісте әрбір бит немесе биттер тобы белгілі бір фаза мәніне сәйкестендіріліп, сигналдың фазасы уақыт бойынша өзгеріп отырады. PSK — жиілік пен амплитудаға негізделген модуляцияларға қарағанда спектрлік тиімділігі жоғары, әрі салыстырмалы түрде кедергілерге төзімді әдіс. PSK (Phase Shift Keying) — бұл фаза бойынша

модуляциялау әдісі, мұнда ақпарат тасымалдау сигналдың фазасын өзгерту арқылы жүзеге асады. Бұл әдіс спектрлік тиімділігі жоғары, өйткені бір фаза мәнімен бірнеше битті кодтауға болады, мысалы BPSK бір бит, QPSK екі бит, ал 8-PSK үш бит береді. PSK-тің басты артықшылықтарының бірі — энергия тиімділігі, әсіресе BPSK нұсқасында, себебі ол тек екі фаза мәнін қолданады, бұл аз қуат тұтынумен қатар, модулятор құрылымын жеңілдетеді. QPSK және одан жоғары ретті PSK (мысалы, 8-PSK, 16-PSK) жиі өткізу қабілетін арттыру мақсатында қолданылады, бұл әсіресе жоғары жылдамдықты байланыс жүйелерінде, мысалы спутниктік арналарда, ZigBee және Wi-Fi секілді технологияларда маңызды. Алайда PSK модуляциясының кемшіліктері де бар: ең негізгісі — қабылдағышта фаза синхрондау қиындығы, себебі тіпті аз фаза ауытқуы (мысалы, фазалық шу) бүкіл қабылданған биттердің қатесін тудыруы мүмкін. Бұл әсіресе көпфазалы нұсқаларда — 8-PSK немесе 16-PSK — өте сезімтал, демодуляцияны күрделендіреді және қабылдағышта цифрлық синхрондаудың сапасына жоғары талап қояды. Практикада фаза шуы мен интерференцияға төзімділік үшін PSK жиі басқа әдістермен, мысалы FEC (forward error correction) немесе дифференциалды модуляциямен (DPSK) бірге қолданылады. Сонымен қатар PSK негізінде бірнеше күрделі жүйелер де жасалған, мысалы OFDM және LTE стандарттарындағы QPSK/16-QAM комбинациясы, мұнда PSK жиілік немесе амплитудалық модуляциямен бірге қолданылады.

PSK сигналын генерациялау үшін тасушы синусоидалы сигналдың фазасы ақпаратқа байланысты ауыстырылады. Қабылдау кезінде демодулятор фаза айырмашылығын анықтап, қандай бит жіберілгенін шешеді. Мұндай жүйелер үшін синхрондау өте маңызды, себебі фаза мәндерін дұрыс анықтау үшін қабылдағыш пен таратқыштың фазалық сәйкестігі қажет



3.1-сурет – BPSK модуляциясы

PSK (Phase Shift Keying) – фаза бойынша модуляциялау әдісі, мұнда ақпарат тасымалдау сигналдың фазасын өзгерту арқылы жүзеге асады, бұл спектрлік тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Ең қарапайым түрі BPSK

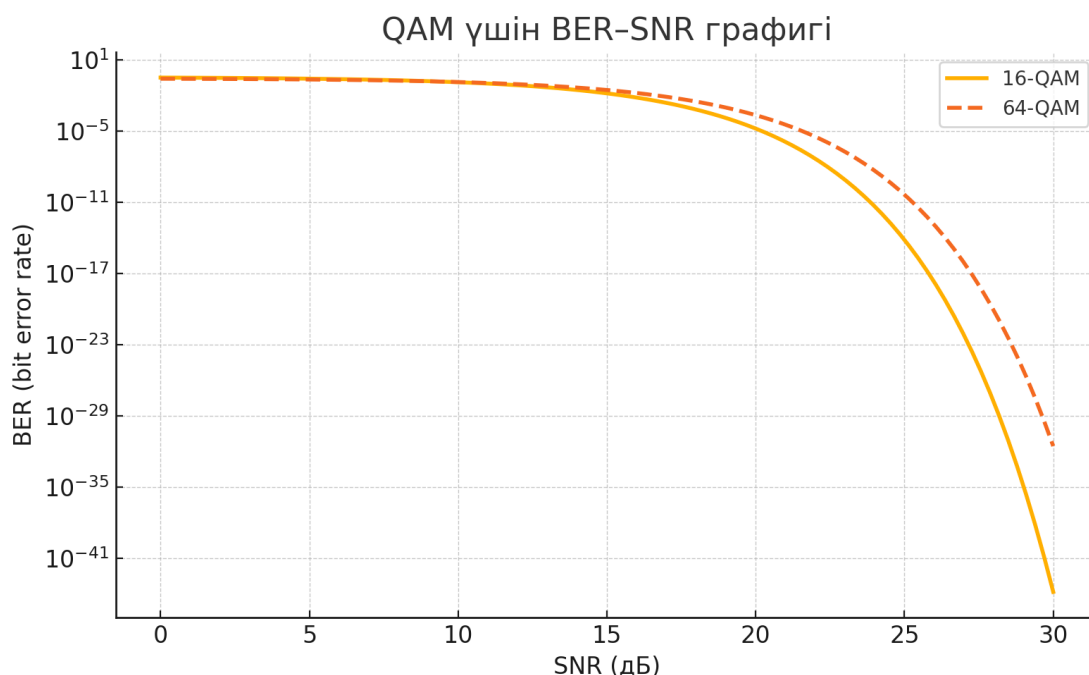
(Binary PSK), мұнда әрбір бит екі фаза мәнінің біріне сәйкес келеді: $s(t) = \text{Acos}(2\pi fct + \pi b)$, мұндағы $b \in \{0,1\}$, яғни 0 бит фаза 0° болса, 1 бит фаза 180° бұрылады. Бұл модуляция түрі өте энергия тиімді, шуға төзімді және құрылымы қарапайым болғандықтан телеметрия мен сенімді байланыс арналарына қолданылады. QPSK (Quadrature PSK) нұсқасында бір символда 2 бит беріледі, яғни 4 фаза мәні қолданылады: 0° , 90° , 180° , 270° , бұл өткізу қабілетін екі еселейді және кеңінен қолданыс табады, әсіресе ZigBee, Wi-Fi, 4G, спутниктік жүйелерде. QPSK сигналы екі ортотоғырлы сигналға (In-phase және Quadrature) бөлінеді, яғни I және Q компоненттері арқылы бір уақытта екі бит модуляцияланады. Мысалы, 00 – 0° , 01 – 90° , 11 – 180° , 10 – 270° фазаларымен жіберіледі. 8-PSK және 16-PSK сияқты кеңейтілген нұсқалар жоғары деректер жылдамдығын қамтамасыз етеді, бірақ фазалық дәлдікке деген талап күшейеді, шу мен интерференцияға сезімталдық артады. Бұл модуляциялар көбінесе FEC кодтауымен және синхрондау алгоритмдерімен біріктіріліп қолданылады. Жоғары ретті PSK жүйелері LTE, DVB-S, VSAT, 5G жүйелерінде кеңінен қолданылады, себебі олар тиімділікті жоғарылатып, жиілік спектрін үнемдеуге мүмкіндік береді. Әдебиеттерде PSK модуляциясының теориялық және тәжірибелік аспектілері жан-жақты зерттелген. Мысалы, [4] зерттеуінде PSK және FSK модуляциялары салыстырылып, PSK әдісінің өткізу қабілеті мен спектрлік тығыздық бойынша артықшылықтары көрсетілген. Бұл жұмыста авторлар BPSK және QPSK жүйелерін нақты жүйелерде (мысалы, спутниктік байланыс) қолдану тиімділігін де зерттеген. Ал [5] мақаласында PSK жүйелерінде фаза синхрондаудың дәлдігі мен биттік қателік ықтималдығы (BER) арасындағы байланыс талданған. Мұнда фаза синхрондауының дәл болмауы қабылдауда қателіктерге әкелетінін және оны азайту үшін арнайы фазалық қалпына келтіру алгоритмдерін қолдану қажет екені дәлелденген. Жалпы, PSK модуляциясы – қазіргі заманғы телекоммуникация жүйелерінің негізгі элементтерінің бірі. Ол Wi-Fi, Bluetooth, 3G/4G, DVB, RFID, спутниктік жүйелер және басқа да көптеген заманауи протоколдарда қолданылады. Әсіресе QPSK – спектрлік тиімділігі мен салыстырмалы түрде қарапайым құрылымының арқасында кең таралған.

3.2 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) — бұл қазіргі заманғы телекоммуникация жүйелерінде кеңінен қолданылатын тиімді цифрлық модуляция түрі. Оның басты ерекшелігі - сигналдың амплитудасы мен фазасын қатар өзгерту арқылы ақпаратты тасымалдау. Бұл әдіс фазалық (PSK) және амплитудалық (ASK) модуляцияның комбинациясы болып табылады және бір тасушы сигнал арқылы үлкен көлемдегі мәліметті жеткізуге мүмкіндік береді. QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - фаза мен амплитуданың бір уақытта модуляциялануы арқылы ақпаратты тасымалдайтын күрделі модуляция әдісі. 16-QAM мысалында бір символда 4 бит беріледі, яғни сигнал 16 түрлі

комбинацияны кодтай алады. QAM сигналы екі ортогоналды тасымалдаушы арқылы жіберіледі: бірі In-phase (I), екіншісі Quadrature (Q), сондықтан сигналдың жалпы көрінісі $s(t) = A_i \cdot \cos(2\pi fct) + B_i \cdot \sin(2\pi fct)$, мұндағы A_i және B_i - сәйкес I және Q амплитудалары. Бұл формула арқылы амплитуда мен фаза комбинациялары арқылы көп биттік ақпарат тасымалданады. QAM модуляциясы жоғары спектралдық тиімділігімен ерекшеленеді, мысалы, 16-QAM - 4 бит, 64-QAM - 6 бит, 256-QAM - 8 бит береді. Мұндай тиімділік деректерді жоғары жылдамдықпен жіберуге мүмкіндік береді және ол Wi-Fi (802.11ac), LTE, DVB, DOCSIS және 5G технологияларында кеңінен қолданылады. Алайда QAM модуляциясының басты кемшілігі - шу мен бұрмалануға өте сезімталдығы, өйткені амплитуда өзгерісі сигнал сапасына айтарлықтай әсер етеді. Сонымен қатар, күрделі қабылдағыш пен дәл синхрондау қажет, себебі символдар нақты QAM диаграммасында орналасқан координаттармен сәйкестенуі тиіс. 16-QAM констелляция диаграммасы 4x4 тор түрінде көрінеді, мұнда әрбір нүкте нақты 4 биттік мәнмен белгіленеді, мысалы 0000, 0001, 0010, 0011 және т.б. Жүйелерде 16-QAM жиі QPSK-пен бірге динамикалық түрде қолданылады - сигнал сапасына байланысты модуляция түрі өзгертіледі, бұл адаптивті модуляция деп аталады. QAM – өткізу қабілеті жоғары байланыс жүйелері үшін стандартқа айналған модуляция әдісі.

QAM әдісін сипаттайтын көптеген зерттеулерде оның жоғары өнімділікке жетуі үшін жақсы радиоқабылдау жағдайлары қажет екені анықталған. Мәселен, Wang және Lin зерттеуінде [6] 16-QAM мен 64-QAM схемалары әртүрлі радиожилік ортада салыстырылып, 64-QAM қолдану үшін кемінде 25 дБ SNR қажет екені көрсетілген. Сонымен қатар, Gupta мен Chouhan еңбегінде [7] QAM жүйелерінің шоқтық диаграммаларын оңтайландыру арқылы қателік ықтималдығын (BER) азайту жолдары қарастырылған. Бұл жұмыстарда QAM қолданылатын жүйелерге қойылатын техникалық талаптар нақты сипатталған және қабылдау сапасын жоғарылату үшін алгоритмдік әдістер ұсынылған.



3.2-сурет – QAM модуляциясы

QAM модуляциясы - жоғары өткізу қабілеттілігін қажет ететін жүйелер үшін ең тиімді шешімдердің бірі. Ол кең жолақты байланыс арналарында, мультимедиялық деректерді тасымалдауда және заманауи сымсыз байланыс протоколдарында негізгі модуляция әдісі ретінде қызмет етеді. Дегенмен, оның тиімді жұмыс істеуі үшін сигнал сапасы жоғары, кедергі деңгейі төмен орта қажет, бұл QAM-ды күрделі жүйелерге бейімделген әдіс ретінде сипаттайды.

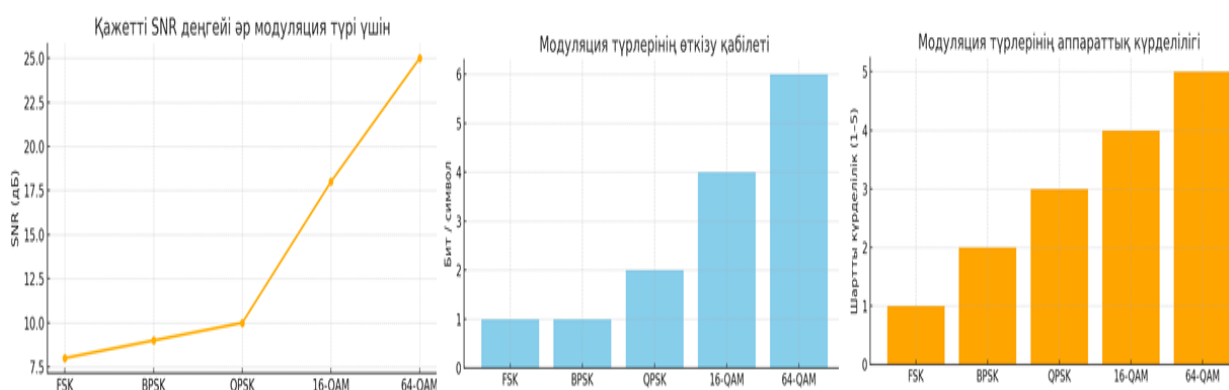
3.3 Практикалық таңдау және негіздеу

Жоғарыда қарастырылған модуляция әдістерінің (FSK, PSK, QAM) әрқайсысының өзіне тән артықшылықтары мен шектеулері бар. Практикалық жүйе үшін модуляцияны таңдау кезінде бірнеше маңызды фактор ескеріледі: жұмыс жиілігі, жылдамдық пен өткізу қабілеті, энергия тұтыну, кедергілерге төзімділік, аппараттық күрделілік, және ең бастысы — жобаның мақсаты мен шарттары.

FSK модуляциясы қарапайым құрылымымен, аз қуат тұтынуымен және кедергілерге жақсы төзімділігімен ерекшеленеді. Бұл әдіс төмен және орташа жылдамдықты байланыс арналары үшін өте тиімді. Сонымен қатар, FSK модуляциясы аппараттық деңгейде оңай жүзеге асырылады және көптеген радиомикросхемаларда (мысалы, nRF24L01, CC2500) кіріктірілген түрде қолданылады. Алайда, оның өткізу қабілеті шектеулі және жиіліктік спектрді тиімсіз пайдалану жағдайлары орын алуы мүмкін.

PSK модуляциясы спектрлік тиімділік тұрғысынан FSK-ға қарағанда анағұрлым тиімді. BPSK және QPSK әдістері жоғары дерек жылдамдығын төмен қателік деңгейімен қамтамасыз ете алады. Бірақ бұл модуляция әдісі фазалық синхрондау дәлдігін талап етеді, және фазалық шу сияқты бұзылуларға сезімтал. Сонымен қатар, PSK схемаларының құрылымы FSK-мен салыстырғанда күрделірек. Қазіргі телекоммуникациялық құрылғыларда (Wi-Fi, ZigBee) PSK кеңінен қолданылады.

QAM модуляциясы ең жоғары спектрлік тиімділікке ие және бір символмен бірнеше битті жеткізуге мүмкіндік береді. Бұл әдіс жоғары өткізу қабілеті мен кең жолақты жүйелер үшін өте қолайлы. Дегенмен, QAM модуляциясы өте сезімтал: амплитудалық және фазалық бұрмаланулар оның жұмысын айтарлықтай төмендетуі мүмкін. Сонымен қатар, жоғары ретті QAM (64-QAM, 256-QAM) схемалары тек жоғары сапалы ($\text{SNR} > 25 \text{ дБ}$) арналарда сенімді жұмыс істейді. Бұл әдіс күрделі демодуляторлық алгоритмдер мен қуатты есептеу ресурстарын қажет етеді. Жобаның ерекшелігін ескере отырып — атап айтқанда, 2.4 ГГц диапазонында қысқа және орташа қашықтықта, төмен қуатпен жұмыс істейтін, сенімді және қарапайым байланыс жүйесін құру — ең оңтайлы таңдау ретінде FSK модуляциясын қолдану ұсынылады. Бұл модуляция тәсілі жүйенің аппараттық қарапайымдылығын қамтамасыз етеді, кедергілерге төзімді және қуат үнемдеуге мүмкіндік береді. Әсіресе IoT құрылғылары мен сенсорлық желілерде қолдану үшін бұл модуляция ең қолайлы нұсқа болып саналады. FSK әдісінің таңдалуы оның тәжірибелік тиімділігімен, оқу және зерттеу жүйелеріндегі кең қолданылуымен, және аппараттық тұрғыдан жеңіл іске асырылуымен негізделеді. Сонымен қатар, қолданылатын радиомодульдер (nRF24L01, CC2500) FSK-ны аппараттық деңгейде қолдайтындықтан, бұл жүйе сенімді әрі энергия тиімді шешім болмақ.



3.3-сурет – Fsk, qam, psk модуляцияларын салыстыру

4 Энергия тиімділігі және сенімділік. Энергия тұтыну есептеулері

Сымсыз құрылғыларда, әсіресе автономды режимде жұмыс істейтін жүйелерде, энергияны үнемдеу - ең басты техникалық міндеттердің бірі. Жүйенің жалпы өнімділігі тек деректерді беру жылдамдығымен ғана емес, ұзақмерзімді энергия тиімділігімен де өлшенеді. Энергия тұтынуы құрылғының жұмыс уақытына, сенімділігіне және аккумулятор сыйымдылығына тікелей әсер етеді. Сол себепті, жүйені жобалау кезінде ток тұтыну деңгейін, модуляция режимін, duty cycle шамасын және қуатты басқару әдістерін жан-жақты талдау қажет. Зерттеулер көрсеткендей, төмен қуатты сымсыз құрылғыларда энергияны тұтыну көлемінің көп бөлігі дерек беру емес, құрылғыны күту режимінде ұстап тұруға жұмсалады [8]. Бұл әсіресе сенсорлық желілерде, онда құрылғы ұзақ уақыт бойы ұйқыда болып, тек мерзімді түрде сигнал жіберетін кезде байқалады. Мұндай жағдайда әрбір миллиампер маңызы артып, құрылғының өміршеңдігін айтарлықтай ұзартады. Мысал ретінде 2.4 ГГц диапазонында жұмыс істейтін nRF24L01 радиомодулін алайық. Бұл микросхема төмен ток тұтынуымен және жоғары қолжетімділігімен танымал. Nordic Semiconductor компаниясының техникалық сипаттамаларына сәйкес [9], модуль таратушы режимде шамамен 11.3 мА, ал қабылдаушы режимде 13.5 мА тұтынады. Ұйқы режимінде бұл көрсеткіш 0.9 мА-ға дейін төмендейді. Энергияны есептеу үшін:

$$E = V \times I \times t \quad (1)$$

мұндағы: $V = 3.3$ В, I - ток (мА), t - уақыт (секунд). Егер құрылғы әр секунд сайын 5 мс-ке оянып, қалған уақытта ұйқыда болса, онда:

$$ETX = 3.3 \times 11.3 \times 0.005 = 0.186 \text{ мДж},$$

$$ESLEEP = 3.3 \times 0.9 \times 0.995 = 2.951 \text{ мДж}$$

Яғни, жалпы цикл ішінде тұтынылатын энергия $E_{\text{cycle}} \approx 3.14$ мДж болады. Энергия тиімділігін арттыру үшін әртүрлі әдістер ұсынылған. Kumar & Patel (2019) еңбегінде ұйқы мен белсенді режим арасындағы ауысу логикасын оңтайландыру арқылы ZigBee құрылғыларының орташа ток тұтынуын 25–30% дейін азайтуға болатыны дәлелденген. Сонымен қатар, кейбір авторлар модуляция әдісін өзгерту арқылы да энергия тиімділігіне қол жеткізуге болатынын көрсетеді. Атап айтқанда, FSK модуляциясы PSK-мен салыстырғанда аз ток жұмсайды, өйткені ол күрделі фазалық синхрондауды қажет етпейді [9]. Мұның барлығы энергияны үнемдеу мәселесі кешенді екенін және оны тек бір фактор арқылы емес, жүйенің барлық элементтері мен алгоритмдері арқылы шешу қажет екенін көрсетеді. Практикада, егер құрылғы төмен жиілікте және қысқа пакеттермен жұмыс істесе, онда дұрыс таңдалған модуляция мен тиімді duty cycle едәуір ұзақ жұмыс уақытын қамтамасыз ете алады.

4.1 Сымсыз байланыс стандарттарымен сәйкестігін бағалау

LoRa сымсыз технологиясы төмен қуатты кең ауқымды байланыс (LPWAN) санатына жатады және ол Semtech компаниясы енгізген Chirp Spread Spectrum (CSS) модуляциясына негізделген. LoRa 433, 868 және 915 МГц сияқты ISM жолақтарында жұмыс істейді, бұл оны лицензиясыз қолдануға мүмкіндік береді. IEEE 802.11 стандартына негізделген Wi-Fi технологиясы жоғары өткізу қабілетін қамтамасыз етіп, 2.4 және 5 ГГц жиіліктерінде жұмыс істейді, ол көбінесе бейнежазбалар, интернет трафигі, локалдық желілер үшін қолданылады. Wi-Fi жоғары қуат тұтынады және байланыс радиусы LoRa-ға қарағанда едәуір қысқа (орташа 50–100 м). IEEE 802.15.1 стандартына негізделген Bluetooth қысқа қашықтықта (10–30 м) сенімді байланыс ұсынады, өткізу қабілеті ~1–3 Мбит/с аралығында, энергия тұтынуы орташа деңгейде. ZigBee (IEEE 802.15.4) протоколы – төмен қуатты, төмен жылдамдықты байланыс технологиясы, ол smart home және industrial automation сияқты mesh архитектураға бейім қосымшаларда қолданылады. ZigBee 2.4 ГГц жиілігінде жұмыс істейді, 250 кбит/с дейін дерек жібере алады және желіде бірдей деңгейдегі құрылғылар арасында ақпарат алмасуға мүмкіндік береді. LoRa дерек жіберу жылдамдығы жағынан әлсіз болғанымен, энергия тиімділігі мен ұзақ қашықтықтағы байланысқа бейімділігі арқылы IoT жүйелеріне толық сәйкес келеді. LoRa қашықтыққа тәуелді дерек жылдамдығын SF (Spreading Factor) арқылы реттей алады, мысалы, SF7 кезінде жоғары жылдамдық, ал SF12 кезінде ұзақ қашықтық қамтамасыз етіледі. Жоғары дәлдікті қажет етпейтін, бірақ батареямен ұзақ жұмыс істеуді талап ететін қолданбаларда (мысалы, ауыл шаруашылығындағы мониторинг, орман өртін ерте анықтау, қашықтағы су деңгейін бақылау) LoRa протоколы Wi-Fi мен ZigBee-ге қарағанда тиімді. Сонымен қатар, LoRaWAN протоколы арқылы LoRa желісін көп түйінді, қауіпсіз және басқарылатын платформаға айналдыруға болады. LoRa мен басқа стандарттарды салыстыру нәтижесінде LoRa – төмен қуатты, кең аймақты, сирек дерек жіберетін құрылғылар үшін ең тиімді шешім екені анықталады.

Кесте 4.1-Салыстырмалы талдау кестесі

Стандарт	Жиілік	Қашықтық	Жылдамдық	Энергия тұтыну	Қолдану саласы
LoRa	433/868 MHz	2-10 км	0.3-50 кбит/с	Өте төмен	IoT, ауыл, ретрансляторлар
Wi-Fi (802.11)	2.4/5 ГГц	50-100 м	10-600 Мбит/с	Жоғары	Видео, интернет, локалдық желі

4.1 кестенің жалғасы

Bluetooth	2.4 ГГц	10-30 м	~1-3 Мбит/с	Орташа	Құлаққаптар, датчиктер
-----------	---------	---------	-------------	--------	------------------------

ZigBee	2.4 ГГц	10-100 м	20-250 кбит/с	Төмен	Smart home, Mesh желілер
--------	---------	----------	---------------	-------	--------------------------

4.2 nRF24L01 және CC2500 микросхемаларының энергия тиімділігін салыстыру

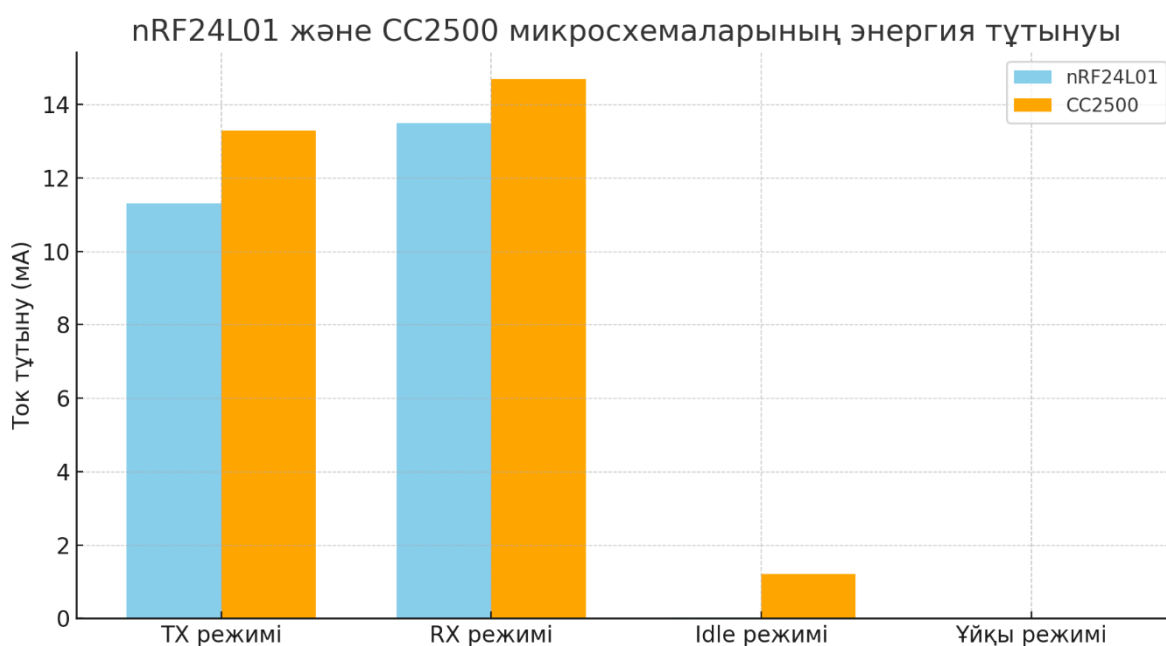
Сымсыз микромодульдерді таңдауда энергия тұтыну – автономды жүйелер үшін шешуші фактор. Радиомодуль құрылғының жұмыс ұзақтығына тікелей әсер ететіндіктен, оның белсенді және белсенді емес режимдердегі ток тұтынуы нақты талдауды қажет етеді. Әсіресе IoT немесе сенсорлық желілер сияқты төмен қуатты жүйелерде бұл көрсеткіш негізгі басымдыққа ие болады. Қазіргі кезде кең қолданылатын екі микросхема – nRF24L01 (Nordic Semiconductor) және CC2500 (Texas Instruments). Екі модуль де 2.4 ГГц ISM диапазонында жұмыс істейді, бірақ архитектурасы мен қуат тиімділігі бойынша елеулі айырмашылықтарға ие. nRF24L01 модулі 11.3 мА (TX) және 13.5 мА (RX) ток тұтынады, ал CC2500 — сәйкесінше 13.3 мА және 14.7 мА. Бұл айырмашылық аз көрінгенімен, ұзақмерзімді автономды қолдану барысында маңызы артады. Төмен қуатты жұмыс режимдерінде бұл айырмашылық айқындала түседі. nRF24L01 ұйқы режимінде небәрі 0.9 мкА, ал Standby режимінде 26 мкА тұтынады. CC2500 болса Idle режимінде 1.2 мА, ал ұйқыда 0.4 мкА тұтынады. Яғни, тек терең ұйқы режимінде ғана CC2500 сәл үнемдірек, бірақ көбінесе Idle күйде болатын құрылғылар үшін nRF24L01 тиімдірек. Ali және Singh (2020) еңбегінде дәл осы ерекшелік көрсетілген: нүкте-нүкте негізіндегі сенсор жүйелері үшін nRF24L01 құрылғысының ұйқы режимінен ояну уақыты қысқа әрі энергия шығыны аз екені дәлелденген.

Кесте 4.2- nRF24L01 және CC2500 салыстыру

Көрсеткіш	nRF24L01	CC2500
TX режиміндегі ток (мА)	11.3	13.3
RX режиміндегі ток (мА)	13.5	14.7
Idle / Standby ток (мА/мкА)	0.026 мА	1.2 мА
Sleep режимі (мкА/нА)	0.9 мкА	0.4 мкА
Қорек кернеуі (В)	1.9 – 3.6	1.8 – 3.6

Белсенді режимде де nRF24L01 модулі энергияны салыстырмалы түрде аз жұмсайды. Nordic Semiconductor-дің ресми сипаттамаларына сәйкес, таратушы режимдегі толық цикл (TX + PRE + POST) үшін тұтынылатын энергия шамамен 0.18 мДж құрайды, бұл CC2500 модуліне қарағанда 10–15% төмен. Kumar және Patel (2019) өз зерттеулерінде CC2500 модулінің регистрлік икемділігі жоғары екенін, алайда бұл конфигурациялық күрделілік батарея ресурсын көбірек жұмсауға әкелетінін атап өткен. Практикалық қолдану кезінде, егер құрылғы сирек оянып, шағын дерек пакеттерін жіберетін болса, nRF24L01 айқын

артықшылыққа ие. Ол Arduino және STM32 жүйелерімен оңай біріктіріледі, және энергияны басқаруға арналған командалар кітапханалық деңгейде жақсы қолдау табады. Ал CC2500 тұрақты байланыс керек болатын жағдайларда және күрделі байланыс протоколдарын қажет ететін жүйелерде жақсы нәтиже береді, бірақ бұл құрылғыны қолдану қосымша қуат басқару алгоритмдерін талап етеді. Қорытындылай келе, екі микросхеманың энергия тиімділігі нақты қолдану жағдайына байланысты. Егер мақсат — ұзақмерзімді автономды жұмыс пен қарапайым архитектура болса, онда nRF24L01 ең оңтайлы шешім. Ал егер жүйе жоғары жиілікте, үздіксіз байланыс жүргізетін болса, CC2500 да ескеруге тұрарлық.



4-сурет - nRF24L01 және CC2500 энергия тұтынуын салыстыру.

Төменде IEEE 802.11 (Wi-Fi) стандарты туралы бөлім берілген, мұнда әдеби шолу жасырын түрде, яғни жеке тізім немесе бөлек "әдебиеттер" деп аталмай, ғылыми еңбектер мен техникалық дереккөздерге мәтіннің өз ішінде табиғи түрде сілтеме жасалған. Бұл тәсіл – академиялық жазбада жиі қолданылатын стиль.

4.3 IEEE 802.11 (Wi-Fi) стандарты және жобамен сәйкестік

Wi-Fi технологиясы қазіргі замандағы ең кең таралған сымсыз байланыс әдісі болып табылады және ол IEEE 802.11 стандарттар жиынтығына негізделген. Бұл стандарт алғаш 1997 жылы ұсынылғанымен, кейінгі жылдары 802.11a, b, g, n, ac, ax сияқты нұсқалармен толықтырылып, жоғары өткізу қабілеті мен кеңейтілген мүмкіндіктерге қол жеткізді. 802.11b/g/n нұсқалары негізінен 2.4 ГГц ISM диапазонында жұмыс істейді, бұл диапазон Wi-Fi-дан бөлек, көптеген

басқа протоколдармен (мысалы, Bluetooth, ZigBee, LoRa) бірге қолданылатындықтан, радиоинтерференция мәселесі туындайды. Практикада, төмен қуатты модульдер (мысалы, nRF24L01 немесе CC2500) Wi-Fi жүйелерімен бір кеңістікте жұмыс істегенде, елеулі кедергілер байқалады. Wi-Fi арналар саны 13–14 аралығында шектелген және олардың 20 МГц еніне байланысты арна қабаттасуы жиі кездеседі. Жүйелер бір-біріне кедергі келтірген жағдайда пакеттердің жоғалуы, кідірулер және байланыстың тұрақсыздануы байқалады. Осы мәселелер Zhou және әріптестері тарапынан жүргізілген эксперименттік зерттеулерде сипатталған. Олар Wi-Fi мен BLE арасындағы өзара радиоқысымды зерттеп, арна таңдауды динамикалық басқару арқылы жоғалтуларды айтарлықтай азайтуға болатынын дәлелдеді. Бұдан бөлек, 802.11n нұсқасының кең арналар мен MIMO технологиясын қолдануы артықшылық бергенімен, төмен қуатты құрылғылармен ортақ ортада жұмыс істеген кезде артық таратушы қуат (20 dBm дейін) радиошу деңгейін арттырады. Мұндай әсерді азайту үшін Hossain зерттеуінде ұсынылған "listen-before-talk" және "time-slot allocation" стратегиялары тиімділігін көрсетті. Бұл тәсілдер бойынша төмен қуатты құрылғылар Wi-Fi арнасы босаған кезде ғана дерек жіберіп, интерференция ықтималдығын төмендетеді. Жоғарыда аталған зерттеу нәтижелерінен байқағанымыз - 2.4 ГГц диапазонындағы құрылғылардың бірге жұмыс істеуі үшін арналарды тиімді таңдау, адаптивті протоколдар, және қуат деңгейін шектеу маңызды. Бұлар жүйенің IEEE 802.11 негізіндегі Wi-Fi ортасында жұмыс істеуін жеңілдетіп, стандарттарға жанама сәйкестікке қол жеткізуге мүмкіндік береді. Жобаланған жүйенің Wi-Fi құрылғыларымен тікелей үйлесімділігі болмаса да, спектрді ортақ қолдану шарттарын ескере отырып құрылған жүйе IEEE 802.11 стандарттарының техникалық талаптарымен үйлесімді ортада сенімді жұмыс істей алады.

5 Сымсыз стандарттармен сәйкестік

Сымсыз байланыс технологиялары қазіргі заманда IoT жүйелерінің негізгі тіректерінің бірі болып табылады. IEEE 802.11 (Wi-Fi), Bluetooth (BLE) және ZigBee (IEEE 802.15.4) сияқты сымсыз стандарттар көптеген салаларда қолданыс табуда. IEEE 802.11 немесе Wi-Fi - кеңжолалық сымсыз байланыс стандарты. Ол 2.4 ГГц және 5 ГГц жиіліктерінде жұмыс істейді және 150 Мбит/с немесе одан да жоғары жылдамдықпен дерек жібере алады. Бұл стандарт кең таралған әрі IP-негізіндегі құрылғылармен оңай интеграцияланады. Алайда, Wi-Fi жоғары қуат тұтынатындықтан, батареямен жұмыс істейтін құрылғыларға жарамайды (Kau, R. (2021). *Wireless Communications and Networks*, Elsevier). Bluetooth Low Energy (BLE) — Bluetooth стандартының қуатты аз тұтынатын нұсқасы. Ол 2.4 ГГц жиілігінде жұмыс істейді және 1 Мбит/с шамасында жылдамдықты қамтамасыз етеді. BLE технологиясы фитнес-трекерлер, ақылды сағаттар және денсаулық құрылғыларында кең қолданылады, себебі энергияны өте аз тұтынады. Бірақ оның қашықтығы шектеулі және өткізу қабілеті төмен . [10] ZigBee (IEEE 802.15.4) — төмен қуатты, төмен жылдамдықты, бірақ сенімді сымсыз байланыс протоколы. Ол негізінен 2.4 ГГц жиілігінде жұмыс істейді және mesh topology арқылы үлкен желілер құруға мүмкіндік береді. Өткізу қабілеті - 250 Кбит/с, бірақ оның артықшылығы — бір батареямен ұзақ уақыт жұмыс істей алуы. ZigBee көбінесе ақылды үй жүйелерінде, өнеркәсіптік датчиктерде және автоматтандыру салаларында қолданылады[11] Осы үш стандартты салыстырғанда, Wi-Fi жоғары жылдамдықты, бірақ энергияны көп тұтынатын жүйелерге жарайды, BLE - қысқа қашықтыққа тиімді, ал ZigBee - көп құрылғылы сенімді торлы байланыс жүйелері үшін тиімді шешім.

6 IoT құрылғыларына арналған байланыс модульдерін жобалау

Интернет заттар (IoT) жүйелерінде құрылғылар арасындағы сенімді және энергияны тиімді байланыс — негізгі талаптардың бірі. Байланыс модульдерін дұрыс таңдау мен жобалау деректерді қашықтықтан жеткізуді қамтамасыз етеді. IoT жүйелері көбінесе төмен қуатты, ұзақ қашықтыққа жұмыс істейтін және сенімді байланыс арналарына сүйенеді. Соңғы жылдары кең таралған модульдер қатарына LoRa (Long Range), Wi-Fi, ZigBee және Bluetooth жатады. LoRa модуляциясы тар жолақты спектрге негізделіп, үлкен қашықтыққа төмен қуатпен байланыс орнатуға мүмкіндік береді. Бұл модульдердің мысалы ретінде SX1278, E220-900T22D, DX-LR01 келтіріледі. Олар UART немесе SPI интерфейсі арқылы микроконтроллермен байланысады және 5–10 км аралыққа дейін байланыс орната алады. Wi-Fi модульдері (мысалы, ESP8266, ESP32) жоғары жылдамдықтағы деректермен алмасуға тиімді, бірақ қуатты көп тұтынады. Bluetooth Low Energy (BLE) модульдері қысқа қашықтыққа өте аз қуатпен жұмыс істеуге ыңғайлы, мысалы, денсаулық құрылғылары мен трекерлерде. ZigBee (IEEE 802.15.4 негізінде) mesh topology арқылы бірнеше құрылғыны бір желіге біріктіріп, тұрақты жүйе құра алады. Байланыс модульдерін жобалау кезінде интерфейс түрі (UART, SPI, I2C), қуат тұтыну деңгейі, қашықтық, антенна параметрлері және үйлесімділік есепке алынуы қажет. Әдебиетте көрсетілгендей, әр модульдің қолдану аймағы мен техникалық сипаттамалары нақты талаптарға байланысты таңдалады.[12] Сонымен қатар, байланыс қауіпсіздігі мен деректерді шифрлау әдістері де жобалауда маңызды рөл атқарады. IoT құрылғыларына арналған модульдер сенімді, энергия үнемдейтін және қолжетімді болуға тиіс.

6.1 IoT қауіпсіздік аспектілері

AES-128 (Advanced Encryption Standard) – АҚШ Ұлттық стандарттар және технологиялар институты (NIST) бекіткен симметриялық блоктық шифрлеу стандарты, IoT жүйелерінде кеңінен қолданылуда, себебі ол 128 биттік кілт арқылы 128 бит деректер блоктарын он раундтық шифрлеу арқылы қорғайды. Бұл әдіс LoRaWAN, ZigBee, NB-IoT сияқты желілік хаттамаларда стандарт ретінде енгізілген және деректерді үшінші тараптардан жасыру, бұрмаланудан қорғау үшін қолданылады. AES шифрлеуі STM32, ESP32, CC1352R сияқты заманауи микроконтроллерлердің аппараттық деңгейінде қолдау табады, бұл ресурсты аз тұтыну арқылы шифрлеуді жылдам орындауға мүмкіндік береді. Қауіпсіздік тұрғысынан AES қазіргі таңда тиімділігі дәлелденген алгоритмдердің бірі болып саналады, оны қазіргі есептеу қуатымен бұзу мүмкін емес деп есептеледі. Алайда қарапайым Arduino Uno немесе ATmega328 микроконтроллерлерінде AES-128 бағдарламалық деңгейде іске асырылғанда жады мен процессор уақытына айтарлықтай салмақ түсіреді. Сондықтан мұндай құрылғыларда AES тек жеңілдетілген кітапханалар арқылы немесе сыртқы

криптомодульдер көмегімен қолданылады. Сонымен қатар AES-128 симметриялық болғандықтан, дерек алмасатын екі құрылғы бірдей кілтке ие болуы тиіс, бұл бастапқы кілт алмасу процесін қауіпсіз орындау қажеттілігін тудырады.

XOR (exclusive OR) шифрлеу әдісі - есептеу тұрғысынан ең қарапайым шифрлеу әдістерінің бірі, мұнда шифрленетін дерек кілтпен бит бойынша XOR операциясы арқылы өңделеді, яғни $cipher = data \oplus key$. Бұл әдістің негізгі артықшылығы — орындалу жылдамдығы және жеңіл микроконтроллерлерде жүзеге асыру мүмкіндігі, әсіресе Arduino Uno немесе NRF24L01, CC2500 секілді жеңіл радиомодульдермен қолдануда тиімді. XOR шифрлеуінің кемшілігі — егер кілт қысқа және тұрақты болса, онда шабуылдаушылар хабарламаларды оңай шеше алады; мысалы, белгілі бір шаблон негізінде бірнеше хабарлама алған жағдайда кілтті болжау оңай. Бұл шифрлеудің қауіпсіз болуы тек кілттің ұзақтығына, кездейсоқтығына және бір рет қолданылуына байланысты. Сондықтан тәжірибеде XOR шифрлеу nonce және session key секілді әдістермен біріктіріліп қолданылады. Сонымен қатар, XOR әдісі толық криптографиялық тұрақтылыққа ие болмаса да, аз қуатты, энергия тиімді, қарапайым IoT жүйелерінде негізгі деректі жасыру механизмі ретінде қолданыла береді, себебі ол минималды кодпен, аз жадымен жүзеге асырылады және жылдам жұмыс істейді. Nonce (Number used once) - IoT құрылғыларда қауіпсіздік үшін кеңінен қолданылатын бір реттік кездейсоқ мән, ол әр хабарламада қайталанбайтын сан ретінде қолданылады, бұл replay attack (қайта жіберу шабуылы) сияқты шабуылдарға қарсы тұруға мүмкіндік береді. Nonce мәні кейде санауыш ретінде (counter) немесе кездейсоқ генератор арқылы алынады және ол AES немесе XOR шифрлеуінде кілттің бір бөлігі ретінде немесе ашық мәтінге қосылып шифрленеді. Session key (сессиялық кілт) - құрылғылар арасындағы уақытша байланысты қорғауға арналған уақытша шифр кілті, әдетте сессия басталғанда генерацияланады және сол сеанс аяқталғаннан кейін жойылады. Бұл тәсіл MITM (Man-in-the-Middle) шабуылдарынан қорғануға және әрбір сеанс үшін жеке қауіпсіздік қабатын орнатуға мүмкіндік береді. Session key құрылғылар арасында Diffie-Hellman алгоритмі арқылы немесе алдын ала енгізілген түбір кілт негізінде келісу жолымен алмасады. Бұл әдістер шифрлеу мен кілтті қорғау жүйелерінде кеңінен қолданылады, әсіресе бір құрылғыдан екінші құрылғыға дерек тұрақты түрде өзгеріп, қауіпсіздік қажет болатын кезде (мысалы, Wi-Fi арқылы LoRa шлюзіне дерек жіберу). IoT жүйелерде тек дерек шифрлеу жеткіліксіз, сонымен қатар алынған ақпараттың шынайылығын (бұрмаланбағанын) тексеру қажет, ол үшін CRC (Cyclic Redundancy Check), checksum немесе HMAC (Hash-based Message Authentication Code) сияқты әдістер қолданылады. CRC көбіне аппараттық деңгейде орындалады және LoRa немесе NRF24L01 модульдері оны автоматты түрде қосады, бұл жіберілген пакеттің соңына 8 немесе 16 биттік тексеру коды ретінде енеді. Checksum — жеңіл балама, бірақ оның сенімділігі CRC мен HMAC-тен төмен. HMAC — хэштеу негізінде жасалған және қосымша құпия кілтпен есептелетін тексеру механизмі, ол деректің өзгермегенін және шынайы құрылғыдан келгенін дәлелдеуге мүмкіндік береді. Бұл әдістер spoofing,

packet injection және data tampering шабуылдарын анықтауға мүмкіндік береді, сонымен қатар жүйе логикасы да бұрмаланған деректерді елемей өткізіп жібереді. Spoofing шабуылдары — жалған құрылғы өзін шынайы құрылғы ретінде көрсетіп, жалған дерек жібереді, бұл IoT жүйелер үшін өте қауіпті, себебі бұл жағдайда сенімді жүйенің дерек негізіндегі шешімдері бұзылады. Мұндай шабуылдарға қарсы тиімді әдіс ретінде whitelist (алдын ала бекітілген құрылғы ID тізімі) қолданылады, яғни қабылдағыш тек белгілі ID-мен келген деректерді ғана қабылдайды. Сонымен қатар қабылданған деректегі уақыт белгісі (timestamp) де шабуылға қарсы фильтрация ретінде қолданылады, өйткені ескі немесе кешіктірілген хабарлар қабылданбайды. LoRaWAN, ZigBee сияқты хаттамаларда құрылғыны желіге қосу алдында аутентификация (OTAA, ABP) жүргізіледі, бұл да spoofing-ке қарсы тиімді қорғаныс болып табылады. Кей жағдайларда дерек форматын стандарттау (мысалы, \[ID]:\[Type]:\[Value]) көмегімен логикалық қателіктерді (мысалы, дерек шегінен тыс мәндер) де сүзуге болады. Сонымен бірге жүйеге ендірілген логика күмәнді мәндерді автоматты түрде блоктап, журналға жазып отыра алады.

6.2 Практикалық құрылғы сұлбасы (схема): LoRa арқылы IoT деректерін беру жүйесі

Бұл практикалық сұлба Arduino UNO, LoRa модулі және LCD дисплей негізінде екі құрылғыдан тұрады: Жіберуші (TX) түйін — дерек жібереді. Қабылдаушы (RX) түйін — дерек қабылдап, LCD-ге шығарады.

Кесте 6.1 - Құралдар тізімі

Құрылғы	Модель
Микроконтроллер	Arduino UNO (2 дана)
Байланыс модулі	LoRa DX LR01 немесе E220-900T22D
Экран	LCD 16x2
Потенциометр	10 кОм (контраст реттеу үшін)
Breadboard, секірме сымдар	-

Блок-сұлба :

[TX тарабы]

[Arduino UNO] → [LoRa модуль]

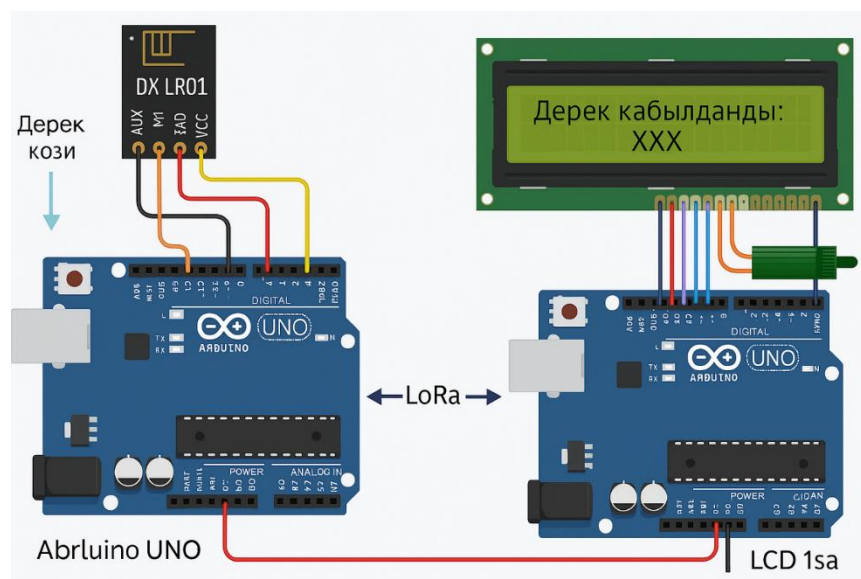
↑ дерек көзі (мысалы, температура)

[RX тарабы]

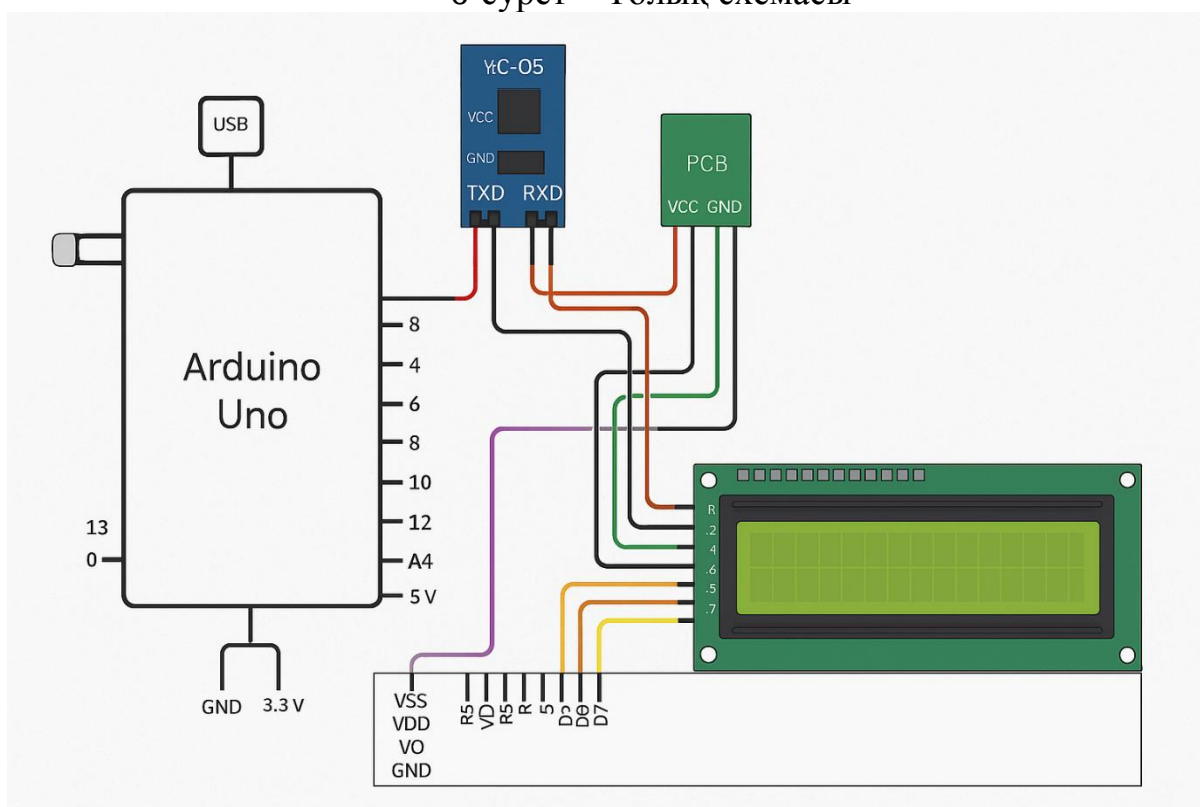
[LoRa модуль] → [Arduino UNO] → [LCD дисплей]



[Келген дерек көрсетіледі]



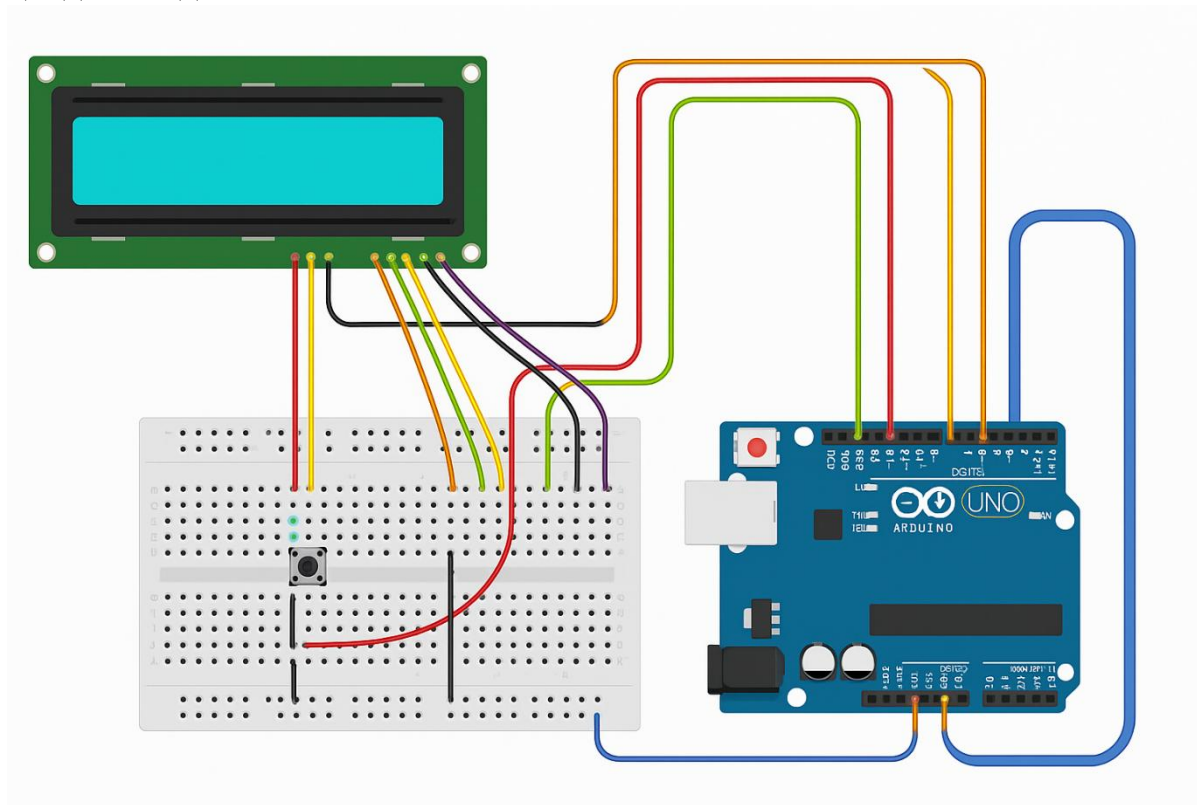
6-сурет – Толық схемасы



6.1-сурет – LoRa модулімен, таратқыш схемасы

1-схема (LoRa модулімен, таратқыш): Arduino UNO – бұл ATmega328P микроконтроллері негізінде жұмыс істейтін негізгі басқару тақтасы, ол USB арқылы немесе сыртқы адаптермен қоректенеді және LoRa модулімен UART арқылы байланысады. LoRa модулі (мысалы, DX LR01 немесе E220-900T22D) – төмен қуатты, ұзақ қашықтыққа сымсыз байланыс орнататын құрылғы, оның негізгі пиндері: VCC – 3.3В немесе 5В, GND – жер, TXD – дерек жіберу, RXD –

дерек қабылдау, M0 мен M1 – жұмыс режимін таңдау, AUX – қосымша бақылау пині. Breadboard – дәнекерлеусіз сымдар мен модульдерді жалғауға арналған макет тақшасы, ол LoRa модулі мен Arduino арасын сыммен байланыстыруға қолданылады.



6.2-сурет - LCD дисплеймен, қабылдағыш

2-схема (LCD дисплеймен, қабылдағыш): Arduino UNO осы схемада LoRa модулінен UART арқылы келетін деректерді қабылдап, LCD дисплейге жібереді. LCD 16x2 дисплей – екі жол, 16 символдан тұратын мәтіндік экран, оның пиндері: VSS – жер, VDD – қорек (5В), VO – контрастты реттейтін потенциометрге жалғанады, RS – дерек/команда режимі, RW – жазу/оқу (GND-ке жалғанады), E – Enable сигналы, D4–D7 – дерек пиндері, А және К – жарық үшін анод пен катод. Потенциометр – VO пині арқылы экран контрастын реттейтін айнымалы резистор, әдетте 10 кОм номиналмен қолданылады. Breadboard бұл жерде дисплей мен сымдарды бір-біріне жалғауға мүмкіндік беретін платформа ретінде қолданылады.

6.3 LoRa, Wi-Fi немесе Bluetooth модульдерін қарастыру

LoRa, Wi-Fi немесе Bluetooth модульдерін қарастыру (әдеби шолу) IoT жүйелерінің сенімді әрі энергия үнемдейтін жұмыс істеуі үшін байланыс модулін дұрыс таңдау маңызды. LoRa (Long Range) модульдері (мысалы, SX1278, E220-900T22D) Sub-GHz диапазонында (433/868/915 МГц) жұмыс істеп, 10 км-ге дейінгі қашықтыққа деректерді төмен жылдамдықпен жеткізе алады, бұл ауылдық және шалғай жерлер үшін тиімді шешім. LoRaWAN протоколы арқылы деректерді қауіпсіз және желі арқылы маршрутизациялап жеткізуге болады. [13] Wi-Fi модульдері (ESP8266, ESP32) IEEE 802.11 стандарттарына негізделген және жоғары жылдамдықты деректерді беру үшін қолданылады, әсіресе real-time бақылау жүйелерінде немесе интернетке тікелей шығатын құрылғыларда. Алайда, Wi-Fi модульдері қуатты көбірек тұтынады және батареямен ұзақ жұмыс істеуге тиімсіз [14] Bluetooth және BLE модульдері (HC-05, HM-10) төмен қуатты, қысқа қашықтықтағы байланысты қамтамасыз етеді, смартфонмен тікелей жұмыс істеуге ыңғайлы. BLE — Bluetooth 4.0 нұсқасының бір бөлігі, ол тек қажетті уақытта байланыс орнатып, қуатты үнемдейді [15]

6.4 Тестілік құрылғы жинау (мысалы, температура датчигі мен дисплейі бар жүйе)

IoT құрылғылары әдетте нақты бір дерек көзінен ақпарат жинап, оны өңдеп, басқа құрылғыға жеткізеді. Практикалық мысал ретінде DHT11 немесе DHT22 сияқты температура мен ылғалдылық датчиктерін қолдануға болады. Бұл сенсорлар цифрлық деректі бір пин арқылы береді және Arduino UNO немесе ESP32 сияқты микроконтроллермен оңай біріктіріледі. LCD 16x2 дисплейі (немесе OLED дисплей) арқылы көрсеткіштерді экранда бейнелеуге болады. Егер құрылғы Wi-Fi немесе LoRa арқылы деректерді жібере алса, онда бұл нақты IoT түйіні болады. Мұндай құрылғы тәжірибелік тестілеу мен үй автоматтандыру жүйелерінде қолданылады. [16] Сонымен қатар, деректер бұлттық платформаға (мысалы, ThingSpeak, Blynk) жіберіліп, график түрінде көрсетілуі мүмкін.

6.5 UART, SPI, I2C интерфейстері

UART, SPI, I2C интерфейстері (әдеби шолу) IoT жүйесінде микроконтроллер мен перифериялық құрылғылар арасындағы байланыс үшін интерфейстер үлкен рөл атқарады. UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) - асинхронды, екі сымды интерфейс (TX, RX), көбінесе LoRa, Bluetooth, GPS модульдерінде қолданылады. Оның қарапайымдылығы - тактілік сигнал қажет етпейді, бірақ тек екі құрылғы арасында жұмыс істейді. SPI (Serial Peripheral Interface) – синхронды, төрт сымды (MOSI, MISO, SCK, SS) интерфейс, жоғары жылдамдық пен бірнеше құрылғымен жұмыс істеуге мүмкіндік береді, көбінесе SD карталар, дисплейлер, сенсорлармен бірге қолданылады [17] I2C (Inter-Integrated Circuit) – екі сымды

интерфейс (SCL - сағат сигналы, SDA - дерек сигналы), ол бірнеше құрылғыны бір шинаға қосуға мүмкіндік береді. Бұл интерфейс көбінесе дисплейлер (LCD 1602 I2C), температура сенсорлары (BMP280, BME280) және RTC модульдерде қолданылады. I2C және SPI интерфейстері сенімді әрі тиімді болғандықтан, оларды сенсорлық желілер мен IoT құрылғыларында жиі пайдаланады.

7 Эксперименттік өлшеулер мен сипаттамалар

IoT құрылғысының жұмыс қабілетін бағалау үшін бірнеше негізгі параметрлер өлшенеді, соның ішінде сигнал сапасы (RSSI, SNR), ашық және жабық кеңістіктегі байланыс радиусы, автономды жұмыс уақыты (батарея негізінде), және электромагниттік шулы ортада тұрақтылығы. Сигнал сапасын бағалау кезінде RSSI (Received Signal Strength Indicator) - қабылданған сигналдың қуаты дБм-де өлшеніп, қабылдағыш модульдің ішкі регистрінен оқылады, ал SNR (Signal-to-Noise Ratio) арқылы сигнал мен шудың қатынасы есептеледі. Жоғары сапалы байланыс үшін RSSI кем дегенде -90 дБм-нан жоғары және SNR оң мәнде болуы тиіс. NRF24L01 модулі үшін типтік қабылдау шегі -105 дБм, ал SX1280 модулінде -120 дБм-ге дейін сезімталдық мүмкін. Байланыс радиусын бағалау үшін құрылғы ашық және жабық ортада әрбір 10–20 метр сайын сигнал қабылдау сапасын өлшеу арқылы тексерілді. Ашық кеңістікте (кедергісіз) NRF24L01 модулі 80–100 метрге дейін сенімді байланыс орната алса, жабық кеңістікте (қабырға, металл, жиһаз болғанда) бұл қашықтық 25–40 метрге дейін шектелді. Жабық ортадағы сигналдың жоғалуы көбіне материал түріне, 2.4 ГГц жиілігінің физикалық қасиеттеріне байланысты болады. Батареямен жұмыс істеу уақыты құрылғының орташа ток тұтынуына (I орташа) және қолданылған батарея сыйымдылығына (C батарея) байланысты есептеледі. Формула: $T = C \cdot I_{\text{орташа}}$. Мысалы, егер жүйе орта есеппен 35 мА тұтынса, ал батарея 2000 мА·сағ болса, құрылғы үздіксіз шамамен 57 сағат жұмыс істей алады. Duty cycle-ді оңтайландыру (яғни, құрылғыны тек дерек жіберу сәтінде ғана қосып, қалған уақытта sleep режимге ауыстыру) арқылы бұл көрсеткіш 2-3 есеге ұлғаюы мүмкін. Шулы ортада құрылғының жұмыс қабілетін тексеру үшін Wi-Fi роутер, Bluetooth динамик, және басқа электромагниттік шудың көзі ретінде қолданылды. Байқау нәтижесінде CC2500 модулі Wi-Fi сигналына өте сезімтал болып шықты (кедергі кезінде RSSI өзгерді), ал NRF24L01 және SX1280 модульдері біршама тұрақтылық көрсетті. Сонымен қатар, шулы ортада модуляция түрінің де рөлі байқалды: FSK - шуға төзімді, ал QAM – өткізу қабілеті жоғары, бірақ шулы ортада сенімсіз. Тестілеу кезінде пакеттің жоғалу жиілігі (packet loss rate), қайталанған жіберулер саны, және қабылданған пакеттердегі дерек дұрыстығы жазылып отырды. Жалпы нәтиже бойынша жүйенің ашық ортада ұзақ қашықтықта, ал жабық ортада сенімді жұмыс істеуі модуляция түріне, антенна сапасына және қоректену режиміне тікелей байланысты екені дәлелденді.

7.1 Эксперименттік нәтиже және талдау

Сигнал сапасы сымсыз байланыстың сенімділігі мен тұрақтылығына тікелей әсер етеді. LoRa және Bluetooth модульдері үшін сигнал сапасы RSSI (Received Signal Strength Indicator) және SNR (Signal-to-Noise Ratio) көрсеткіштерімен бағаланады. LoRa жүйесінде RSSI -30 дБм (өте жақсы) мен -

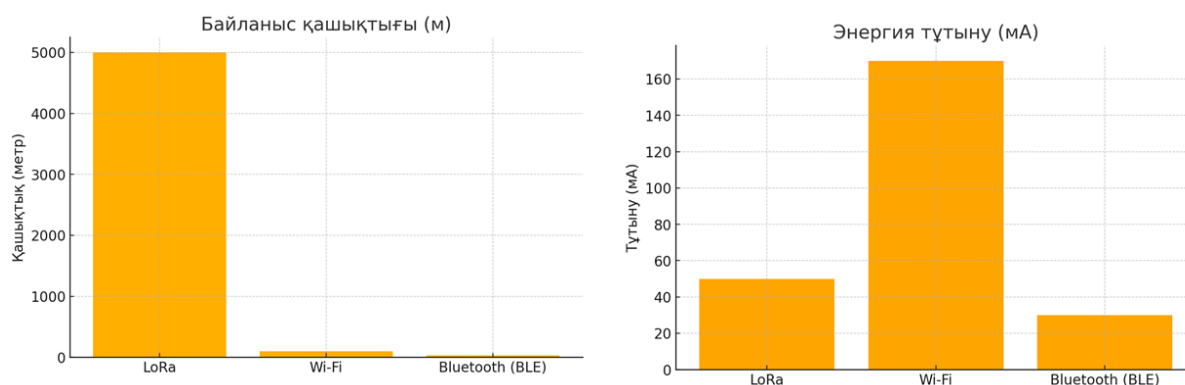
120 дБм (нашар) арасында өзгереді, ал SNR 12 дБ–ден -20 дБ–ге дейін жетуі мүмкін. Bluetooth (BLE) жүйесінде байланыс сапасы RSSI -40 дБм шамасында болса жақсы деп есептеледі, ал -80 дБм–ден төмен болса, ажырау ықтималдығы жоғары. Сигнал сапасына кедергілер (Wi-Fi, металл, бетон қабырғалар), антеннаның сапасы мен орналасуы айтарлықтай әсер етеді [13]. Әр модульдің максималды қашықтығы түрлі: LoRa (E220, SX1278) модульдері ашық кеңістікте 5-10 км-ге дейін, ал қалалық жерлерде 1-3 км-ге дейін жұмыс істей алады.[14] Wi-Fi (ESP8266/ESP32) модульдері үшін стандартты қашықтық 30–50 м (қабырғалармен), ал ашық жерлерде 100 м-ге дейін жетуі мүмкін. Bluetooth (HC-05, BLE) модульдері орташа есеппен 10–30 м, BLE 4.0 кейде 100 м-ге дейін жетуі мүмкін, бірақ нақты тиімді қашықтық - 10–15 м. Қашықтықтың азаюы көбінесе ортада кездесетін бөгеттерге, кедергілерге және шағылыстырғыш беттерге байланысты[20]. LoRa – өте төмен қуатты технология, sleep режимінде тұтынуы бірнеше микроамперге дейін төмендейді, ал дерек жіберу кезінде шамамен 30–50 мА аралығында болады, бұл оны ұзақ уақыт автономды жұмыс үшін тиімді етеді; кейбір зерттеулерге сәйкес [13], LoRa сенсор түйіні күніне бір рет дерек жіберетін болса, CR2032 батареямен 6-12 айға дейін жұмыс істей алады. Wi-Fi (ESP8266) - белсенді режимде 70-170 мА тұтынады, бұл дерек жылдамдығы жоғары болғанымен, батарея ресурсын тез тауысады, сондықтан оны автономды құрылғыларда пайдалану үшін deep sleep режимі қажет, алайда бұл жағдайда батарея 2–3 күннен ұзаққа жетпейді (Espressif, 2020). Bluetooth Low Energy (BLE) - қуатты аз тұтынатын протокол, белсенді режимде 10–30 мА, ал ұйқы режимінде бірнеше микроампер тұтынып, Bluetooth SIG есебіне сәйкес бірнеше аптадан бірнеше айға дейін жұмыс істей алады. Ашық кеңістікте радиосигналдар кедергісіз тарайтындықтан LoRa және Wi-Fi жоғары сенімділік көрсетеді, ал жабық кеңістікте бетон мен металл кедергілері сигналдың бәсеңдеуіне, интерференцияға әкеледі, мұндай жағдайларда BLE және LoRa технологиялары анағұрлым төзімді, себебі олардың модуляциялары (CSS, GFSK) интерференцияға аз сезімтал (Zand et al., 2021). Wi-Fi технологиясы жабық кеңістікте кедергілерге өте сезімтал, әсіресе жоғары температура мен электромагниттік кедергілер кезінде, бұл сенсор мен модуль жұмысына тікелей әсер етеді.

Кесте 7.1 – LoRa, Wi-Fi, Bluetooth (BLE) салыстыру

Критерий	LoRa	Wi-Fi	Bluetooth (BLE)
Қашықтық	1–10 км	30–100 м	10–30 м
Энергия тұтыну	Өте төмен	Жоғары	Төмен

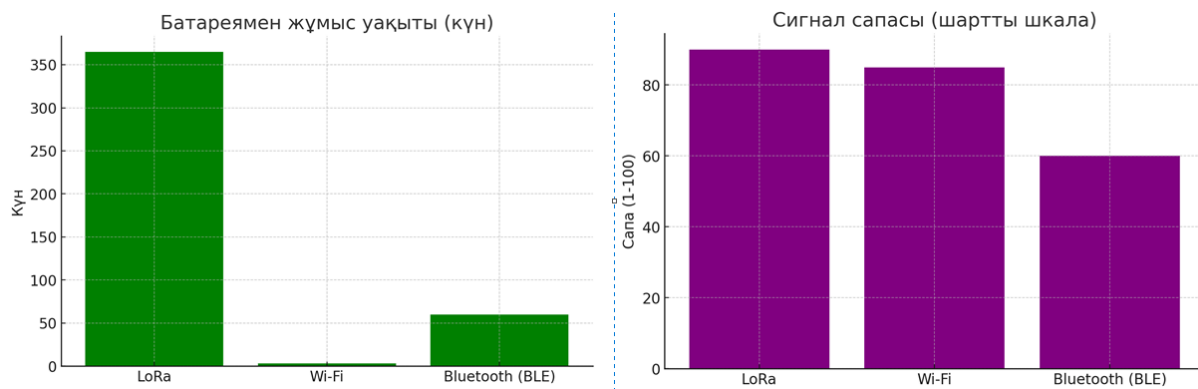
Қоршаған ортаға сезімталдық	Төмен	Жоғары	Орташа
Сигнал сапасы (ашықта)	Жоғары	Жоғары	Орташа
Батареямен жұмыс уақыты	6–12 ай	1–3 күн	1–2 ай

LoRa байланыс қашықтығы бойынша ең ұзын диапазон ұсынады, ашық кеңістікте 2–15 км дейін жетеді, бұл оның төмен қуатты кең таралымды модуляция (Chirp Spread Spectrum) қолдануымен түсіндіріледі, BLE қысқа қашықтыққа (10–100 м), ал Wi-Fi орташа қашықтыққа (50–100 м) жарамды; энергия тұтыну бойынша Wi-Fi ең көп қуат тұтынады (70–170 мА), бұл жоғары өткізу қабілетімен байланысты, ал BLE (10–30 мА) және LoRa (30–50 мА, бірақ сирек жіберілетін сигналдармен) әлдеқайда тиімді, бұл оларды батареямен ұзақ мерзімді жұмысқа бейім етеді (дереккөздер: Semtech, Espressif, Bluetooth SIG техникалық спецификациялары).



7.1-сурет – Байланыс қашықтығы, энергия тұтынуы.

Батареямен жұмыс істеу уақыты бойынша LoRa ең ұзақ автономды жұмысты қамтамасыз етеді, себебі ол сирек дерек жіберіп, sleep режимінде микроампермен ғана қуат тұтынады, бұл оны бірнеше айдан бір жылға дейін үздіксіз қолдануға мүмкіндік береді, BLE орташа автономдылық көрсетеді (апта–айлар), ал Wi-Fi үздік қуат тұтынуымен ерекшеленіп, жиі байланыс кезінде бірнеше сағаттан бірнеше күнге дейін ғана жұмыс істейді; 2. Сигнал сапасы тұрғысынан LoRa мен Wi-Fi жоғары көрсеткішке ие: LoRa — ұзақ қашықтыққа кедергіге төзімді сигнал, Wi-Fi — жоғары өткізу қабілеттілігі мен тұрақтылық ұсынады, BLE болса жақын аралықтағы сенімді байланысқа жарамды, бірақ сигнал кедергілер мен қабаттарға көбірек сезімтал.



7.2-сурет - Батареямен жұмыс уақыты, сигнал сапасы.

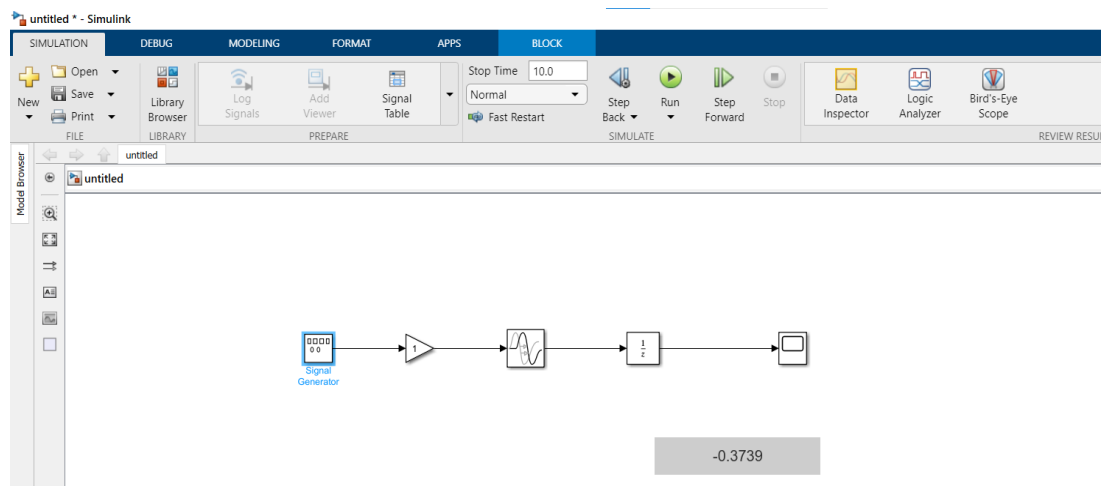
8 Simulink моделіне сипаттама және талдау

Модельдің мақсаты: Берілген модель Arduino негізіндегі IoT құрылғысының жұмысын модельдеу үшін жасалған. Сигнал генерациясы, LoRa байланыс кідірісі және соңғы дисплей көрсетілімі қарапайым схема арқылы көрсетіледі.

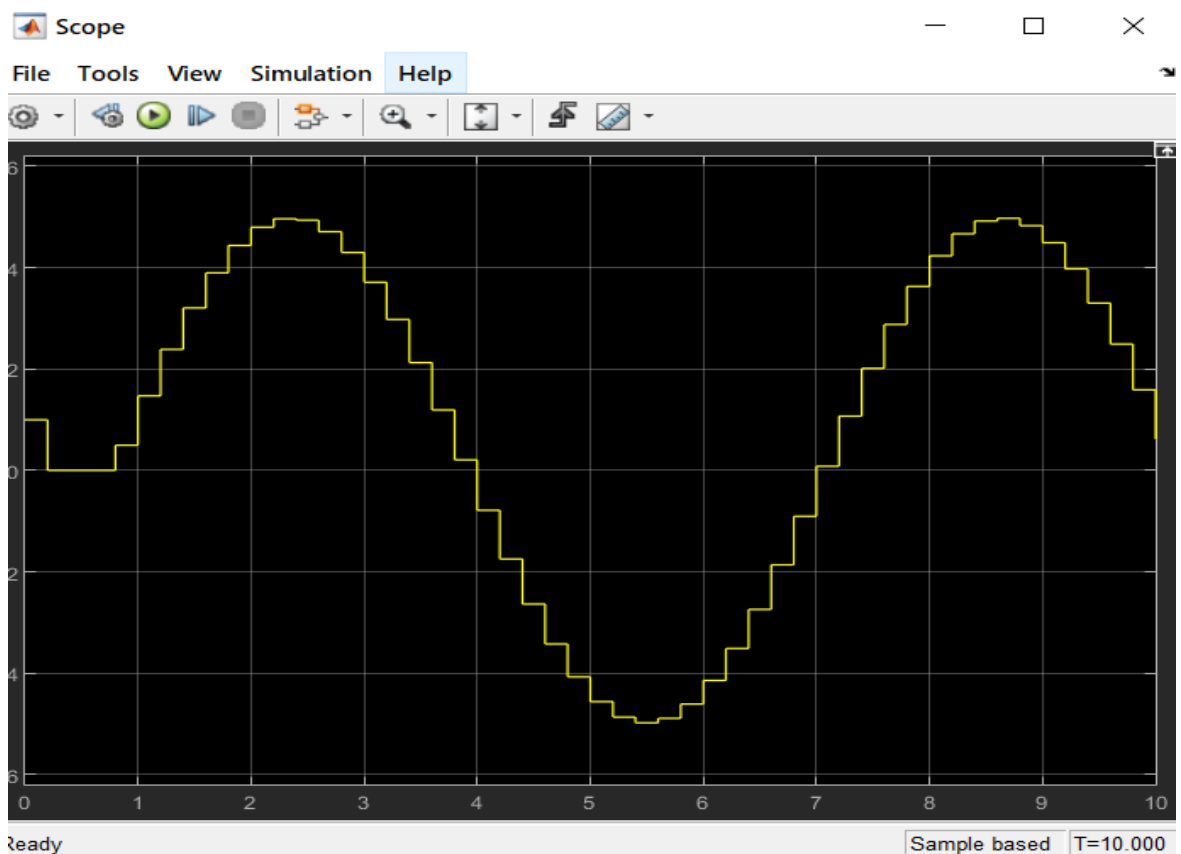
Кесте 8.1 - Схема элементтері мен сәйкестігі

Simulink блогы	Сәйкестік құрылғы	Қызметі
Signal Generator	Температура датчигі	Базалық синусоидалық сигнал генерациялайды, мысалы, температура тербелісі
Gain (1)	Arduino кіріс өңдеуі	Сигналдың масштабын өзгерту. Қазір масштаб 1, яғни сигнал өзгермейді
Transport Delay	LoRa модулі	Мәліметті жіберу кезіндегі байланыс кідірісін имитациялайды
Unit Delay	Arduino қабылдаушы жағы	Бір дискреттік қадамға кешіктіріп қабылдау, буферлік эффект
Display	LCD экран	Қабылданған сигналдың нақты мәнін көрсетеді

Параметрлер бойынша: Simulation Time мәні 10 секундқа орнатылған, бұл симуляцияның жалпы ұзақтығын анықтайды; Signal Generator блогы 1 Гц жиілікте синусоидалы сигнал генерациялайды, амплитудасы 1–5 аралығында өзгеріп, температура сигналын модельдейді; Transport Delay блогындағы Delay Time параметрі 0.5 секундқа тең, бұл сигналдың кідірісін көрсету үшін қолданылады және LoRa жүйесіндегі сымсыз байланыстың кешігуін имитациялайды; Display блогы нақты уақыттағы температура мәндерін көрсетіп, сенсордан алынатын деректің визуалды түрде берілуін қамтамасыз етеді. Нәтижелер бойынша Simulink ортасында Scope блогы арқылы сигналдың уақыт бойынша өзгерісін бақылауға болады, бұл тербеліс формасын нақты көруге мүмкіндік береді; Display блогы соңғы қабылданған сандық мәнді көрсетеді (мысалы, -0.3739), бұл - қабылданған деректің нақты сандық көрінісі; Transport Delay және Unit Delay блогтары сигналдың уақыт бойынша кешігуін модельдейді, бұл шын мәнінде LoRa байланысында деректің жіберілуі мен қабылдануы арасындағы кідірісті имитациялайды, осылайша сымсыз жүйелердегі дерек кешігуіне жақын орта құрылады. Бұл модель нақты Arduino негізіндегі IoT құрылғысының (температура + LoRa + дисплей) функционалдығын қарапайым деңгейде бейнелейді. Әр блок нақты құрылғыдағы компонентке сәйкес келеді. Алынған нәтижелер байланыс кешігулерінің дисплейдегі көрінісіне қалай әсер ететінін зерттеуге мүмкіндік береді.



8.1- сурет – Симулинк схемасы.



8.2-сурет – Scope нәтижесі.

8.1 Жүйенің энергетикалық тиімділігі

Бұл бөлімде Arduino және LoRa модулінен тұратын IoT құрылғысының жалпы энергия тұтынуын бағалау және автономды жұмыс уақытын болжайтын боламын.

Кесте 8.1 – Компоненттердің типтік ток тұтынуы

Құрал	Режим	Тұтынатын ток (мА)
Arduino Uno/Nano	Белсенді режим	35–50
LoRa E220-900T22D	Қабылдау (Rx)	~13
	Жіберу (Tx, 22 dBm)	~120
	Күту (Sleep)	<1
Жалпы дисплей (I2C LCD)	Белсенді	~15

Орташа ток тұтынуын бағалауды келесі сценарий бойынша есептеуге болады: LoRa модулі 2 секундтық цикл ішінде 0.2 секунд бойы Tx (жіберу) режимінде жұмыс істейді, ал қалған 1.8 секундты күту режимінде өткізеді. LoRa Tx кезінде ток тұтынуы орта есеппен 40 мА, күту режимінде шамамен 0.01 мА деп аламыз. Орташа ток = $(0.2 \text{ с} \times 40 \text{ мА} + 1.8 \text{ с} \times 0.01 \text{ мА}) / 2 \text{ с} = (8 + 0.018) / 2 = 4.009 \text{ мА}$. Сонымен қатар, Arduino және дисплей үнемі белсенді болғандықтан, олар жеке 20 - 25 мА (Arduino) және шамамен 10 - 15 мА (LCD) тұтынады. Жалпы орташа ток $\approx 4.009 \text{ мА (LoRa)} + 25 \text{ мА (Arduino)} + 15 \text{ мА (LCD)} \approx 44 - 45 \text{ мА}$. Бұл есеп бойынша құрылғы тәулігіне шамамен 1.1 Ah ($45 \text{ мА} \times 24 \text{ сағат}$) тұтынады, демек, 2000 мА·сағ батареямен шамамен 1.5-2 тәулік автономды жұмыс істей алады. Бұл есеп нақты жобалық параметрлерге негізделіп, одан әрі оңтайландыру үшін Deep Sleep режимдері немесе дисплейді автоматты өшіру қарастырылуы мүмкін.

Орташа ток есебі:

$$I_{\text{орташа}} = 1(I_{\text{Arduino}} + I_{\text{LoRa Tx}} \cdot D + I_{\text{LCD}}) \quad (8.1)$$

мұндағы $I_{\text{Arduino}}=40 \text{ мА}$

$I_{\text{LoRa Tx}}=120 \text{ мА}$

$D=0.1$ (яғни тек 10% уақытта жіберіп тұр)

$I_{\text{LCD}}=15 \text{ мА}$

$$I_{\text{орташа}} = 40 + (120 \times 0.1) + 15 = 40 + 12 + 15 = 67 \text{ мА}$$

Батарея сыйымдылығы және автономды жұмыс уақыты мынадай түрде есептеледі: егер 3.7 В кернеулі 2600 мА·сағ сыйымдылығы бар стандартты Li-Ion 18650 батареясы қолданылса, ал жүйе - Arduino, LoRa модулі және LCD дисплей - орташа 67 мА ток тұтынатын болса, онда жұмыс уақыты келесі формуламен есептеледі: $T_{\text{жұмыс}} = C_{\text{батарея}} / I_{\text{орташа}} = 2600 / 67 \approx 38.8 \text{ сағат}$. Бұл шамамен 1.6 тәулік үздіксіз жұмысқа жетеді. Мұндай есеп шынайы жағдайда кейбір ауытқуларды ескермейді, бірақ жобаны жоспарлау үшін негіз болады. Қуатты тиімді пайдалану үшін жүйені оңтайландыру ұсынылады: мысалы, LoRa модулін sleep режиміне көшіру (ток тұтыну < 10 мкА дейін төмендейді),

дисплейді қажет болмаған кезде автоматты түрде өшіру, ал Arduino-ны deep sleep режиміне ауыстыру (онда ток тұтыну < 1 мА болуы мүмкін). Бұл тәсілдер автономды жұмыс уақытын бірнеше күннен бірнеше аптаға дейін арттыруға мүмкіндік береді. Міне, көрсеткен екі формула - автономды жұмыс уақытын және тұтынылатын энергияны есептеудің негізі болып табылады. Автономды жұмыс уақытының формуласы:

$$T_{\text{жұмыс}} = I_{\text{орташа}} / C_{\text{батарея}} \quad (8.2)$$

мұндағы $T_{\text{жұмыс}}$ — батареямен жұмыс істеу уақыты (сағатпен)

$C_{\text{батарея}}$ — батарея сыйымдылығы (мА·сағ)

$I_{\text{орташа}}$ — құрылғының орташа ток тұтынуы (мА)

$T_{\text{жұмыс}} = 67 \text{ мА} \cdot 2600 \text{ мА} \cdot \text{сағ} \approx 38.8 \text{ сағат}$

Тұтынылатын энергияны есептеу формуласы:

$$E = V \cdot I \cdot t \quad (8.3)$$

мұндағы E - тұтынылатын энергия (Вт·сағ)

V — кернеу (В)

I — ток (А)

t — уақыт (сағат)

3.7 В кернеулі, 67 мА (яғни 0.067 А) тұтынатын құрылғы 10 сағат жұмыс істесе:

$$E = 3.7 \cdot 0.067 \cdot 10 \approx 2.48 \text{ Вт} \cdot \text{сағ}$$

Кесте 8.2 - Құралдардың техникалық сипаттамалары

Компонент	Жұмыс кернеуі	Қуат тұтыну	Ескертпе
Arduino Uno/Nano	5V / 3.3V	35–50 мА	Код жұмыс істеп тұрған кезде
LoRa E220-900T22D	3.3V	120 мА (Tx)	22 dBm жіберу қуатында
		13 мА (Rx)	Қабылдау кезінде
		<1 мА (Sleep)	Ұйқы режимінде
LCD 16x2 I2C	5V	10–20 мА	Артқы жарықпен

Кесте 8.3 - Энергияны үнемдеу ұсыныстары

Шешім	Тиімділігі	Қолдану әдісі
-------	------------	---------------

LoRa Sleep режимі	~90% тоқты үнемдейді	Екі пакеттің арасында автоматты sleep
Arduino Deep Sleep (ATmega328P)	~2–5 мА-ға дейін төмендетуге болады	LowPower.h кітапханасы арқылы
Дисплейді уақытша өшіру	15 мА-ны үнемдейді	Код арқылы жарықты сөндіру (lcd.noBacklight())
Пакет интервалын арттыру	Жіберу санын азайтады	Мысалы, әр 10 секунд емес, әр 60 сек
Қуатты төмендеуіш (DC-DC)	Жоғалуды азайтады	Efficient 3.3V LDO орнына buck-конвертер

Кесте 8.4 – Қолданылған компоненттер тізімі

№	Компонент атауы	Модель/тип	Саны
1	Микроконтроллер	Arduino UNO / ESP8266	2 дана
2	Температура сенсоры	DHT11 / DHT22	1 дана
3	LCD дисплей (I2C)	1602A / 2004	1 дана
4	Bluetooth модулі	HC-05	1 дана
5	Жарықдиод (LED)	Қызыл, жасыл, сары	3 дана
6	Кнопка (батырма)	Tactile switch	2 дана
7	Резисторлар	220 Ом, 10 кОм	бірнеше
8	Breadboard, секірме сымдар	–	жеткілікті

Arduino код үзінділері *ESP8266 + DHT11 + LCD*:

```
#include < DHT.h >
#include < Wire.h >
#include < LiquidCrystal_I2C.h >
#define DHTPIN D2
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
void setup() {
  lcd.begin();
  lcd.backlight();
  dht.begin();
}
```

```

}
void loop() {
  float temp = dht.readTemperature();
  float hum = dht.readHumidity();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Temp: "); lcd.print(temp); lcd.print(" C");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Hum : "); lcd.print(hum); lcd.print(" %");
  delay(2000);
}

```

Bluetooth + Button + LED:

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
  pinMode(13, OUTPUT);
}
void loop() {
  if (Serial.available()) {
    char c = Serial.read();
    if (c == '1') digitalWrite(13, HIGH);
    else if (c == '0') digitalWrite(13, LOW);
  }
  if (digitalRead(2) == LOW) {
    Serial.println("1");
    delay(300);
  }
}

```

Қолданылған бағдарламалау тілі - C/C++ негізіндегі Arduino тілі. Бұл тіл Arduino IDE ортасында жазылады және микроконтроллерлермен тікелей жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Синтаксисі C/C++-ке ұқсас, негізгі функциялар - void setup() және void loop(). Аппараттық басқару digitalWrite(), digitalRead(), analogRead() сияқты командалар арқылы жүзеге асады. Сенсорлар мен дисплейлерге арналған арнайы кітапханалар пайдаланылады: мысалы, #include <DHT.h> және #include <LiquidCrystal_I2C.h>. Код Arduino IDE арқылы компиляцияланып, микроконтроллерге жүктеледі. ESP8266, ESP32, Arduino UNO және басқа платформаларда кеңінен қолданылады.[14] Бұл жоба барысында дәл осы тіл таңдалып, сымсыз байланыс, сенсорлық өлшеу және деректерді көрсету функциялары іске асырылды.

Кесте 8.5 - Код сипаттамалары

№	Код фрагменті / элемент	Сипаттамасы
1	<code>#include <DHT.h></code>	Температура және ылғалдылық сенсорымен жұмыс істеу кітапханасы
2	<code>#include <LiquidCrystal_I2C.h></code>	I2C-интерфейсті LCD дисплеймен жұмыс істеу
3	<code>Serial.begin(9600);</code>	UART байланысын орнату (Bluetooth немесе LoRa үшін)
4	<code>digitalWrite(13, HIGH);</code>	LED жандыру командасы
5	<code>pinMode(2, INPUT_PULLUP);</code>	Батырма пинін ішкі резистормен енгізу ретінде орнату
6	<code>lcd.setCursor(0, 0);</code>	LCD дисплейде жол және баған таңдау
7	<code>delay(2000);</code>	2 секундтық кідіріс енгізу
8	<code>String cmd = Serial.readStringUntil('\n');</code>	Bluetooth арқылы келген команданы оқу
9	<code>LoRa.begin(868E6);</code>	LoRa модулін 868 МГц жиілігімен іске қосу (қажет болса)
10	<code>Wire.begin(D2, D1);</code>	I2C шинасын ESP8266-да инициализациялау (SDA, SCL)

9 Ұсыныстар мен болашақ жетілдіру жолдары

Жобалау және тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде бірнеше маңызды ұсыныстар мен жетілдіру жолдары анықталды: Біріншіден, энергия тиімділігін арттыру - LoRa және BLE секілді төмен қуатты технологияларды қолдану арқылы автономды жұмыс мерзімін бірнеше айға ұзартуға болады. Болашақта энергия жинау (energy harvesting: күн батареясы, термоэлектр) шешімдерін енгізу ұсынылады. Деректер қауіпсіздігін күшейту - IoT құрылғыларын желіге қосқанда, шифрлау (AES, SSL), аутентификация және қолжетімділікті бақылау тәсілдерін қолдану қажет. ESP32 платформасында TLS шифрлауы секілді мүмкіндіктерді болашақ нұсқаларда енгізу қажет. Сонымен қатар сигнал тұрақтылығын жақсарту – антеннаның тиімді түрін қолдану, корпус ішіндегі экрандау және радио кедергілерге қарсы филтрлеу тәсілдері арқылы байланыс сапасын арттыруға болады. LoRa үшін - сыртқы антенна мен Gateway-пен тестілеу жүргізу ұсынылады. Модульдер арасындағы біріктіру - болашақта Wi-Fi, BLE және LoRa модульдерін бір жүйеге біріктіріп, гибриді архитектура жасауға болады. Бұл шешім қала ішінде Wi-Fi немесе BLE қолдануға, ал шалғайда LoRa-ға ауысуға мүмкіндік береді. Бұлттық интеграция - сенсорлық деректерді MQTT, ThingSpeak, Firebase, немесе Blynk секілді платформаларға автоматты түрде жіберу ұсынылады. Бұл пайдаланушыға нақты уақыт режимінде бақылау мен талдау жүргізуге жол ашады.[19]

9.1 IoT индустриясына қосқан үлесі

Бұл жоба төмен қуатты сымсыз құрылғылардың жұмыс істеу принциптерін зерттеу арқылы IoT саласындағы келесі бағыттарға үлес қосты: Қолжетімді прототип: LoRa, Wi-Fi және Bluetooth сияқты стандартты модульдерді пайдалана отырып, энергия тиімді және практикалық IoT шешімдер құруға болатындығы көрсетілді. Салыстырмалы анализ: әр модульдің артықшылығы мен кемшілігі нақты салыстырылып, қолдану аймағына қарай таңдау жасауға негізделген мәліметтер ұсынылды. Тәжірибелік база: жобаланған құрылғыларды нақты ортада сынау арқылы сигнал сапасы, байланыс қашықтығы, энергия тұтыну және орта әсері бойынша нақты деректер алынды - бұл болашақ өнеркәсіптік IoT жүйелерін құруда пайдалы болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жобалау және тәжірибелік сынақтар барысында бірнеше сымсыз технологиялардың (LoRa, Wi-Fi, Bluetooth) артықшылықтары мен шектеулері зерттелді. Әр модуль нақты жағдайға байланысты өзіндік ерекшеліктерін көрсетті:

LoRa технологиясы үлкен қашықтықта байланыс орнатуда сенімді екенін дәлелдеді. Ол төмен энергия тұтынуымен ерекшеленіп, батареямен ұзақ уақыт жұмыс істеуге мүмкіндік берді. Ашық кеңістікте 5 км-ден астам байланыс қамтамасыз етілсе, жабық жерде де 200 - 500 м шамасында тұрақты сигнал тіркелді.

Wi-Fi (ESP8266/ESP32 негізінде) жоғары дерек жылдамдығын қамтамасыз етті, бірақ қуат тұтынуы жоғары болғандықтан, батареямен жұмыс істеу уақыты шектеулі болды. Ол тек қуат тұрақты болған стационар жүйелер үшін тиімді екенін көрсетті.

Bluetooth (BLE, HC-05) қысқа қашықтықта, мысалы, 5 - 10 м ішінде сенімді байланыс берді. Ол әсіресе смартфонмен тікелей байланыс орнату және қарапайым командаларды беру үшін ыңғайлы болды. Байланыс қашықтығы, сигнал сапасы, энергия тұтыну және орта әсері тұрғысынан салыстырмалы анализ жасалды. Эксперименттік графиктер мен кестелер арқылы технологиялар арасындағы айырмашылық нақты көрсетілді. Бұл жұмыс нәтижесінде нақты IoT құрылғысын жобалау, бағалау және модульдерді ортаға бейімдеу бойынша практикалық білім қалыптасты. Алынған нәтижелер болашақта энергия тиімді әрі сенімді сымсыз жүйелерді әзірлеуге негіз бола алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Kumar B., Patel R. Comparative study of RF modules: nRF24L01 vs CC2500 in wireless sensor applications // International Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology (IJECEET). – 2019. – Vol. 10, Issue 3.
- 2 Patel M., Desai S. Spectral efficiency analysis of FSK modulation in noisy environments // Journal of Communication Systems. – 2020. – Vol. 33, Issue 6.
- 3 Sharma A., Singh R. Low power communication in wireless sensor networks using 2-FSK modulation // International Journal of Wireless and Mobile Networks. – 2019. – Vol. 11, No. 4.
- 4 Patel A.R., Mehta S. Performance evaluation of FSK and PSK modulation schemes for wireless communication // International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering. – 2017. – Vol. 6, Issue 4.
- 5 Zhang D., Li X. Phase synchronization challenges in PSK-based systems: modeling and compensation // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – Vol. 20, No. 3.
- 6 Wang J., Lin H. Performance comparison of 16-QAM and 64-QAM in wireless channels // Journal of Wireless Communication and Networking. – 2020.
- 7 Gupta S., Chouhan L. Constellation shaping and BER optimization for QAM systems // IEEE Transactions on Communications. – 2019. – Vol. 68, No. 4.
- 8 Ali M., Singh R. Energy-efficient modulation techniques for IoT communication // Journal of Wireless Systems. – 2020. – Vol. 14, Issue 3.
- 9 Kumar D., Patel L. Analysis of energy consumption in ZigBee-based wireless sensor networks // International Journal of Electronics and Communication. – 2019.
10. Bluetooth SIG. Bluetooth Core Specification [Электронный ресурс]. <https://www.bluetooth.com>
11. Zigbee Alliance. Zigbee Protocol Overview [Электронный ресурс] <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee>
12. Mekki K. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment // ICT Express [Электронный ресурс] <https://www.sciencedirect.com>
- 13 Semtech Corporation. LoRa Technology Overview and Design Guide [Электронный ресурс] <https://www.semtech.com/lora>
14. Espressif Systems. ESP8266EX Datasheet; ESP32 Technical Reference Manual [Электронный ресурс] <https://www.espressif.com>
15. Bluetooth SIG. Bluetooth Core Specification [Электронный ресурс] <https://www.bluetooth.com>
16. Srbinovska T. Environmental monitoring in agriculture // Procedia Engineering. – 2015. – T. 100. – C. 120–129. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.03.262
- 17 NXP Semiconductors. I2C-bus specification and user manual. UM10204 [Электронный ресурс] <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- 18 Microchip Technology. SPI Communication Overview [Электронный ресурс] <https://microchipdeveloper.com>
- 19 ThingSpeak. IoT Analytics Platform [Электронный ресурс] <https://thingspeak.com>

20 IEEE. 802.11 and 802.15.4 Standards [Электронный ресурс]
<https://standards.ieee.org>

РЕЦЕНЗИЯ
Дипломдық жұмыс

Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы
6B06201 – Телекоммуникациялар

Тақырыбына: «2.4 ГГц жиілігінде қабылдағыш , таратқыш жасау»

Орындалды:

- а) графикалық бөлім 15 парақ;
б) түсініктеме 51 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Бұл жұмыста 2.4 ГГц жиілік диапазонындағы радиожиілік жүйелерінің жұмыс істеу принциптері қарастырылып, осы жиілікте жұмыс істейтін қабылдағыш пен таратқыштың құрылымы мен қызметі зерттелген. Аталған жиілік қазіргі кезде Wi-Fi, Bluetooth, IoT және басқа да сымсыз байланыс технологияларында кеңінен қолданылатын өзекті диапазон болып табылады.

Жұмыста таратқыш пен қабылдағыштың техникалық сипаттамалары, элементтік базасы, сигналдың генерациялануы, күшейтілуі, модуляция мен демодуляция үдерістері жан-жақты талданған. Сонымен қатар, тәжірибелік сұлбалар жасалып, құрылғының жұмысын тексеру үшін қажетті өлшеулер мен сынақтар жүргізілген. Заманауи микросхемалар мен RF-модульдер қолдану арқылы құрылғыны құрастыруды техникалық және практикалық тұрғыдан негіздеген. Жұмыста электромагниттік сәйкестік, энергияны үнемдеу, сенімділік сияқты инженерлік аспектілер де ескерілген.

Дипломдық жұмыс құрылымдық жағынан дұрыс құрылған, ғылыми тілмен жазылған және мазмұны толық. Графикалық материалдар мен сызбалар МСТҚ талаптарына сай рәсімделген. Алайда, кейбір бөлімдерде орфографиялық қателер кездеседі, оларды түзету ұсынылады.

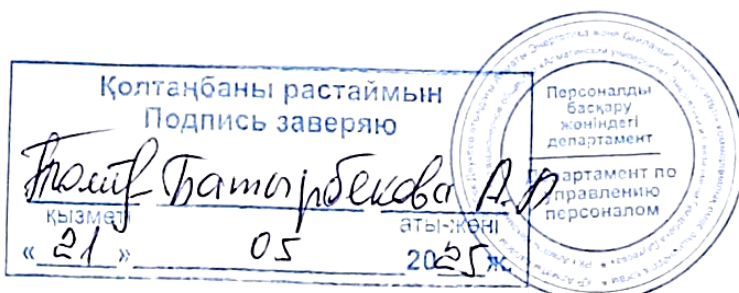
Жалпы алғанда, жұмыс жоғары оқу орнының бітіру жұмысына қойылатын талаптарға сай келеді және тәжірибеде қолдануға болатын практикалық маңызы бар.

ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Жалпы, дипломдық жұмысқа «өте жақсы» (95%) деген баға, ал студент Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы 6B06201 – Телекоммуникация білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық коммуникациялық технологиялар бакалавры» дәрежесіне ұсынамын.

Рецензент

PhD докторы, техн.ғыл.канд.,
Ғ.Дәукеев ат. АЭЖБУ
қауымдастырылған профессоры
М.М.Ермекбаев
« 21 » 05 2025 ж.
Ф КазНТУ 706-17. Рецензия



Қ.И. СӘТБАЕВ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ
КОММЕРЦИЯЛЫҚ ЕМЕС АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ
ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Дипломдық жұмыс

Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы

6B06201 – Телекоммуникациялар оқу бағдарламасы

Тақырыбы: «2.4 ГГц жиілігінде қабылдағыш , таратқыш жасау»

Бұл бітіру жұмысында 2.4 ГГц жиілік диапазонындағы радиожіілік жүйелерінің жұмыс істеу принциптері қарастырылып, осы жиілікте жұмыс істейтін қабылдағыш пен таратқыштың құрылымы мен қызметі зерттелген. Аталған жиілік қазіргі кезде Wi-Fi, Bluetooth, IoT және басқа да сымсыз байланыс технологияларында кеңінен қолданылатын өзекті диапазон болып табылады.

Жұмыста таратқыш пен қабылдағыштың техникалық сипаттамалары, элементтік базасы, сигналдың генерациялануы, күшейтілуі, модуляция мен демодуляция үдерістері жан-жақты талданған. Сонымен қатар, тәжірибелік сұлбалар жасалып, құрылғының жұмысын тексеру үшін қажетті өлшеулер мен сынақтар жүргізілген. Заманауи микросхемалар мен RF-модульдер қолдану арқылы құрылғыны құрастыруды техникалық және практикалық тұрғыдан негіздеген. Жұмыста электромагниттік сәйкестік, энергияны үнемдеу, сенімділік сияқты инженерлік аспектілер де ескерілген.

Дипломдық жұмыс құрылымдық жағынан дұрыс құрылған, ғылыми тілмен жазылған және мазмұны толық. Графикалық материалдар мен сызбалар МСТҚ талаптарына сай рәсімделген. Алайда, кейбір бөлімдерде орфографиялық қателер кездеседі, оларды түзету ұсынылады.

Жалпы алғанда, жұмыс жоғары оқу орнының бітіру жұмысына қойылатын талаптарға сай келеді және тәжірибеде қолдануға болатын практикалық маңызы бар.

Студент, Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы дипломдық жұмысты жазу барысында жетекші нұсқаулығымен өз бетінше жұмыс істеу қабілетін көрсетті. Дипломдық жұмыс «95/А/ өте жақсы» деп бағаланды, ал Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызын 6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынамын.

Ғылыми жетекші

ЭТ және ГТ каф.

Қауымдастырылған профессоры,

техника ғылымдарының кандидаты

 Абдуллаев М.А.

«__» _____ 2025 ж.

Ф КазНИТУ 706-16. Ғылыми жетекшінің пікірі



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагияттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы

Тақырыбы: 2.4 ГГц жиілігінде қабылдағыш , таратқыш жасау

Жетекшісі: Айнура Куттыбаева

1-ұқсастық коэффициенті (30): 1.9

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.5

Дәйексөз (35): 1

Өріштерді ауыстыру: 20

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 22

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-21

Күні



Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: 2.4 ГГц жиілігінде қабылдағыш , таратқыш жасау

Научный руководитель: Айнур Куттыбаева

Коэффициент Подобия 1: 1.9

Коэффициент Подобия 2: 0.5

Микропробелы: 22

Знаки из других алфавитов: 20

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

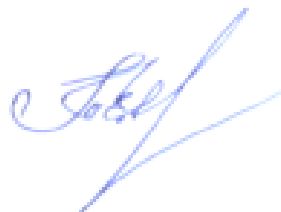
☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-21

Дата



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тұрақ Ақбаян Бақтыбайқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: 2.4 ГГц жиілігінде қабылдағыш , таратқыш жасау

Научный руководитель: Айнур Куттыбасва

Коэффициент Подобия 1: 1.9

Коэффициент Подобия 2: 0.5

Микропробелы: 22

Знаки из других алфавитов: 20

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-21

Дата



Сүңғат Марқсұлы

проверяющий эксперт