ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3
Дослідження протоколів передачі даних в IoT (LPWAN)

Дисципліна «Технології Smart-систем» • Змістовий модуль 2

1. Тема, мета та результати

Тема: Дослідження протоколів передачі даних в мережах для IoT (LPWAN).

Мета: вивчити архітектуру LPWAN та принципи роботи LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M і Sigfox; порівняти їх характеристики; обчислити бюджет лінії зв'язку, час передачі пакета та автономність вузла; змоделювати вплив кількості вузлів на успішність передавання.

Результат: порівняльна таблиця технологій, обґрунтований вибір зв'язку для Smart-системи з ЛР №1, виконані розрахунки, CSV-файл із результатами Python-моделювання та їх аналіз.

2. Необхідні програмні засоби

- ПК із Windows, macOS або Linux; Python 3.10+; редактор коду, термінал; табличний редактор для перегляду CSV.
- У базовому варіанті достатньо стандартної бібліотеки Python; фізичні модулі LoRa, SIM-карти та шлюз LoRaWAN не потрібні.

3. Короткі теоретичні відомості

LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) — клас мереж для передавання невеликих обсягів даних на значні відстані за низького енергоспоживання. Типові обмеження: мала швидкість, часові обмеження на передачу, затримки та компроміс між дальністю зв'язку і пропускною здатністю.

Технологія	Спектр / інфраструктура	Типові особливості
LoRaWAN	Переважно неліцензовані регіональні ISM-діапазони; власні або операторські шлюзи	Далека дія, низька швидкість; класи A/B/C, ADR, OTAA
NB-IoT	Ліцензований стільниковий спектр; мережа оператора	Глибоке покриття, енергоощадні режими, операторська залежність
LTE-M	Ліцензований стільниковий спектр; мережа оператора	Вища швидкість і підтримка мобільності порівняно з NB-IoT
Sigfox	Надвузькосмуговий зв'язок; доступність залежить від регіону	Дуже малі повідомлення і обмежена кількість передач

У LoRaWAN кінцевий вузол передає дані на один або кілька шлюзів. Шлюзи пересилають повідомлення мережевому серверу, який відповідає за мережеву обробку, а прикладний сервер використовує дані застосунку. Активація OTAA передбачає процедуру приєднання; ABP використовує попередньо задані параметри сесії. Класи A, B, C відрізняються доступністю вікон приймання і споживанням енергії.

LoRa — радіомодуляція, LoRaWAN — мережевий протокол і архітектура. MQTT є прикладним протоколом обміну повідомленнями та сам по собі не моделює радіоканал LoRaWAN. Параметр SF (Spreading Factor) впливає на тривалість передачі, чутливість приймання та зайнятість ефіру. Duty cycle і допустимі частоти залежать від регуляторних вимог і конкретного піддіапазону.

4. Розрахункова частина

4.1. Бюджет лінії зв'язку

Потужність прийнятого сигналу визначимо як $P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{path} - L_{other}$ (дБм), де P_{tx} — потужність передавача, G_{tx}/G_{rx} — підсилення антен, L_{path} — втрати поширення, L_{other} — додаткові втрати. Запас зв'язку (link margin): $M = P_{rx} - S_{rx}$, де S_{rx} — чутливість приймача.

Для навчальної моделі прийнято: f = 868 МГц, Ptx = 14 дБм, Gtx = Grx = 0 дБ, Lother = 0 дБ, опорна відстань d0 = 0,1 км, показник втрат n = 3,3. Це умовні параметри; модель не враховує перешкоди, завади й особливості рельєфу. Для d ≥ d0 використаємо: Lpath(d) = FSPL(d0) + 10n log10(d/d0).

4.2. Час передачі (Time-on-Air)

Час одного символу LoRa: Ts = 2^SF / BW, де BW — ширина смуги в Гц. Повний Time-on-Air складається з преамбули та корисного навантаження, включно зі службовими бітами. Припустимо BW = 125 кГц, payload = 12 байтів, Coding Rate = 4/5, преамбула = 8 символів, явний заголовок і CRC.

SF	Тривалість символу	Орієнтовний Time-on-Air
7	1,024 мс	41,216 мс
10	8,192 мс	288,768 мс
12	32,768 мс	1 155,072 мс

Примітка. Зі збільшенням SF за однакових інших параметрів збільшується час зайнятості ефіру. Наведені значення отримано за стандартною формулою LoRa для обраної конфігурації, а не шляхом вимірювання реального радіомодуля.

4.3. Оцінка автономності

Середній струм при одному пакеті кожні T секунд: Iavg = (Itx × Tair + Isleep × (T − Tair)) / T. Теоретичний ресурс батареї, років: Y = (Cbat × k) / (Iavg × 24 × 365), де Cbat — ємність у мА·год, k — поправка на використання ємності. У прикладі Itx = 40 мА, Isleep = 0,02 мА, Cbat = 2400 мА·год, k = 0,8, T = 300 с.

Цей розрахунок є оптимістичною верхньою оцінкою: він не враховує приймання, роботу сенсорів, запуск контролера, повторні передачі, саморозряд і старіння батареї. Теоретичні значення понад декілька років не можна інтерпретувати як реальну гарантію автономності.

5. Практична частина: Python-моделювання

5.1. Опис моделі та обмеження

Розробимо спрощений одноканальний сценарій: N вузлів надсилають пакет 12 байтів кожні 300 секунд протягом години. Пропускну здатність оцінимо за моделлю unslotted (pure) ALOHA: Pусп ≈ exp(−2G), де G = N × Tair / Tperiod — середнє навантаження на канал. Результати випадкового моделювання відтворювані завдяки фіксованому random seed.

Ця модель ілюструє колізії у спільному каналі, але не є повноцінним симулятором LoRaWAN: не реалізує ADR, різні частотні канали, capture effect, gateway demodulator limits, підтвердження, часові вікна, duty cycle, перешкоди та механізми безпеки. Для фізично докладнішого дослідження можуть використовуватися LoRaSim або ns-3 із відповідним модулем.

5.2. Реалізація

Створіть файл lpwan_simulation.py, вставте наведений код і запустіть його командою python lpwan_simulation.py. Скрипт обчислює параметри для SF 7, 10, 12 і 10, 100, 1000 вузлів; зберігає таблицю в lpwan_results.csv.

Приклад 1. Файл lpwan_simulation.py

```
import csv
import math
import random

def airtime(sf, payload=12, bw=125_000, cr=1, preamble=8):
    t_symbol = 2**sf / bw
    de = int(t_symbol > 0.016)  # low data rate optimization
    payload_symbols = 8 + max(
        math.ceil((8 * payload - 4 * sf + 28 + 16) /
                  (4 * (sf - 2 * de))) * (cr + 4), 0)
    return (preamble + 4.25 + payload_symbols) * t_symbol

def rx_margin(distance_km, sf, frequency_mhz=868, path_n=3.3):
    d0_km = 0.1
    pl0 = 32.44 + 20 * math.log10(frequency_mhz) + 20 * math.log10(d0_km)
    path_loss = pl0 + 10 * path_n * math.log10(distance_km / d0_km)
    rx_dbm = 14 - path_loss  # 14 dBm TX; antenna gain/loss = 0 dB
    sensitivity = {7: -123, 10: -132, 12: -137}[sf]
    return rx_dbm - sensitivity

def battery_years(t_air, period_s=300):
    tx_ma, sleep_ma, battery_mah = 40, 0.02, 2400
    mean_ma = (tx_ma * t_air + sleep_ma * (period_s - t_air)) / period_s
    return 0.8 * battery_mah / mean_ma / 24 / 365

rng = random.Random(42)
rows = []
for sf in (7, 10, 12):
    t_air = airtime(sf)
    for nodes in (10, 100, 1000):
        period_s, run_s = 300, 3600
        offered_load = nodes * t_air / period_s
        p_success = math.exp(-2 * offered_load)  # simplified pure ALOHA
        attempts = nodes * run_s // period_s
        delivered = sum(rng.random() < p_success for _ in range(attempts))
        rows.append({
            "SF": sf, "nodes": nodes, "airtime_ms": round(t_air * 1000, 1),
            "margin_2km_db": round(rx_margin(2, sf), 1),
            "battery_years": round(battery_years(t_air), 2),
            "delivery_percent": round(100 * delivered / attempts, 1)
        })

with open("lpwan_results.csv", "w", newline="", encoding="utf-8") as file:
    writer = csv.DictWriter(file, fieldnames=rows[0].keys())
    writer.writeheader()
    writer.writerows(rows)
for row in rows:
    print(row)
```

5.3. Аналіз результатів

Відкрийте lpwan_results.csv. Для кожної комбінації SF/N побудуйте графік частки доставлених пакетів залежно від кількості вузлів. Порівняйте SF7, SF10 і SF12. Поясніть, чому більший SF може покращити запас зв’язку, але погіршує пропускну здатність за високого навантаження.

Змініть період надсилання з 300 до 60 секунд, а потім розгляньте два розміри payload: 12 і 40 байтів. Зафіксуйте зміну Time-on-Air, успішності передачі й енергетичної оцінки. При зміні періоду оновіть period_s у циклі моделювання та передайте такий самий period_s функції battery_years.

6. Завдання для самостійного виконання

1. Опрацюйте матеріали лекції та технічну документацію LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M і Sigfox. Складіть порівняльну таблицю: спектр, дальність, швидкість, енергоспоживання, вартість, масштабованість, безпека.

2. Зобразіть архітектуру LoRaWAN (кінцевий вузол, gateway, network server, application server); поясніть класи A/B/C, OTAA/ABP та ADR.

3. Виконайте власний розрахунок link budget при відстанях 0,5 км, 2 км і 5 км; сформулюйте припущення та обмеження моделі.

4. Обчисліть Time-on-Air для SF7, SF10, SF12 та різних розмірів повідомлення; порівняйте результати.

5. Оцініть час роботи від батареї для двох інтервалів надсилання та поясніть, чому реальна автономність буде нижчою.

6. Запустіть Python-симулятор, збережіть CSV, побудуйте графіки для 10, 100, 1000 вузлів і проаналізуйте результати.

7. Внесіть щонайменше одну зміну до моделі (інший payload, період або число вузлів), порівняйте два сценарії та обґрунтуйте результати.

8. Для Smart-системи, спроєктованої в ЛР №1, оберіть LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M або локальну мережу й аргументуйте вибір з урахуванням енергоспоживання, покриття, затримки, бюджету та безпеки.

7. Вимоги до звіту

1. Тема, мета роботи та опис обраного IoT-сценарію.

2. Порівняльна таблиця LPWAN-технологій і архітектурна схема LoRaWAN.

3. Вихідні дані, формули, приклади розрахунків Time-on-Air, link budget та автономності.

4. Код або ключові фрагменти програми, результати у вигляді таблиць/CSV і графіків.

5. Порівняння щонайменше двох конфігурацій мережі, аналіз обмежень спрощеної моделі.

6. Обґрунтування вибору технології для Smart-системи з ЛР №1; висновки.

7. Оформлений звіт завантажити до Системи електронного забезпечення навчання ЗНУ.

8. Контрольні питання

1. Чим LPWAN відрізняється від Wi-Fi, BLE та мобільного 4G?

2. У чому різниця між LoRa і LoRaWAN?

3. Що таке Spreading Factor та як він впливає на радіоканал?

4. Чим відрізняються класи A, B і C у LoRaWAN?

5. Для чого застосовуються OTAA, ABP та ADR?

6. Що таке link budget і link margin?

7. Як збільшення payload та SF впливає на Time-on-Air?

8. Які параметри визначають ресурс батареї кінцевого вузла?

9. Чому MQTT-моделювання не дорівнює моделюванню фізичного каналу LoRaWAN?

10. Які обмеження має використана модель ALOHA?

11. Як відрізняються LoRaWAN і NB-IoT за інфраструктурою та економікою?

12. Які механізми криптографічного захисту передбачено в LoRaWAN?

9. Рекомендовані джерела

- LoRa Alliance. Стандарти та матеріали LoRaWAN: https://lora-alliance.org/
- Semtech. Матеріали щодо LoRa та параметрів радіоканалу: https://www.semtech.com/lora
- 3GPP. Cellular IoT: https://www.3gpp.org/
- ns-3 Network Simulator: https://www.nsnam.org/

- Python. math / random / csv: https://docs.python.org/3/library/