

ДОДАТОК А

Графічний матеріал кваліфікаційної роботи

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Метод виявлення БПЛА за допомогою акустичних сигналів

ВИКОНАВ:
Студент гр СПМ-23-4 Алейник Д.С.

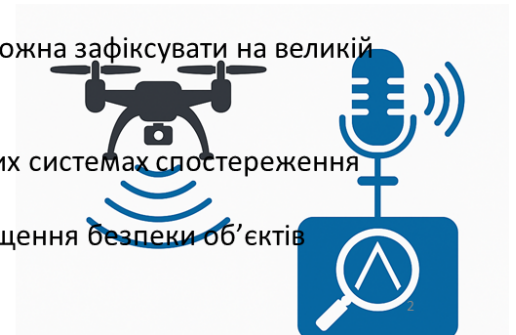
КЕРІВНИК:
доц. Мартовницький В.О.

ХАРКІВ
2025р.

Актуальність дослідження

Актуальність дослідження методу виявлення БПЛА за акустичними сигналами

- Стрімке зростання використання безпілотників (БПЛА) у військовій та цивільній сферах
- Складність виявлення малих БПЛА традиційними методами (радар, оптика)
- Акустичні сигнали — одна з небагатьох ознак, які можна зафіксувати на великій відстані
- Потреба у пасивних, недорогих та енергоефективних системах спостереження
- Розробка таких методів — важливий крок до підвищення безпеки об'єктів критичної інфраструктури



Мета та завдання

🎯 **Мета роботи:** Розробка та дослідження методу виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на основі аналізу їх акустичних сигналів.

📌 **Завдання дослідження:**

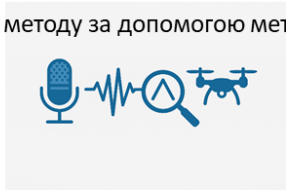
Проаналізувати особливості акустичних характеристик, які створюють БПЛА під час польоту

Зібрати та обробити акустичні дані, що містять звуки дронів різних типів.

Розробити алгоритм виявлення БПЛА за допомогою обраного методу аналізу звукових сигналів.

Здійснити класифікацію акустичних сигналів для відокремлення звуків БПЛА від фонового шуму.

Оцінити ефективність запропонованого методу за допомогою метрик точності виявлення.



3

Методи виявлення дронів

На сьогодні існують чотири основні методи виявлення дронів:

- за допомогою радарів,
- акустичних сенсорів,
- візуальних сигналів,
- радіочастотного аналізу (RF).

4

Приклад аварій дронів



a



b

5

Опис Моделей БПЛА, які включені до датасету

Модель БПЛА	Вантажопідйомність (кг)	Дальність (м)
DJI Phantom I	–	2–100
DJI Phantom II	–	2–100
DJI Phantom II	0.5	невідомо
DJI Phantom III	–	невідомо
DJI Phantom III	0.454	невідомо
DJI Phantom IV	–	2–100
DJI Phantom IV	0.4	2–100
DJI Phantom IV Pro	–	невідомо
DJI Phantom IV Pro	Січ.36	невідомо
DJI Phantom квадрокоптер	–	невідомо
Mavic Pro	0.156–0.256	невідомо
Syma x5	–	1–40
Syma x20	0.425	1–40

6

Тривалість набору звукових даних БПЛА

Класи	Загальна тривалість, с	Навчальна вибірка, с	Вибірка для прогнозу, с
БПЛА з навантаженням	1513	1413	100
БПЛА без навантаження	3334	3234	100
Фоновий шум	2765	2765	100
Усього	7612	7312	300

7

Алгоритм адаптації звукозапису БПЛА

- 1 Збір даних
Запис звуків БПЛА з навантаженням, без навантаження та фонових шумів
- 2 Класифікація
Розподіл аудіо на 3 класи: «Дрон з вантажем», «Дрон без вантажу», «Фоновий шум»
- 3 Збереження
Збереження аудіо в окремих папках з початковою тривалістю
- 4 Адаптація
Створення спеціального фільтраційного блоку, що обрізає або доповнює записи до 1 секунди
- 5 Готовність до навчання
Формування датасету для навчання та валідації моделі глибокого навчання



Діаграма класів вибірки



9

🧠 Рекурентні та згорткові моделі, що були протестовані:

№	Назва моделі	Тип мережі
1	SimpleRNN	Базова рекурентна нейронна мережа
2	LSTM	Мережа з довготривалою пам'яттю
3	BiLSTM	Двонапрямлена LSTM (покращена точність)
4	GRU	Уніфікований рекурентний блок
5	CNN	Згорткова нейронна мережа (аналіз спектрограм)

⚙️ Середовище експерименту:

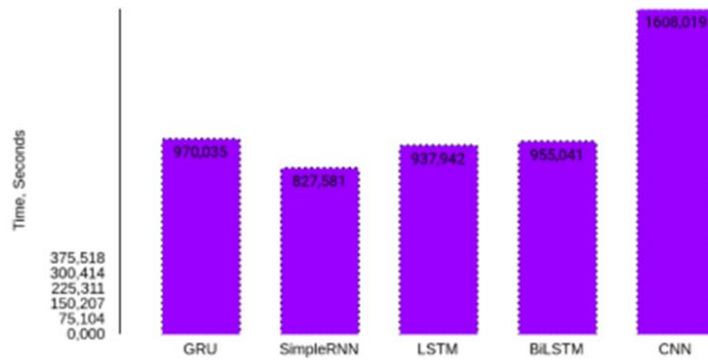
📄 **Мова програмування:** Python

🖨️ **Процесор:** Intel® Core™ i5-8265U @ 1.60 ГГ

🔧 **Тестування виконано локально** (без GPU)

10

Час навчання з запропонованими моделями



11

SimpleRNN

```

Model: "SimpleRNN"
Layer (type)                Output Shape          Param #    Connected to
-----
stft_3_input (InputLayer)    [(None, 16000, 1)]   0          stft_3[0][0]
stft_3 (STFT)                (None, 100, 257, 1)  0          stft_3_input[0][0]
magnitude_3 (Magnitude)      (None, 100, 257, 1)  0          stft_3[0][0]
apply_filterbank_3 (ApplyFilter) (None, 100, 128, 1)  0          magnitude_3[0][0]
magnitude_to_decibel_3 (Magnitu) (None, 100, 128, 1)  0          apply_filterbank_3[0][0]
batch_norm (LayerNormalization) (None, 100, 128, 1)  256        magnitude_to_decibel_3[0][0]
reshape (TimeDistributed)    (None, 100, 128)     0          batch_norm[0][0]
td_dense_tanh (TimeDistributed) (None, 100, 64)     8256       reshape[0][0]
SimpleRNN (SimpleRNN)        (None, 100, 32)     3104       td_dense_tanh[0][0]
skip_connection (Concatenate) (None, 100, 96)     0          td_dense_tanh[0][0]
SimpleRNN[0][0]
dense_1_relu (Dense)         (None, 100, 64)     6208       skip_connection[0][0]
max_pool_id (MaxPooling1D)   (None, 50, 64)     0          dense_1_relu[0][0]
dense_2_relu (Dense)         (None, 50, 32)     2000       max_pool_id[0][0]
Flatten (Flatten)           (None, 1600)       0          dense_2_relu[0][0]
dropout (Dropout)           (None, 1600)       0          flatten[0][0]
dense_3_relu (Dense)         (None, 32)         51232      dropout[0][0]
softmax (Dense)              (None, 3)          99         dense_3_relu[0][0]
-----
Total params: 71,235
Trainable params: 71,235
Non-trainable params: 0
  
```

12

LSTM

```

Model: "LSTM"
Layer (type)                Output Shape                Param #                    Connected to
-----
stft_2_input (InputLayer)    [(None, 16000, 1)]         0                          0
stft_2 (STFT)                (None, 100, 257, 1)        0                          stft_2_input[0][0]
magnitude_2 (Magnitude)      (None, 100, 257, 1)        0                          stft_2[0][0]
apply_filterbank_2 (ApplyFilter) (None, 100, 128, 1)        0                          magnitude_2[0][0]
magnitude_to_decibel_2 (Magnitu (None, 100, 128, 1)        0                          apply_filterbank_2[0][0]
batch_norm (LayerNormalization) (None, 100, 128, 1)        256                         magnitude_to_decibel_2[0][0]
reshape (TimeDistributed)    (None, 100, 128)          0                          batch_norm[0][0]
td_dense_tanh (TimeDistributed) (None, 100, 64)           8256                        reshape[0][0]
LSTM (LSTM)                  (None, 100, 32)           12416                       td_dense_tanh[0][0]
skip_connection (Concatenate) (None, 100, 96)          0                          td_dense_tanh[0][0]
                                                                     LSTM[0][0]
dense_1_relu (Dense)         (None, 100, 64)           6208                        skip_connection[0][0]
max_pool_id (MaxPoolingID)   (None, 50, 64)            0                          dense_1_relu[0][0]
dense_2_relu (Dense)         (None, 50, 32)            2080                        max_pool_id[0][0]
flatten (Flatten)            (None, 1600)              0                          dense_2_relu[0][0]
dropout (Dropout)            (None, 1600)              0                          flatten[0][0]
dense_3_relu (Dense)         (None, 32)                51232                       dropout[0][0]
softmax (Dense)              (None, 3)                 99                          dense_3_relu[0][0]
-----
Total params: 80,547
Trainable params: 80,547
Non-trainable params: 0
  
```

13

BiLSTM

```

Model: "BiLSTM"
Layer (type)                Output Shape                Param #                    Connected to
-----
stft_2_input (InputLayer)    [(None, 16000, 1)]         0                          0
stft_2 (STFT)                (None, 100, 257, 1)        0                          stft_2_input[0][0]
magnitude_2 (Magnitude)      (None, 100, 257, 1)        0                          stft_2[0][0]
apply_filterbank_2 (ApplyFilter) (None, 100, 128, 1)        0                          magnitude_2[0][0]
magnitude_to_decibel_2 (Magnitu (None, 100, 128, 1)        0                          apply_filterbank_2[0][0]
batch_norm (LayerNormalization) (None, 100, 128, 1)        256                         magnitude_to_decibel_2[0][0]
reshape (TimeDistributed)    (None, 100, 128)          0                          batch_norm[0][0]
td_dense_tanh (TimeDistributed) (None, 100, 64)           8256                        reshape[0][0]
bidirectional_lstm (Bidirection (None, 100, 64)           24832                       td_dense_tanh[0][0]
skip_connection (Concatenate) (None, 100, 128)          0                          td_dense_tanh[0][0]
                                                                     bidirectional_lstm[0][0]
dense_1_relu (Dense)         (None, 100, 64)           8256                        skip_connection[0][0]
max_pool_id (MaxPoolingID)   (None, 50, 64)            0                          dense_1_relu[0][0]
dense_2_relu (Dense)         (None, 50, 32)            2080                        max_pool_id[0][0]
flatten (Flatten)            (None, 1600)              0                          dense_2_relu[0][0]
dropout (Dropout)            (None, 1600)              0                          flatten[0][0]
dense_3_relu (Dense)         (None, 32)                51232                       dropout[0][0]
softmax (Dense)              (None, 3)                 99                          dense_3_relu[0][0]
-----
Total params: 95,011
Trainable params: 95,011
Non-trainable params: 0
  
```

14

GRU

```

Model: "GRU"
Layer (type)                Output Shape              Param #   Connected to
-----
stft_2_input (InputLayer)   [(None, 16000, 1)]      0
stft_2 (STFT)               (None, 100, 257, 1)     0         stft_2_input[0][0]
magnitude_2 (Magnitude)     (None, 100, 257, 1)     0         stft_2[0][0]
apply_filterbank_2 (ApplyFilter) (None, 100, 128, 1)     0         magnitude_2[0][0]
magnitude_to_decibel_2 (Magnitu) (None, 100, 128, 1)     0         apply_filterbank_2[0][0]
batch_norm (LayerNormalization) (None, 100, 128, 1)     256        magnitude_to_decibel_2[0][0]
reshape (TimeDistributed)   (None, 100, 128)        0         batch_norm[0][0]
td_dense_tanh (TimeDistributed) (None, 100, 64)         8256       reshape[0][0]
GRU (GRU)                   (None, 100, 64)         24960      td_dense_tanh[0][0]
skip_connection (Concatenate) (None, 100, 128)        0         td_dense_tanh[0][0]
GRU[0][0]
dense_1_relu (Dense)        (None, 100, 64)         8256       skip_connection[0][0]
max_pool_id (MaxPooling1D)  (None, 50, 64)          0         dense_1_relu[0][0]
dense_2_relu (Dense)        (None, 50, 32)          2080       max_pool_id[0][0]
flatten (Flatten)           (None, 1600)             0         dense_2_relu[0][0]
dropout (Dropout)           (None, 1600)             0         flatten[0][0]
dense_3_relu (Dense)        (None, 32)               51232      dropout[0][0]
softmax (Dense)             (None, 3)                99         dense_3_relu[0][0]
-----
Total params: 95,139
Trainable params: 95,139
Non-trainable params: 0
  
```

15

Порівняння точності моделей SimpleRNN, LSTM, BiLSTM, GRU та CNN на 128-100вимірних мельспектрограмах

Навчені моделі	Точність, %
Проста RNN (SimpleRNN)	98
LSTM	97
Двостороння LSTM (BiLSTM)	97
GRU з 32 осередками	98
CNN-структура, як у [1]	94
GRU з 64 осередками	98

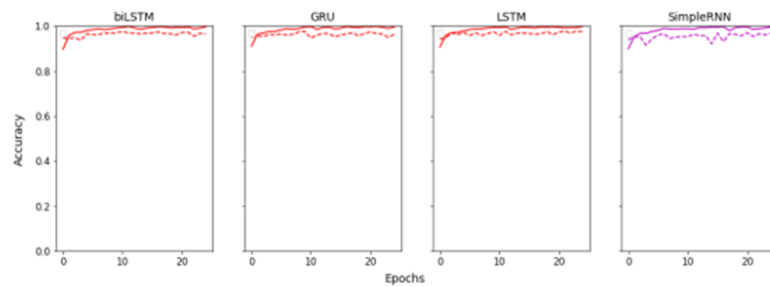


Рисунок –Результати навчання

16

Висновки

Предмет дослідження:

Акустичне виявлення безпілотників (БПЛА) з використанням методів **глибинного навчання**.

Проведено:

- Сформовано аудіо-датасет з 3 класів (з/без навантаження, фоновий шум)
- Реалізовано обрізку аудіо до **1 сек** для режиму реального часу
- Навчено моделі: **SimpleRNN, LSTM, BiLSTM, GRU, CNN**
- Виконано оцінювання точності з використанням **тестового набору**

Результати:

- LSTM** та **BiLSTM** показали **найвищу точність**
- CNN** – конкурентоспроможна, але слабша у часовій динаміці
- Вибір оптимальної кількості епох (**25**) забезпечив стабільність

Висновок:

Рекурентні нейронні мережі ефективні для задач **виявлення БПЛА за звуком у реальному часі**. Отримані результати можуть бути основою для **систем безпеки та моніторингу**.

Апробація результатів: Мартовицький В. О., Шеховцов О. В., Алейник Д. С., Пахомова Є. В. та Іванченко Д. І. «ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ РАДІОКЕРОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ЗА ЇХ РАДІОСИГНАЛОМ» Вісник Херсонського національного технічного університету» для розміщення у № 2 (2025)