

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-3>

УДК 629.8:621.3

ЛЕЙЧЕНКО Кирило

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0000-0002-1599-6037>
k.leychenko@csn.khai.edu

ФЕСЕНКО Герман

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0000-0002-4084-2101>
h.fesenko@csn.khai.edu

ХАРЧЕНКО Вячеслав

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>
v.kharchenko@csn.khai.edu

СТРАТЕГІЇ РОЗГОРТАННЯ ТА МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЮ БПЛА ДЛЯ УТВОРЕННЯ LiFi МЕРЕЖІ

У статті представлені стратегії розгортання рою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) із стаціонарного депо для утворення літаючої LiFi мережі в приміщенні з перешкодами з використанням заздалегідь прокладеного маршруту розповсюдження LiFi сигналу. Надано приклад реалізації стратегії, яка передбачає рух кожного БПЛА з депо одразу до точки призначення на прокладеному маршруті розповсюдження LiFi сигналу.

Запропоновані методи та наведено приклади забезпечення безперервного функціонування літаючої LiFi мережі із необхідним рівнем надійності протягом заданого часу у приміщенні з перешкодами шляхом використання двох змін рою БПЛА.

Надана графічна інтерпретація почергової роботи двох змін рою БПЛА для розгортання і забезпечення безперервного функціонування літаючої LiFi мережі.

Ключові слова: рій БПЛА, стратегія розгортання, літаюча LiFi мережа, надійність, графік змін.

LEICHENKO Kyrylo, FESENKO Herman, KHARCHENKO Vyacheslav
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

STRATEGIES FOR THE DEPLOYMENT AND METHODS FOR ENSURING RELIABILITY OF UAV SWARM TO CREATE A LiFi NETWORK

It was determined that the following strategies can be used to deploy a swarm of UAVs from a stationary depot to form a flying LiFi network in a room with obstacles: strategy 1a, which involves the movement of each UAV from the depot to the first point of the LiFi route and further deployment of the network within it; strategy 1b, which involves the movement of each UAV from the depot immediately to the destination point on the LiFi route; strategy 1c, which involves the movement of each UAV from the depot to a point as close as possible to the middle of the LiFi route, and further deployment of the network within it.

It is shown that the work cycle of one UAV swarm shift for deploying and ensuring the functioning of the LiFi network consists of the following stages: departure from the depot and approach to specified points on the laid LiFi route; network settings; data transmission; return to the depot; waiting for the next work cycle.

A graphical interpretation of the alternating work of two UAV shifts to deploy and ensure uninterrupted functioning of the flying LiFi network is provided, according to which the UAVs of the next shift arrive and configure the network formed by them before the UAV of the current shift starts moving to the depot.

With the use of the developed software, it was calculated that the uninterrupted functioning of the flying LiFi network with a YBR not lower than $= 0.99875$ for 180 minutes can be ensured by two shifts, each of which performs three work cycles and consists of 6 UAVs with a failure rate of $= 0.0005$ 1/h.

Methods are proposed and examples are given to ensure the uninterrupted functioning of a flying LiFi network with the required level of reliability for a given time in a room with obstacles by using two UAV swarm shifts.

A graphical interpretation of the alternate operation of two UAV swarm shifts for the deployment and uninterrupted operation of a flying LiFi network is provided.

Keywords: UAV swarm, deployment strategy, flying LiFi network, reliability, schedule of shifts.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У разі аварій на об'єктах критичної інфраструктури персоналу кризового центру (КЦ) важливо отримувати інформацію як про основні параметри технологічного обладнання, так і про рівень забруднення робочого середовища виробничих приміщень. Однак внаслідок аварії штатне комунікаційне обладнання може бути пошкоджене і зазначена вище важлива інформація перестане надходити до КЦ, тим самим значно ускладнюючи прийняття його персоналом ефективних управлінських рішень щодо реагування на аварію. У цьому випадку для поновлення надходження інформації до КЦ може бути розгорнута літаюча LiFi мережа на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [1]. Літаюча LiFi мережа є стійкою до електромагнітних перешкод від інших електронних пристроїв або радіочастотних сигналів і може запропонувати значно вищу

швидкість передачі даних порівняно з традиційними радіочастотними технологіями зв'язку. Така властивість набуває особливого значення для сценаріїв, які передбачають швидке передавання великих обсягів даних (потоків відео високої чіткості, передача даних з датчиків в режимі реального часу) або широкомасштабне відеоспостереження. Крім того, літаюча LiFi мережа забезпечує гнучкість у сценаріях розгортання, оскільки вона може працювати в різних середовищах, де традиційний радіочастотний зв'язок може бути проблематичним, наприклад, у виробничих приміщеннях з руйнуваннями. Така універсальність дозволяє цій мережі виконувати широкий спектр завдань у різноманітних операційних умовах. Разом з тим, необхідно мати на увазі, що світлові сигнали можуть бути обмежені перешкодами у виробничих приміщеннях. Це потребуватиме прокладання маршруту розповсюдження LiFi сигналу в обхід цих перешкод [1]. Не менш важливою є також задача забезпечення надійного функціонування літаючої LiFi мережі протягом заданого часу. З огляду на те, що час роботи БПЛА обмежений ресурсом їх бортових батарей, для безперебійного функціонування літаючої LiFi мережі може знадобитися декілька змін БПЛА, які почергово змінюють одна одну [2].

Аналіз досліджень та публікацій

Останнім часом літаючі LiFi мережі, які певний час вважались принципово можливим, але доволі екзотичним технічним рішенням, стають все більш затребуваними під час вирішення задач з реалізації бездротового зв'язку як всередині приміщень, так і за їх межами. Необхідність розроблення спеціального алгоритму управління контурами передавача і приймача LiFi сигналу під час забезпечення кількох БПЛА функціонування літаючої LiFi мережі обґрунтована у [3]. Стаття [4] демонструє можливості застосування літаючої LiFi мережі для збору та передачі даних про метеоумови до наземної станції для подальшої їх обробки. Автори [5] наводять результати розроблення та дослідження продуктивності нової універсальної системи «уніфікований фізичний рівень» з використанням машинного навчання на основі глибоких та згорткових нейронних мереж, яка може ефективно реалізувати гібридні літаючі LiFi/WiFi мережі в приміщеннях. У роботі [6] обґрунтована доцільність застосування літаючої LiFi мережі всередині приміщення для підтримки рішень на основі технологій 6G.

Окремі роботи присвячені забезпеченню надійності роїв (флотів) БПЛА, задіяних у розгортанні літаючих бездротових мереж. У статті [7] представлено модель надійності рою БПЛА, який розгортає бездротову літаючу мережу в умовах інтенсивних бойових дій, на основі безперервного часового ланцюга Маркова. Робота [8] пропонує новий метод оцінки надійності рою (флоту) БПЛА з різними видами його резервування, який дозволяє з використанням міри важливості визначати БПЛА, несправність яких має найбільший вплив на відмову літаючої бездротової мережі. Моделі оцінки надійності флоту БПЛА з централізованим і децентралізованим управлінням, які базуються на представленні цього флоту як системи з бінарними станами, представлено у [9]. Авторами [10] розроблено та досліджено моделі надійності літаючої бездротової мережі на основі угруповань флотів БПЛА з централізованою, децентралізованою і змішаною схемою активації резервних БПЛА та з можливістю резервування пунктів управління, сформульовано рекомендації щодо вибору схеми активації резервних БПЛА.

Проведений аналіз результатів досліджень і публікацій, представлених у [3 – 10] показав, що у роботах [3 – 6] недостатньо уваги приділяється особливостям розгортання літаючих LiFi в умовах перешкод у приміщеннях, а роботи [7 – 10] залишають поза зоною уваги питання забезпечення необхідного рівня надійності літаючої LiFi мережі, безперервність функціонування якої забезпечується позмінним чергуванням кількох груп БПЛА.

Мета і завдання досліджень

Метою статті є розроблення стратегій розгортання рою БПЛА для утворення літаючої LiFi мережі у приміщеннях з перешкодами та забезпечення її безперебійного функціонування із необхідним рівнем надійності протягом заданого часу. Для реалізації заявленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати різні варіанти розміщення БПЛА на прокладеному заздалегідь маршруті розповсюдження LiFi сигналу від джерела інформації до її споживача у приміщенні з перешкодами;
- запропонувати стратегії розгортання рою БПЛА із стаціонарного депо для утворення літаючої LiFi мережі на прокладеному маршруті;
- запропонувати методи забезпечення безперебійного функціонування літаючої LiFi мережі із необхідним рівнем надійності протягом заданого часу.

Стратегії розгортання рою БПЛА із стаціонарного депо для утворення літаючої LiFi мережі в просторі з перешкодами

Під час опису стратегій приймемо наступні припущення:

- маршрут розповсюдження LiFi сигналу (LiFi маршрут) з точки А (джерело інформації) до точки В (споживач інформації), кількість БПЛА для утворення LiFi мережі та точки їх розміщення на маршруті вважаються визначеними заздалегідь відповідно до [1];
- місце базування БПЛА (стаціонарне депо), яке позначається точкою С, не співпадає з точками А і В, а також із жодною із точок розміщення БПЛА на LiFi маршруті;
- кількість БПЛА є достатньою для покриття ними всіх визначених точок розміщення БПЛА на LiFi маршруті;
- використовуються однотипні БПЛА.

Стратегії розгортання БПЛА для утворення літаючої LiFi мережі можна поділити на 2 групи.

1. Індивідуальні. Ця група стратегій передбачає рух БПЛА з депо до точок їх розміщення на LiFi маршруті за індивідуальними маршрутами відповідно до встановлених правил, включаючи правила обходу перешкод. Такі стратегії суттєво залежать від ємності бортової батареї кожного БПЛА, оскільки її ресурс, окрім забезпечення роботи літаючої LiFi мережі, додатково витрачається як на переміщення до визначеної точки, так і на повернення до депо.

2. Колективні. Ця група стратегій передбачає доставлення у визначену точку LiFi маршруту групи БПЛА за допомогою БПЛА-носія. Точка прибуття групи БПЛА може визначатися за критерієм часу розгортання мережі. Ці стратегії є більш складними, оскільки у набір правил руху та обходу перешкод вводиться додаткова сутність – БПЛА-носії. Однак його використання дозволяє зекономити ресурс батареї кожного БПЛА і забезпечити більш тривале функціонування LiFi мережі за одне розгортання.

Далі буде розглядатися лише група індивідуальних стратегій, а саме такі.

Стратегія 1а «Рух кожного БПЛА до першої точки LiFi маршруту і подальше розгортання мережі в межах нього». Ця стратегія може бути затребуваною у разі відсутності перешкод на маршруті руху БПЛА від депо (точка С) до першої точки LiFi маршруту та наявності значної кількості перешкод на маршрутах руху БПЛА до інших його точок (необхідно прокладати додаткові маршрути в обхід цих перешкод). Прибуваючи до першої точки, далі кожен БПЛА здійснює рух за LiFi маршрутом до точки призначення (визначеного для нього місця розташування у складі LiFi мережі, що розгортається). Черговість вильотів БПЛА із депо (точка С) встановлюється у порядку зменшення відстані між депо і точкою призначення: першим вилітає найбільш віддалений від своєї точки призначення БПЛА і так далі. Ця стратегія характеризується значними витратами ресурсу бортової батареї БПЛА, найбільш віддаленого від своєї точки призначення.

Стратегія 1б «Рух кожного БПЛА одразу до точки призначення на LiFi маршруті». Цю стратегію доцільно застосовувати у випадку, коли на маршрутах руху більшості БПЛА з депо до точки призначення відсутні перешкоди. Ця стратегія унеможливує утворення черг у точках LiFi маршруту, оскільки кожен БПЛА рухається до своєї точки призначення за власним маршрутом. Черговість вильоту БПЛА із депо також відбувається у порядку зменшення відстані між депо і точкою призначення.

Стратегія 1в «Рух кожного БПЛА до точки, максимально наближеної до середини LiFi маршруту, і подальше розгортання мережі в межах нього». Ця стратегія є доцільною у разі відсутності перешкод на маршруті руху БПЛА від депо до цієї точки LiFi маршруту та наявності значної кількості перешкод на маршрутах руху БПЛА до інших його точок (необхідно прокладати додаткові маршрути в обхід цих перешкод). Прибуваючи до точки, максимально наближеної до середини LiFi маршруту, далі кожен БПЛА здійснює рух за LiFi маршрутом у напрямку точки призначення – або в напрямку точки А або в напрямку точки В. Черговість вильотів БПЛА із депо відбувається у порядку зменшення відстані між депо (точка С) і точкою призначення. Рух в обидві напрямки LiFi маршруту зменшить ймовірність утворення черг у цій точці.

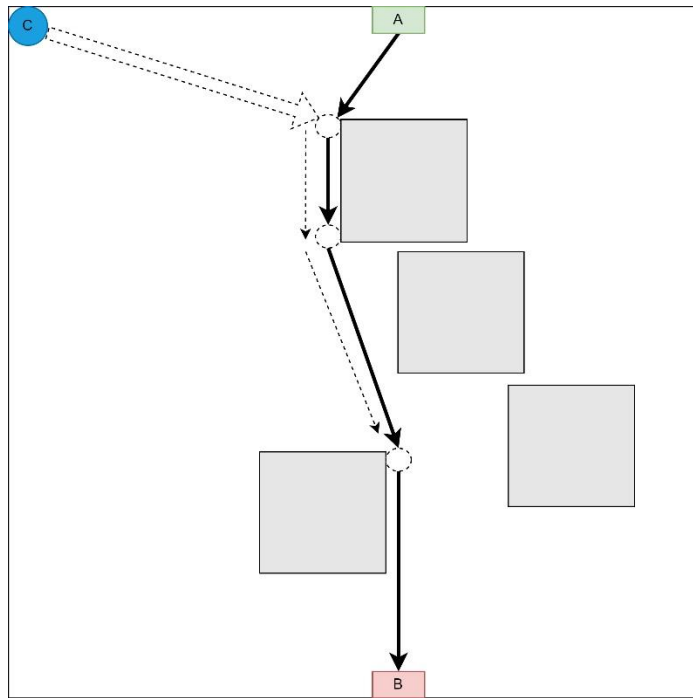


Рис. 1. Стратегія 1а розгортання БПЛА

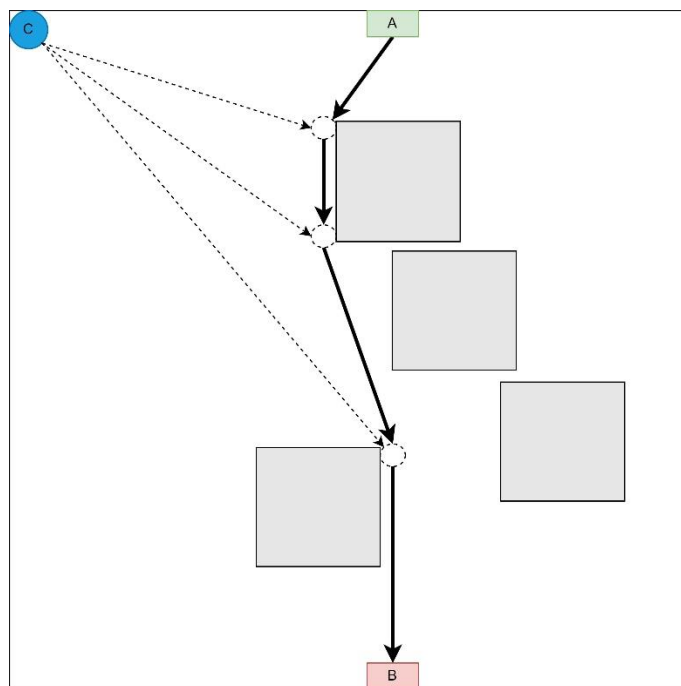


Рис. 2. Стратегія 1б розгортання БПЛА

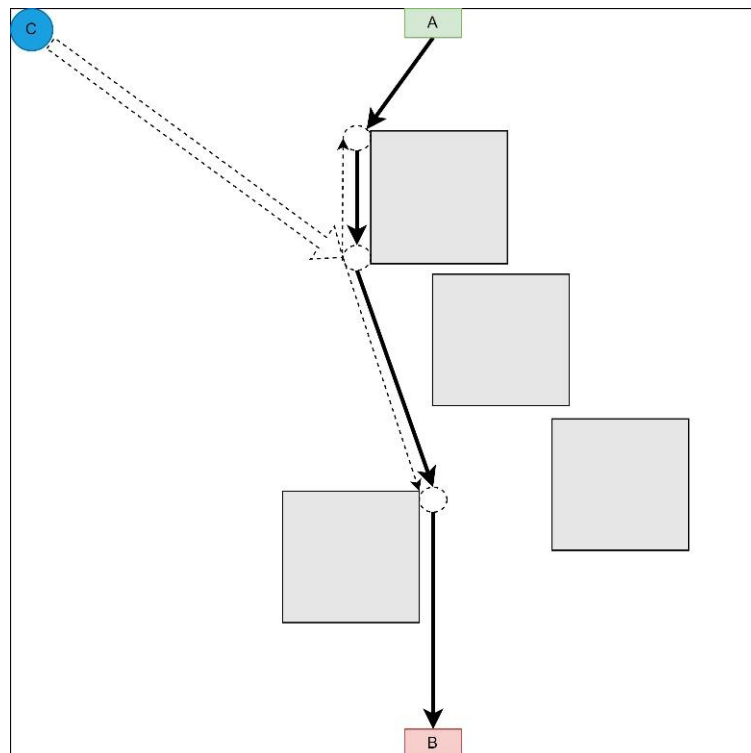


Рис. 3. Стратегія 1в розгортання БПЛА

Приклад реалізації стратегії 1б для розгортання літаючої LiFi мережі

Для ілюстрації процесу розгортання LiFi мережі була обрана стратегія 1б.

Реалізації цій стратегії передувало прокладання LiFi маршруту і позначення на ньому точок розміщення БПЛА для утворення літаючої LiFi мережі з використанням для обходу перешкод методу керованого водоспаду [1]. Моделювання відбувалося з використанням розробленого програмного засобу “Simulation Way”. Результат моделювання проілюстровано на рис. 4, де показано:

- робочу площу виробничого приміщення з 15 прямокутними перешкодами розмірами 2x2 метри кожна;
- прокладений в обхід перешкод LiFi маршрут (показаний червоним кольором);
- точки розміщення БПЛА на LiFi маршруті для утворення літаючої LiFi мережі (показані зеленими точками). Ці точки отримувались з урахуванням обмеження на максимально можливу відстань між БПЛА (її збільшення може не гарантувати необхідну якість передачі світлового сигналу);
- джерело інформації (позначене зеленим прямокутником з літерою А всередині);
- споживач інформації (позначений червоним прямокутником з літерою В всередині);
- стаціонарне депо для БПЛА (позначене синім колом с літерою С).

Далі для розгортання літаючої LiFi мережі було задіяно БПЛА із депо (точка С). Результати моделювання проілюстровані на рис. 5, де синім кольором показані індивідуальні маршрути руху БПЛА до своїх точок призначення на LiFi маршруті. За наявності перешкод, їхній обхід під час прокладання маршрутів руху БПЛА з депо до точок призначення здійснювався за правилом правого кута [1].

Методи забезпечення надійності літаючої LiFi мережі

Однією з вимог до розгорнутої літаючої LiFi мережі може бути така: забезпечити безперервну роботу мережі з ймовірністю безвідмовної роботи (ЙБР) $P(t)$ не нижче мінімально припустимого значення P_{min} .

Під час розгляду методів забезпечення надійності літаючої LiFi мережі відповідно до вказаної вимоги приймемо наступні припущення:

- всі БПЛА є однотипними і характеризуються однаковою інтенсивністю відмов λ ;

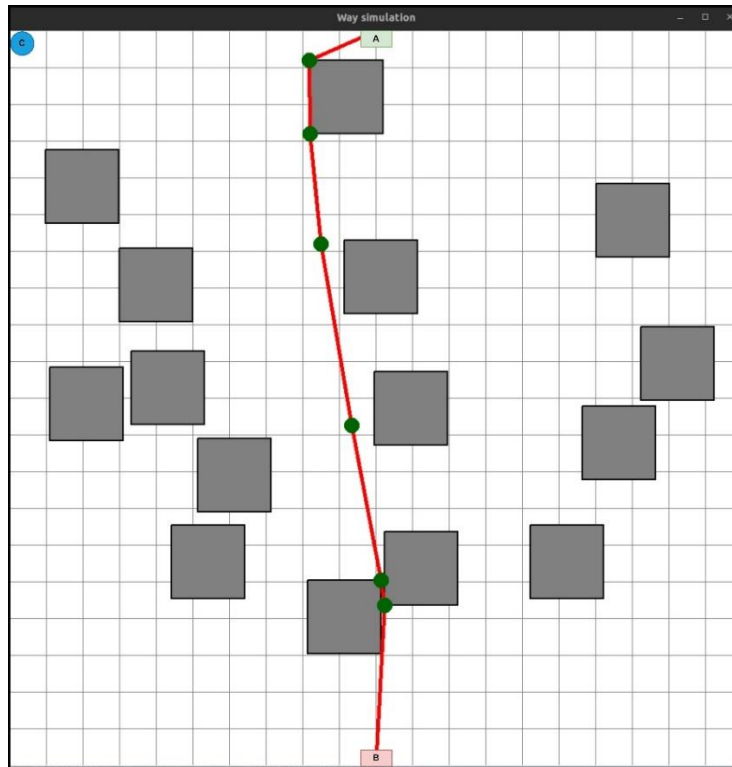


Рис. 4. Прокладений LiFi маршрут з точками розміщення БПЛА для утворення літаючої LiFi мережі

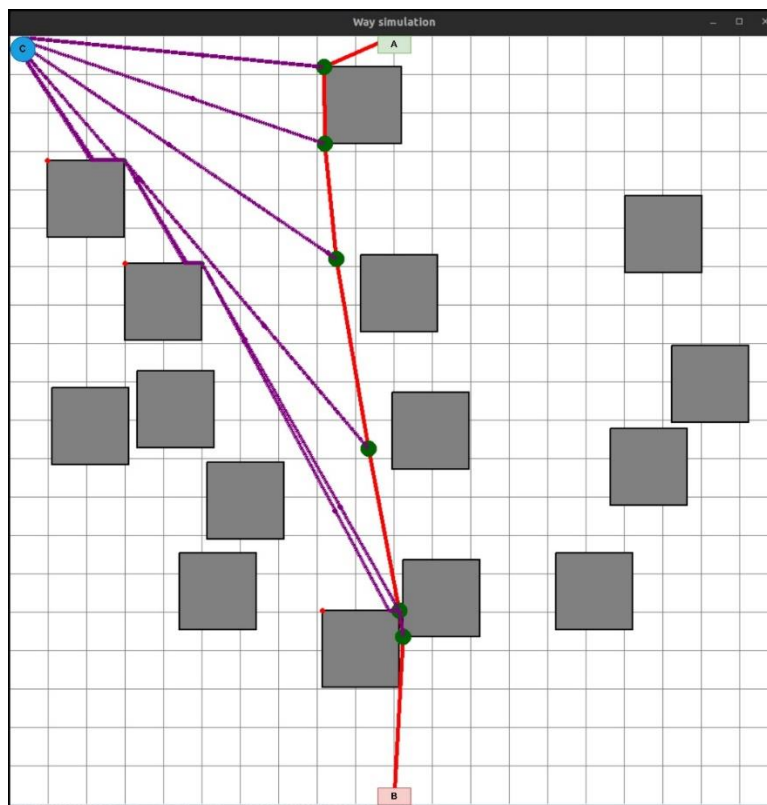


Рис. 5. Розгортання літаючої LiFi мережі відповідно до стратегії 1б

- для забезпечення безперервної роботи літаючої LiFi мережі використовуються дві зміни БПЛА з однаковою кількістю n БПЛА в кожній з них, причому ця кількість дорівнює кількості точок їх розміщення на прокладеному LiFi маршруті;

- працююча зміна повинна бути замінена іншою зміною не пізніше часу t_{crit} досягнення працюючою зміною мінімально припустимого значення ЙБР P_{min} навіть за наявності ресурсу батареї БПЛА t_{batt} , достатнього для продовження їх функціонування у складі літаючої LiFi мережі;
- кожна зі змін перед початком першого циклу своєї роботи характеризується ЙБР $P_0 = 1$;
- з кожного наступного циклу зміна починає свою роботу з ЙБР, якої вона досягла на момент повернення до депо;
- після повернення до депо ресурс батареї поновлюється.

Планування вильотів змін для утворення літаючої LiFi мережі відбувається з урахуванням того, що кожна з цих змін може перебувати у двох станах – стані функціонування у складі LiFi мережі, тривалість перебування у якому розраховується за формулою (1) і стані очікування, у якому зміна перебуває протягом часу t_{wait} .

$$t_{function} = t_{set} + t_{transm} \quad (1)$$

де t_{set} – час налаштування літаючої LiFi мережі; t_{transm} – час функціонування літаючої LiFi мережі в режимі передачі даних.

Перехід із стану очікування у стан функціонування триває протягом часу перельоту БПЛА із депо до своїх точок на LiFi маршруті t_{arriv} , а із стану функціонування у стан очікування – протягом часу повернення БПЛА з LiFi маршруту до депо t_{return} . Таким чином, повний цикл роботи зміни може мати вигляд, представлений на рис. 6, а його тривалість буде розраховуватись за формулою:

$$t_{shift} = t_{arriv} + t_{set} + t_{transm} + t_{return}; t_{batt} > t_{shift} \quad (2)$$

ЙБР кожної зміни на момент повернення до депо у першому циклі роботи може бути розрахована за формулою (3), а у другому та подальшому циклах ($k = 2, \dots, m$) – за формулою (4):

$$P_1(t_{shift}) = P_0 \times e^{-n\lambda t_{shift}}; P_1(t_{shift}) > P_{min} \quad (3)$$

$$P_k(t_{shift}) = P_{k-1} \times e^{-n\lambda t_{shift}}; P_k(t_{shift}) > P_{min} \quad (4)$$

Таким чином, кожна зміна може працювати не більше часу t_{crit_1} (формула (5)) у першому циклі і часу t_{crit_k} (формула (6)) – у другому і подальших циклах.

$$t_{crit_1} = \frac{\ln(\frac{P_0}{P_{min}})}{n\lambda} \quad (5)$$

$$t_{crit_k} = \frac{\ln(\frac{P_{k-1}}{P_{min}})}{n\lambda} \quad (6)$$

Для забезпечення безперервності передачі даних необхідно забезпечити виліт наступної зміни на $(t_{arriv} + t_{set})$ раніше часу $(t_{shift} - t_{return})$, що проілюстровано на рис. 7.

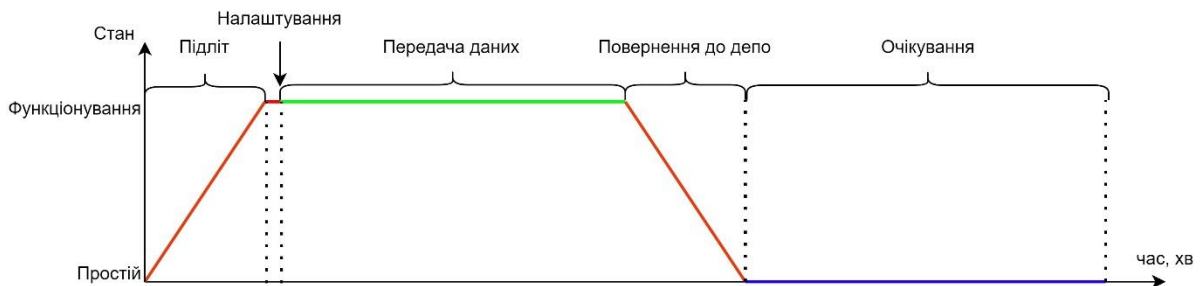


Рис. 6. Цикл роботи однієї зміни для розгортання і забезпечення функціонування LiFi мережі

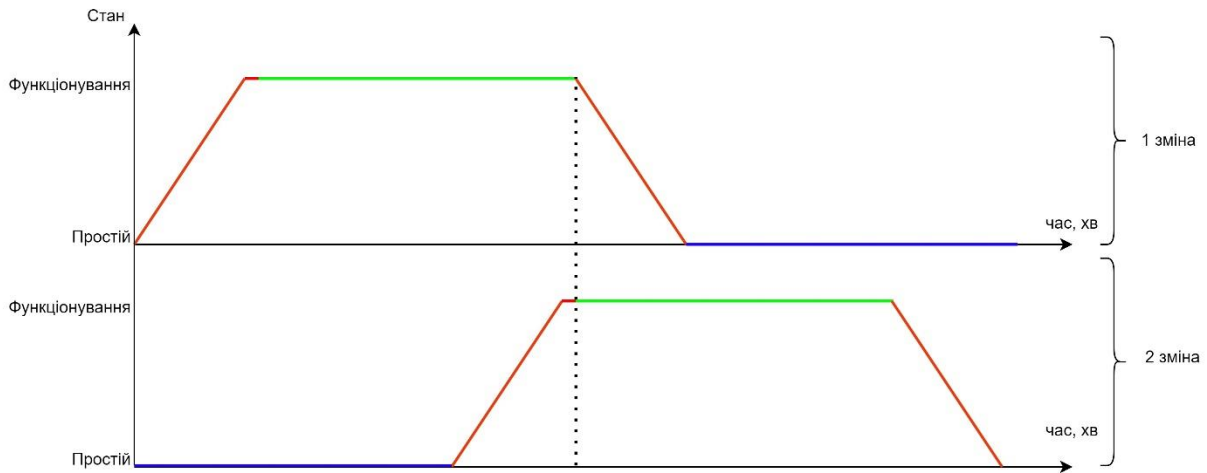


Рис. 7. Почергова робота двох змін для розгортання і забезпечення функціонування літаючої LiFi мережі

Моделювання процесу забезпечення заданого рівня надійності літаючої LiFi мережі

Подальшим кроком досліджень стало розроблення програмного засобу і моделювання з його використанням процесу забезпечення протягом заданого часу безперервної роботи мережі з ЙБР не нижче мінімально припустимого значення шляхом використання двох змін по 2 БПЛА у кожній.

Розглянемо випадок, коли кількість БПЛА у кожній зміні, яка відповідно до прийнятих раніше припущень дорівнює кількості точок на LiFi маршруті, складає 6 ($n = 6$ БПЛА). Нехай задано наступні вхідні дані: інтенсивність відмов БПЛА $\lambda = 0.0005$ 1/год; $P_0 = 1$; $P_{min} = 0.9875$.

Використовуючи інтегровану у програмний засіб бібліотеку Gnuplot були побудовані графіки зменшення ЙБР літаючої мережі для першої (рис. 8), другої (рис. 9) і двох (рис. 10) змін одночасно.

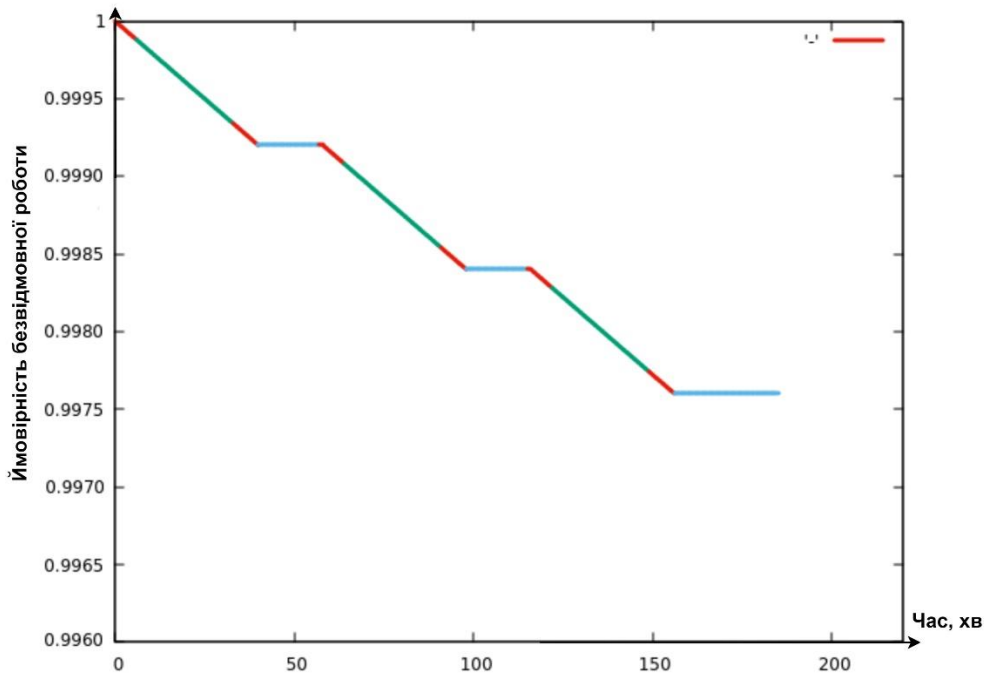


Рис. 8. Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи першої зміни від часу

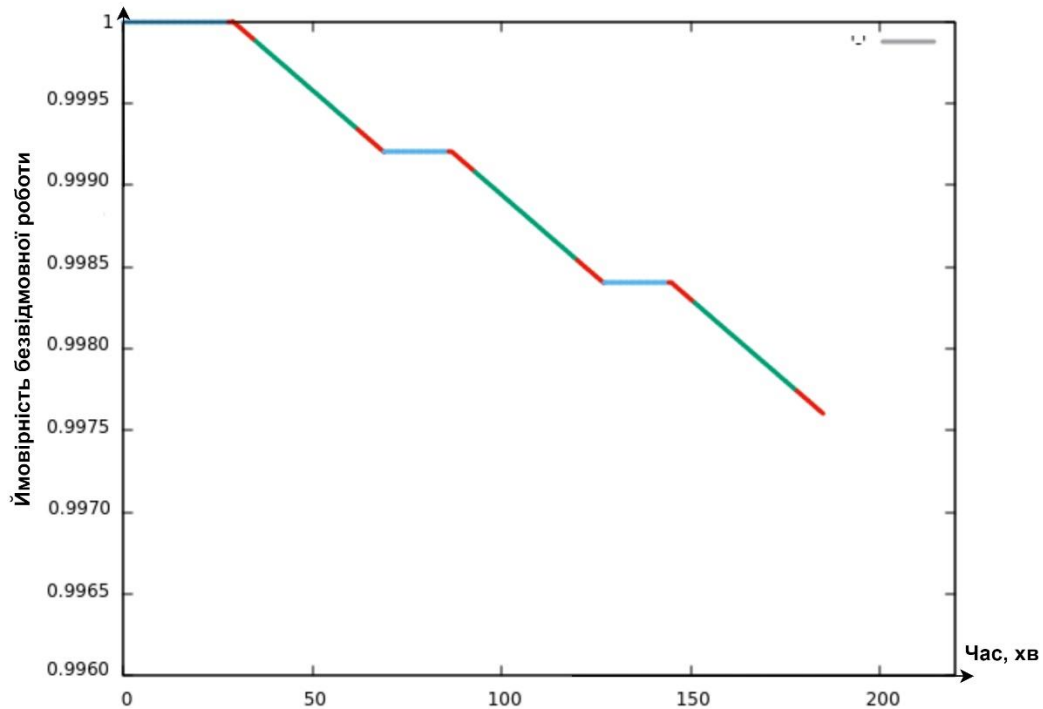


Рис. 9. Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи другої зміни від часу

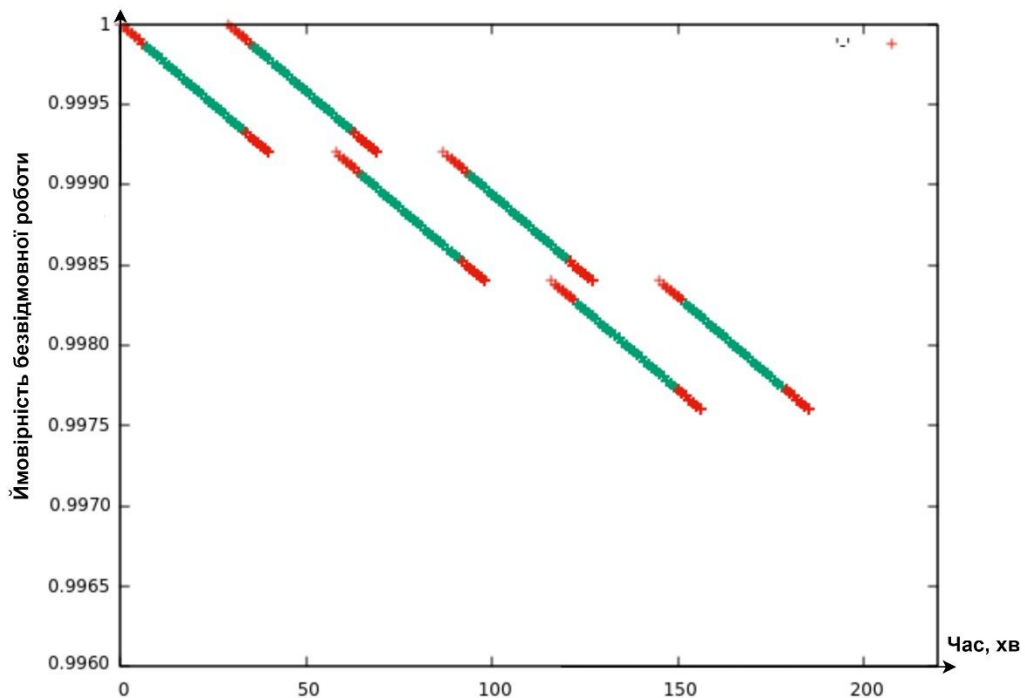


Рис. 10. Узагальнюючий графік залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу для обох змін

Кольорові відрізки графіків мають наступний зміст:

- відрізки червоного кольору демонструють зниження ЙБР як за час перельоту БПЛА до своїх точок на LiFi маршруті і налаштування літаючої LiFi мережі (верхні червоні відрізки), так і за час повернення БПЛА до депо (ніжні червоні відрізки);
- відрізки зеленого кольору ілюструють зниження ЙБР за час передачі даних від джерела до споживача даних;
- відрізки голубого кольору (тільки для рис. 8 і 9) показують ЙБР під час очікування зміною БПЛА на свій наступний цикл роботи.

Аналіз графіків, представлених на рис. 8-10, дозволяє зробити такі висновки:

- найбільше зниження ЙБР спостерігається під час передачі даних;
- під час очікування зміною БПЛА на свій наступний цикл роботи її ЙБР залишається незмінною;
- безперебійне функціонування літаючої LiFi мережі із необхідним рівнем надійності протягом 180 хвилин можна забезпечити двома змінами, кожна з яких складається із 6-ти БПЛА і виконує по три цикли роботи;
- останньою забезпечує функціонування літаючої LiFi мережі друга зміна у третьому циклі своєї роботи.

Висновки та напрямки подальших досліджень

Визначено, що для розгортання рою БПЛА із стаціонарного депо для утворення літаючої LiFi мережі у приміщенні з перешкодами можуть застосовуватись такі стратегії: стратегія 1а, яка передбачає рух кожного БПЛА з депо до першої точки LiFi маршруту і подальше розгортання мережі в межах нього; стратегія 1б, яка передбачає рух кожного БПЛА з депо одразу до точки призначення на LiFi маршруті; стратегія 1в, яка передбачає рух кожного БПЛА з депо до точки, максимально наближеної до середини LiFi маршруту, і подальше розгортання мережі в межах нього.

Показано, що цикл роботи однієї зміни рою БПЛА для розгортання і забезпечення функціонування LiFi мережі складається з наступних етапів: виліт з депо та підліт до визначених точок на прокладеному LiFi маршруті; налаштування мережі; передача даних; повернення до депо; очікування на наступний цикл роботи.

Надана графічна інтерпретація почергової роботи двох змін БПЛА для розгортання і забезпечення безперебійного функціонування літаючої LiFi мережі, відповідно до якої БПЛА наступної зміни прилітають і налаштовують утворюваними ними мережу до початку руху БПЛА поточної зміни до депо.

З використанням розробленого програмного засобу було розраховано, що безперебійне функціонування літаючої LiFi мережі із ЙБР не нижче $P_{min} = 0.99875$ протягом 180 хвилин можна забезпечити двома змінами, кожна з яких виконує по три цикли роботи і складається із 6 БПЛА з інтенсивністю відмов $\lambda = 0.0005$ 1/год.

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробленні стратегій розгортання літаючих LiFi мереж з використанням БПЛА-носія та методах забезпечення надійності таких мереж з використанням трьох і більше змін.

Література

1. Leichenko K., Fesenko H., Borges J., Kharchenko V. Search for the Shortest Route Considering Physical Obstacles: Method of Controlled Waterfall, Tool, and Application. *Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416479.
2. Kliushnikov I. M., Fesenko H. V., Kharchenko V. S. Scheduling UAV fleets for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2020. No. 1 (93). P. 29–36. DOI: 10.32620/reks.2020.1.03.
3. Sadiq B. O. A Feasibility Study of Using Light Fidelity With Multiple Unmanned Aerial Vehicles For Indoor Collaborative And Cooperative Networking. *arXiv:1707.08627*. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1707.08627>.
4. Jayashree T. R., Priyadarshini K., Sri Harini K. Li-Fi & Wi-Fi based drone for weather monitoring with data storage in cloud using IoT. *Advances in Parallel Computing*. 2021. Vol. 38. P. 434–438. DOI: 10.3233/APC210079.
5. Anwar D. N., Ahmad R., Bany Salameh H., Elgala H., Ayyash M. Performance analysis of neural network-based unified physical layer for indoor hybrid LiFi–WiFi flying networks. *Neural Computing and Applications*. 2023. Vol. 35, no. 34. P. 24179–24189. DOI: 10.1007/s00521-023-09017-7.
6. Ahmad R., Ayyash M., Salameh H. B., El-Khazali R., Elgala H. Indoor Flying Networks for 6G: Concepts, Challenges, Enabling Technologies, and Opportunities. *IEEE Communications Magazine*. 2023. Vol. 61, no. 10. P. 156–162. DOI: 10.1109/MCOM.009.2200559.
7. Qi X., Zhou Y., Liu L. Evaluation of the reliability of UAV swarm for ground combat missions. *Systems Engineering and Electronics*. 2023. Vol. 45, no. 9. P. 2971–2978. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2023.09.38.
8. Zaitseva E., Levashenko V., Mukhamediev R., Brinzei N., Kovalenko A., Symagulov A. Review of Reliability Assessment Methods of Drone Swarm (Fleet) and a New Importance Evaluation Based Method of Drone Swarm Structure Analysis. *Mathematics*. 2023. Vol. 11, no. 11, article no. 2551. P. 1–26. DOI: 10.3390/math11112551.

9. Zaitseva E., Levashenko V., Brinzei N., Kovalenko A., Yelis M., Gopejenko V., Mukhamediev R. Reliability Assessment of UAV Fleets. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023. Vol. 965. P. 335–357. DOI: 10.1007/978-3-031-24963-1_19.

10. Фесенко Г. В., Харченко В. С. Моделі надійності угруповань флотів БПЛА з ковзним резервуванням для моніторингу потенційно небезпечних об'єктів. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2019. No. 2 (90). P. 147–156. DOI: 10.32620/reks.2019.2.14.

References

1. Leichenko K., Fesenko H., Borges J., Kharchenko V. Search for the Shortest Route Considering Physical Obstacles: Method of Controlled Waterfall, Tool, and Application. *Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416479.

2. Kliushnikov I. M., Fesenko H. V., Kharchenko V. S. Scheduling UAV fleets for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2020. No. 1 (93). P. 29–36. DOI: 10.32620/reks.2020.1.03.

3. Sadiq B. O. A Feasibility Study of Using Light Fidelity With Multiple Unmanned Aerial Vehicles For Indoor Collaborative And Cooperative Networking. *arXiv:1707.08627*. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1707.08627>.

4. Jayashree T. R., Priyadarshini K., Sri Harini K. Li-Fi & Wi-Fi based drone for weather monitoring with data storage in cloud using IoT. *Advances in Parallel Computing*. 2021. Vol. 38. P. 434–438. DOI: 10.3233/APC210079.

5. Anwar D. N., Ahmad R., Bany Salameh H., Elgala H., Ayyash M. Performance analysis of neural network-based unified physical layer for indoor hybrid LiFi-WiFi flying networks. *Neural Computing and Applications*. 2023. Vol. 35, no. 34. P. 24179–24189. DOI: 10.1007/s00521-023-09017-7.

6. Ahmad R., Ayyash M., Salameh H. B., El-Khazali R., Eigala H. Indoor Flying Networks for 6G: Concepts, Challenges, Enabling Technologies, and Opportunities. *IEEE Communications Magazine*. 2023. Vol. 61, no. 10. P. 156–162. DOI: 10.1109/MCOM.009.2200559.

7. Qi X., Zhou Y., Liu L. Evaluation of the reliability of UAV swarm for ground combat missions. *Systems Engineering and Electronics*. 2023. Vol. 45, no. 9. P. 2971–2978. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2023.09.38.

8. Zaitseva E., Levashenko V., Mukhamediev R., Brinzei N., Kovalenko A., Symagulov A. Review of Reliability Assessment Methods of Drone Swarm (Fleet) and a New Importance Evaluation Based Method of Drone Swarm Structure Analysis. *Mathematics*. 2023. Vol. 11, no. 11, article no. 2551. P. 1–26. DOI: 10.3390/math11112551.

9. Zaitseva E., Levashenko V., Brinzei N., Kovalenko A., Yelis M., Gopejenko V., Mukhamediev R. Reliability Assessment of UAV Fleets. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023. Vol. 965. P. 335–357. DOI: 10.1007/978-3-031-24963-1_19.

10. Фесенко Г. В., Харченко В. С. Моделі надійності угруповань флотів БПЛА з ковзним резервуванням для моніторингу потенційно небезпечних об'єктів [Reliability models of UAV fleet groups with k-out-of-n redundancy for monitoring of potentially dangerous objects]. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2019. No. 2 (90). P. 147–156. DOI: 10.32620/reks.2019.2.14.