

## МЕТОД ДОСТУПУ ДО РАДІОКАНАЛУ ВУЗЛАМИ БЕЗПРОВОДНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ЗБОРІ ДАНИХ МОНІТОРІГУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

Запропоновано метод каналного доступу для збору даних зі статичних вузлів бездротової сенсорної мережі, що враховує переміщення ТА. На початковому періоді (ініціалізація обміну) між вузлами і ТА (для виключення колізій) кожен вузол децентралізовано визначає пріоритет свого запиту на передачу: велика відстань між вузлом і ТА - більший пріоритет. На другому етапі (обміну даними моніторингу) централізовано ТА розраховує графік передач, що дозволяє здійснити адаптацію швидкості переміщення ТА (часу радіо зв'язності) достатньою для часу передачі даних. Маршрут і висота переміщення ТА планується з урахуванням рівня енергії батареї вузлів для збільшення тривалості їх життя.

**Романюк А.В. Метод доступа к радиоканалу узлами беспроводной сенсорной сети при сборе данных мониторинга телекоммуникационными аэроплатформами.** Предложен метод каналного доступа для сбора данных со статических узлов беспроводной сенсорной сети, учитывающий перемещение ТА. На начальном периоде (инициализация обмена) между узлами и ТА (для исключения коллизий) каждый узел децентрализованно определяет приоритет своего запроса на передачу: большое расстояние между узлом и ТА – больший приоритет. На втором этапе (обмена данными мониторинга) централизованно ТА рассчитывает график передач, позволяющий осуществить адаптацию скорости перемещения ТА (времени радиосвязности) достаточной для времени передачи данных. Маршрут и высота перемещения ТА планируется с учетом уровня энергии батареи узлов для увеличения продолжительности их жизни.

**A. Romaniuk MAC-protocol for data collection in wireless sensors networks with UAV.** MAC-protocol for data collection of monitoring data UAV. A channel access method for collecting data from static nodes of a wireless sensor network is proposed, taking into account the movement of UAVs. In the initial period (initialization of exchange) between nodes and UAV (to avoid collisions), each node decentralized determines the priority of its transfer request: the large distance between the node and UAV is a higher priority. At the second stage (monitoring data exchange), the UAV centrally calculates the transmission schedule, which allows the adaptation of the UAV transfer speed (radio connectivity time) sufficient for data transmission time. The route and height of the UAV movement is planned taking into account the energy level of the battery nodes to increase their lifespan.

**Ключові слова:** безпроводні сенсорні мережі, MAC-протокол, збір даних моніторингу.

**Постановка завдання.** В останні роки в усьому світі все більше застосування знаходять безпроводні сенсорні мережі (БСМ) – розподілені, самоорганізуючі мережі, що складаються з множини (сотні, тисячі) вузлів (датчиків, сенсорів), об'єднаних між собою радіоканалами та здійснюють моніторинг параметрів зовнішнього середовища або об'єктів спостереження. Область покриття подібної мережі може становити від декількох метрів до десятків кілометрів за рахунок побудови зв'язної мережі та здатності маршрутизації повідомлень від одного вузла до іншого. З'явилося нове поняття „Інтернет речей” [1].

Застосування телекомунікаційних аероплатформ (ТА) для збору даних з вузлів безпроводних сенсорних мереж (БСС) є актуальним в різних сферах діяльності людини: промисловості, сільському господарстві, в надзвичайних подіях тощо. Однак існуючі протоколи каналного рівня Bluetooth (802.15.1), ZigBee (802.15.4), Wi-Fi (IEEE 802.11) [2] не враховують мобільність ТА. Перспективні MAC-протоколи повинні гарантувати низький коефіцієнт втрат пакетів, низькі енерговитрати та забезпечити високу швидкість передачі даних. Тому завдання розробки ефективних протоколів каналного рівня для систем БСС-ТА є актуальним.

**Аналіз останніх публікацій.** Попередні дослідження в [3 – 5] виявили, що існуючі MAC-протоколи, які запропоновані для безпроводних сенсорних мереж є неефективними для систем БСС-ТА. Наприклад, протоколи випадкового доступу, по-перше, вносять значну затримку в передачі даних між вузлами і ТА (ця затримка стає більш значною при високій щільності вузлів та є причиною значної кількості помилок у повідомленнях). По-друге, необхідно вирішувати проблему прихованого терміналу.

В роботі [3] запропонований протокол випадкового доступу з сигналом зайнятості, якій надає ТА при обміні даними між ним та вузлом. Пріоритет початку передачі надається вузлам, які розташовані на найбільшій відстані між вузлом і ТА. Однак початкова процедура взаємодії між ТА і вузлами кластеру має випадковий характер типу ALOHA, тому має значні витрати пакетів при збільшенні щільності вузлів. Не враховується наявна енергія вузла.

В роботах [4, 5] запропонований протокол пріоритетного доступу PFSC-MAC вузлам в радіоканалі БСС-ТА, які знаходяться в певних зонах та відрізняються певною відстанню між вузлами. Однак ця умова призводить до того, що лише невелика частина активних вузлів дозволяє передавати свої дані одночасно. Отже, період часу для всіх передач вузлів значний. Можливі втрати передач вузлів із-за колізій.

Основна ідея роботи [5] полягає також в розподілі активних вузлів на декілька груп, на кожен з яких виділений часовий сегмент (TDMA), однак при невідомій кількості вузлів в групі не буде забезпечена гарантована якість обслуговування. Розподіл на групи здійснюється за рівнем сигналу прийому. Для уникнення колізій запропоновано використовувати кодовий поділ каналів (CDMA), що також додає додаткових складностей для реалізації в порівнянні з часовим поділом (TDMA).

Таким чином, запропоновані методи канального рівня не забезпечують гарантії якості обслуговування вузлів БСМ. Крім цього, ці протоколи не мають механізмів зменшення витрат енергії вузлами мережі.

**Метою статті** є вдосконалення існуючих протоколів канального рівня системи БСС-ТА для забезпечення гарантії передачі даних з сенсорних вузлів до ТА при зменшенні витрат енергії їх батарей.

**Виклад основного матеріалу.** В порівнянні з технологіями Bluetooth (802.15.1) та ZigBee (802.15.4), використання Wi-Fi, переважно із-за більшої швидкості передачі (в два і три рази відповідно), більшої дальності передачі, меншої складності протоколу MAC-рівня, меншого значення витрат енергії на обсяг переданих даних (mJ/Мб) [2]).

В Wi-Fi вже визначений механізм пріоритету передачі в протоколі 802.11e [6], але ж він не враховує параметр мобільності ТА. В нашому випадку пріоритет передачі вузла повинен бути пов'язаний з траєкторією переміщення ТА, а не тільки з кількістю повідомлень, які бажає передати вузол. Крім цього, механізм передачі повинен враховувати факт наявності ТА в зоні радіозв'язності (повинна зберігатися енергія), так як в класичному сценарії 802.11, якщо отримувач не знаходиться в межах дії передавача, пакети скидаються (енергія витрачається даром).

Управління послідовністю доступу вузлів до каналу при використанні протоколу IEEE 802.11 DCF здійснюється за рахунок динамічної зміни розміру вікна змагань  $cw_{min} < cw < cw_{max}$  ( $cw_{min}=32$ ,  $cw_{max}=1024$ ) [6, 7]. Після зайнятості середній вузол очікує період DIFS і вступає в період змагань. Час відстрочки  $t_{вп}$  передачі (backoff\_interval) вибирається в межах вікна змагань, вимірюється в слотах і визначається виразом

$$t_{вп} = \text{rand}[0, 2^r cw_{min}] t_{сл}, 0 \leq r \leq m, \quad (1)$$

де  $t_{сл}$  – тривалість слоту вікна змагань,  $\text{rand}$  – випадкове число, яке вибране з рівною ймовірністю в інтервалі  $[0, cw_{min} \cdot 2^r]$ ,  $[x]$  – найбільш ціле, яке менше або дорівнює  $x$ ,  $r$  і  $m$  – пріоритет передач,  $0 \leq r \leq m$  (рис. 1). Тому на початковому етапі обміну між вузлами і ТА пропонується час початку передачі вузлів зробити залежними від відстані між вузлом і ТА  $r=f(d)$ ,  $d$  – відстань між вузлом і ТА: більша відстань – більший пріоритет передачі.

**Модель мережі.** Нехай ТА виконує роль головного вузла кластерів мережі та виконує тимчасову кластеризацію сенсорних вузлів (рис. 2), які випадково розміщені на території моніторингу. ТА рухається за заданою траєкторією об'їзду території.

Можливо запропонувати різні варіанти руху ТА в кластері при виконанні завдання збору даних з вузлів:

з постійною швидкістю без гарантії збору даних зі всіх вузлів в кластері – ймовірність обслуговування буде залежити від розташування вузлів, швидкості передачі в каналі та протоколу доступу);

зі змінною швидкістю з гарантією забезпечення якості обслуговування – ТА повинен адаптувати свою швидкість польоту для збору даних зі всіх вузлів під час руху в кластері.

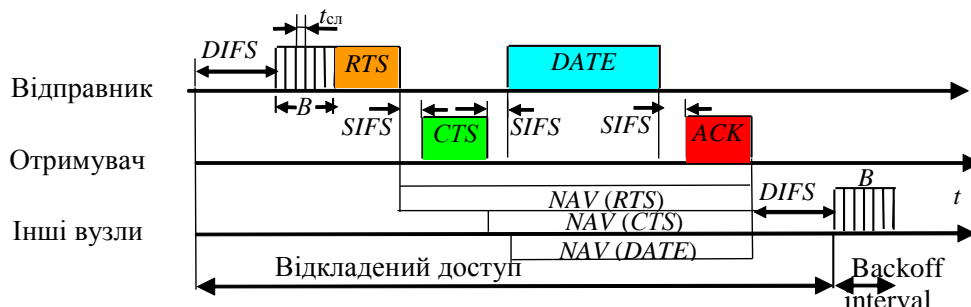


Рис. 1. Функціонування протоколу IEEE 802.11 в режимі DCF

Вибір швидкості польоту залежить від необхідного часу збору даних та обмежується технічними можливостями польоту летального апарату, відстанню між вузлами, щільністю розташування вузлів, прийнятими протоколами фізичного та канального рівнів моделі OSI.

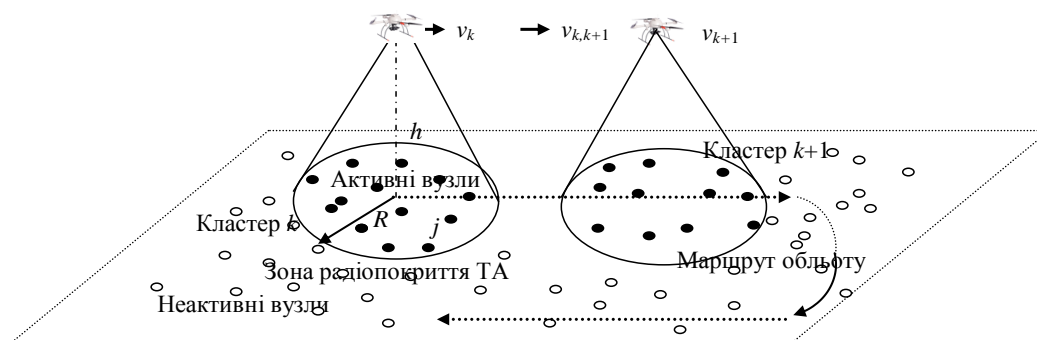


Рис. 2. Приклад збору даних при динамічній кластеризації мережі

Час збору даних  $t_{35k}$  в  $k$ -му тимчасовому кластері буде визначатися кількістю вузлів, швидкістю передачі в каналі  $s_j$  та обсягом даних передачі  $V_{\text{дм}j}$  між ТА з визначеними  $j$ -ми вузлами

$$t_{36k} = \sum_{j=1}^{J_k} (jV_{\text{DM}j} / s_j).$$

Загальний час збору в мережі буде визначатися сумою часів збору в кластерах та часів підльоту до них при умові прийнятої якості обслуговування всіх вузлів в кластерах

$$T_{36} = \sum_{k=1}^K t_{c6k} + \sum_{k=1}^{K-1} l_{k,k+1} / v_{k,k+1} ,$$

де  $l_k$ ,  $v_{k,k+1}$  – відстань та швидкість між  $k$  та  $k+1$  кластерами.

При визначеній швидкості переміщення ТА можна визначити час знаходження конкретного вузла в зоні покриття та розрахувати границю області в якій будуть обслуговані вузли, знаходячись в якій вузол буде обслугований при заданій швидкості руху ТА. Очевидно, що мінімальний час обслуговування  $t_{36} \rightarrow 0$  для вузла  $B$  та максимальний для вузла  $A$  (рис. 2).

Висота польоту  $h$  визначає розмір площі покриття. Збільшення висоти призводить до збільшення: витрати палива (енергії) у ТА, площі покриття, числа вузлів, що потрапляють в

зону радіозв'язку і здатних передати дані моніторингу, витрат енергії вузлів і ТА на процес передачі через збільшення відстані. І навпаки. Тому висота польоту повинна бути оптимізована з урахуванням цільових функцій управління мережею і обмежень на її ресурси, директивних вимог [8]. При цьому висота польоту може бути обмежена максимальною дальністю радіозв'язності.

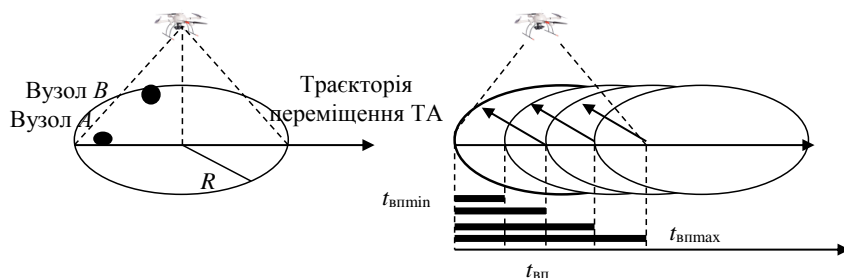


Рис. 3. Пояснення поняття зони обслуговування та розміру sw.

Крім цього, наземні вузли можуть знаходитися в зоні радіозв'язку з ТА лише обмежений час, тому за цей час необхідно встигнути передати дані моніторингу  $V_{\text{дм}}$  від множини вузлів, що знаходяться в зоні радіозв'язку, до ТА. За умови того, що час прийому-передачі інформації від вузла до ТА обмежена часом його прольоту  $t_{\text{пр}} = l/v$ , де  $l$  – довжина маршруту переміщення ТА в межах радіозв'язку з вузлом,  $v$  – швидкість польоту (рис. 4).

Максимальний час прольоту (при прямолінійному переміщенні) залежить від висоти польоту, максимальної дальності радіозв'язку  $d_{\text{max}}$  між вузлом  $s$  ТА, швидкості передачі в радіоканалі і визначається формулою

$$t_{\text{пр}j} = (2\sqrt{d_{\text{max}}^2 - h^2} \cos \alpha) / v,$$

де  $d_{\text{max}}$  – максимальна дальність радіозв'язку при забезпеченні певної швидкості передачі. За час прольоту вузол повинен встигнути передати до ТА дані.

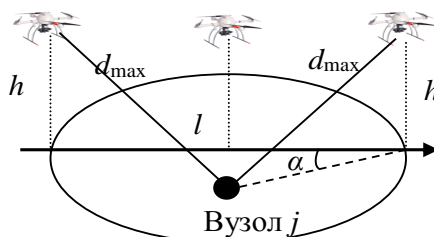


Рис. 4. Пояснення розрахунку часу обльоту

Тобто час прольоту ТА  $j$ -го вузла  $t_{\text{пр}j}$  має бути більшим або дорівнювати часу передачі  $t_{\text{пер}j}$  від вузла до ТА. Час передачі  $t_{\text{пер}j}$  дорівнює співвідношенню швидкості передачі  $s$  (залежить від відстані  $d_{j\text{ТА}}$  між вузлом та ТА і протоколом каналного рівня  $\Pi_{\text{ку}}$ ) до обсягу переданих даних  $V_{\text{дм}j}$ .

$$t_{\text{пр}j} = l/v = 2\sqrt{d_{\text{max}}^2 - h^2} \cos \alpha / v \geq t_{\text{пер}j} = V_{\text{дм}j} / s(d_{j\text{ТА}}, \Pi_{\text{ку}}) \quad \text{або} \quad (2)$$

$$v \leq 2\sqrt{d_{\text{max}}^2 - h^2} \cos \alpha \cdot s(d_{j\text{ТА}}, \Pi_{\text{ку}}) / V_{\text{дм}j}, \quad (3)$$

$$0 < d \leq d_{\text{max}}, \quad 0 \leq v \leq v_{\text{max}}, \quad V_{\text{дм}j} \leq V_{\text{дмmax}}.$$

Тобто ТА після входження в радіозв'язок з вузлом вибирає швидкість переміщення і висоту для забезпечення необхідного часу передачі  $t_{\text{пер}}$  між ними.

Час передачі  $t_{\text{пер}j}$  складається з часів:  $t_{\text{пер}j} = t_{\text{всзв}j} + t_{\text{оч}j} + t_{\text{бпер}j}$ , встановлення зв'язку  $t_{\text{всзв}j}$  (обмін відповідними службовими повідомленнями), очікування передачі  $t_{\text{оч}j}$  (згідно протоколу множинного доступу) та безпосередньо передача даних моніторингу  $t_{\text{бпер}j}$  (залежить від відстані та протоколу каналного та фізичного рівнів).

Тому висота польоту повинна бути оптимізована з урахуванням цільових функцій управління мережею і обмежень на її ресурси, директивних вимог [8]. При цьому швидкість передачі також залежить від відстані (табл. 1). Тому час обміну даними не повинен перевищувати час існування радіоканалу при польоті ТА над цим вузлом.

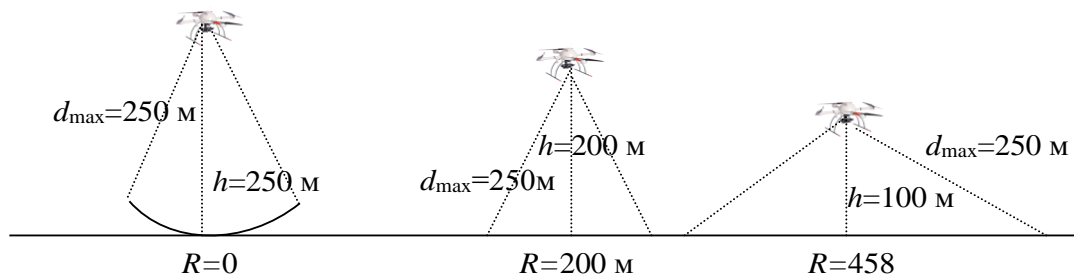
В табл. 1 наведено залежності швидкості передачі від дальності при використанні протоколу IEEE 802.11g [5].

Таблиця 1

*Залежність швидкості передачі від відстані для стандарту IEEE 802.11g при  $BER \leq 10^{-5}$*

Швидкість передачі $s$ , Мб/с	Відстань, м	Швидкість передачі $s$ , Мб/с	Відстань, м
Для коефіцієнта загасання $\alpha=2.25$ (між вузлом і ТА)			
54	54	12	204
48	69	9	219
36	114	6	261
24	146	2	328
18	189	1	$d_{\max}$
Для коефіцієнта загасання $\alpha=3.0$ (між вузлом і ТА)			
54	20	12	54
48	24	9	57
36	35	6	65
24	42	2	77
18	51	1	$d_{\max}$

Збільшення дальності радіозв'язку призводить до збільшення витрати енергії на передачу. Крім цього, граничне збільшення дальності радіозв'язку обмежене малою потужністю передавачів вузлів. Приклад різних значень зон для радіозв'язку  $R$  від висоти польоту  $h$  ТА при дальності передачі  $d = 250$  м (ТА та сенсорних вузлів) показані на рис. 4 [7].

Рис. 4. Залежності розміру зони радіозв'язності  $R$  від висоти польоту ТА при  $d=250$ .

У стандарті IEEE 802.11 дані можуть передаватися з різною швидкістю, які тісно пов'язані з параметрами каналу, такими як відношення сигнал/шум ( $SNR$ ) та смуга пропускання ( $B$ ). Припускаючи, що тільки один активний вузол передає дані в даний момент часу і не має значних джерел зовнішніх перешкод, миттєве значення сигнал/шум  $SNR_{ij}$  між двома вузлами  $i$  і  $j$  в радіоканалі прямої видимості (LOS) дорівнює [9]:

$$SNR = (P_t G_t G_r \lambda^2) / ((4\pi)^2 d^4 N), \quad (4)$$

де  $N = kTB N_f$  – шум,  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана,  $T = 300$  К – температура навколишнього середовища,  $B$  – ширина смуги пропускання,  $N_f$  – рівень шуму в

приймальному вузлі,  $P_t$  – потужність передачі на передавальному вузлі,  $G_t$  і  $G_r$  – коефіцієнти посилення на передавальному і приймальному вузлах відповідно.

У початковій фазі обслуговування вузлів, коли ТА здійснює пошук будь-якого вузла в кластері, необхідно використовувати всеспрямовані антени. Крім того, довжина хвилі  $\lambda$  ( $\lambda = c/f$ , де  $c = 3 \times 10^8$  км/с, а  $f$  – несуча частота),  $d$  – відстань між двома вузлами, а  $\alpha$  – коефіцієнт загасання. В [9] показано, що задля забезпечення зв'язку між повітряними і наземними вузлами  $\alpha = 2,25$ . У той же час між наземними вузлами, зазвичай, значення  $\alpha$  дорівнює 3 або 4.

Використовуючи рівняння (2) зі стандартними умовами роботи для протоколу IEEE 802.11g допустимі швидкості передачі варіюються від 54 Мбіт/с до 1 Мбіт/с в залежності від наступних умов: тип зв'язку (між двома наземними вузлами або між вузлом і ТА) і відстань між ними. Припускаючи, що завмирання каналу не змінюється під час передачі пакета, і відстань між будь-якою парою вузлів, а також між кожним вузлом і ТА відомо в момент передачі, відповідно можуть бути визначені відповідні швидкості передачі.

В той же час від висоти польоту та дальності радіозв'язку залежить енергія, яка витрачається на передачу та швидкість передачі. Збільшення відстані між вузлом і ТА призведе до збільшення витрат енергії на передачу. Крім цього, граничне збільшення дальності радіозв'язності обмежено малою потужністю передавачів вузлів [7].

Таблиця 2

*Залежність витрат енергії від відстані*

Вихідна потужність (dBm)	Вихідна потужність (mW)	Споживання (mA)	Дальність передачі (м)
0	1	17.4	250
-1	0.791	16.5	228
-3	0.501	15.2	189
-5	0.316	13.9	158
-7	0.199	12.5	131
-10	0.1	11.2	100
-15	0.0316	9.9	63
-25	0.00316	8.5	25

Задачу обслуговування множини вузлів доцільно розглянути для випадків: координати вузлів відомі ТА або координати розміщення вузлів невідомі. В першому випадку на вхід ТА поступає детермінований потік заявок. Оптимізація зводиться до вибору правил розкладу обслуговування вузлів. В другому випадку на вхід прибору обслуговування СМО (фактично ТА) поступає випадковий потік заявок. Зрозуміло, що це можливо тільки в тому випадку, якщо обслуговування почати з останнього, найближчого до лівої межі зони обслуговування, вузла. Якщо почати обслуговування з першого (крайнього правого) вузла, то число обслужених вузлів буде меншим, так як частина з них за час обслуговування першого і наступних вузлів покине зону обслуговування. Таким чином, кількість обслужених вузлів залежить від часу їх перебування в області, тобто від їхнього енергетичного стану та черговості обслуговування.

Для виконання завдання потрібно визначити таку черговість обслуговування вузлів, при якій було б обслужено їх максимальну кількість. Це завдання можна вирішити, звівши її до задачі про призначення. Її рішення вимагає час  $O(n^3)$ , що в реальній ситуації (для реального числа вузлів у зоні обслуговування) цілком допустимо.

Час збору даних, в основному, визначається часом передачі і швидкістю бездротової передачі, яка залежить від відстані і потужності передачі. Тому необхідно управляти траєкторією і швидкістю переміщення ТА, визначаючи інтервали часів обміну і потужності

передач для кожного вузла. Це важливо з позицій економії енергії вузлів – чим ближче ТА підлітає до вузла, тим більше даних може бути передано тією же кількістю енергії передачі. При повільному переміщенні ТА вузлу надано більше часу на обмін даними. Зауважимо, що будь-яке переміщення і повороти ТА викликають споживання ним енергії. Тим часом, вузол може почекати, поки ТА наблизиться до нього, щоб почати передачу, тим самим заощаджуючи енергію. Однак, при переміщенні ТА наблизатиметься і до інших вузлів. Це призводить до того, що вузли будуть конкурувати за тимчасові інтервали для доставки даних. Тоді вузли з великим ресурсом енергії мають перевагу, так як вони можуть передавати дані з більшої відстані, в той час як вузли з малим запасом енергії повинні чекати, поки ТА виявиться поруч. Це вимагає додаткового планування розкладу передач вузлів-ТА, що враховують час передачі (швидкість польоту, відстань, протокол доступу) і енергію, необхідну на її доставку для оптимізації різних цільових функцій управління.

Припустимо, що сенсорні вузли і ТА оснащені системою позиціонування. ТА, сенсорні вузли мають МАС-адреси. Алгоритм функціонування складається з трьох основних етапів: ініціалізація, визначення пріоритетів і передача запитів, обмін даними моніторингу.

#### *1. Ініціалізація обміну.*

ТА періодично надсилається службове повідомлення про свою присутність (ПСП), яке включає наступну інформацію: МАС-адреса, координати положення ТА, швидкість та висота польоту, напрямок переміщення, початкова та кінцева точка польоту.

Вузли, які знаходяться в зоні радіозв'язності з ТА, приймають ПСП та переходять в активний режим (за замовчуванням сенсорні вузли знаходяться в режимі очікування з метою збереження енергії за рахунок зменшення потужності споживання). Якщо вузол немає даних для відправки, він повертається в режим очікування, інакше він розраховує пріоритет передачі.

#### *2. Визначення пріоритетів та передача запитів (децентралізовано вузлами).*

Якщо вузол прийняв ПСП, він стає активним та розраховує час початку передачі даних за формулою (1) та передає повідомлення про свій стан (ПСС) з інформацією про свої координати, енергію батарей та об'єм даних моніторингу. За аналогією з децентралізованим режимом роботи протоколу IEEE 802.11DCF вводиться розіграш між вузлами інтервалу виходу на передачу запиту ( $t_{вп}$ ) залежно від відстані між вузлом і траєкторією переміщення ТА (рис. 2) (найбільша відстань від маршруту польоту більший пріоритет).

#### *3. Планування ТА порядку передач вузлами кластеру (централізовано).*

На основі прийнятих ПСС, для гарантування вимог процесу збору даних, ТА планує графік передач вузлів у кластері (послідовність часових відрізків  $\Delta t_{полі} = t_{нполі} - t_{кполі}$  для кожного  $i$ -го вузла кластеру) та послідовно передає повідомлення кожному вузлу про дозвіл на передачу (ПДП) даних моніторингу вузлам. Графік передач складається відповідно з наступних правил, які можуть змінити швидкість, висоту і маршрут переміщення ТА.

Спочатку швидкість ТА постійна  $v = \text{const}$ , висота польоту  $h = \text{const}$ .

а) Якщо  $t_{пері} \leq \Delta t_{полі}$ , для  $\forall i \in C$  – час передач всіх вузлів кластеру  $C$  менший або рівний часу польоту над вузлом (вираз (2)), тоді  $v$  не змінювати (або збільшити відповідно виразу (3) для мінімізації часу збору даних).

Для економії енергії, батареї вузлів планували початок та кінець інтервалу обміну на найближчій відстані між вузлом та ТА (рис. 5).

б) Якщо  $t_{пері} > \Delta t_{полі}$  – час передач вузла більший часу польоту над вузлом. Тоді обрахувати та реалізувати необхідну швидкість польоту для задоволення виразу (3).

в) Надавати пріоритет в обслуговуванні в кластері  $C$  вузлам з мінімальною енергією батарей – на найближчій відстані між вузлом та маршрутом переміщення ТА планувати  $\Delta t_{полі}$ , тобто  $i \succ j \succ a$  якщо  $e_i < e_j < e_a$ ,  $e_i, e_j, e_a \in C$  (для зменшення витрат енергії вузлів на передачу або перерозподіл витрат між вузлами при передачі на ТА даних моніторингу).

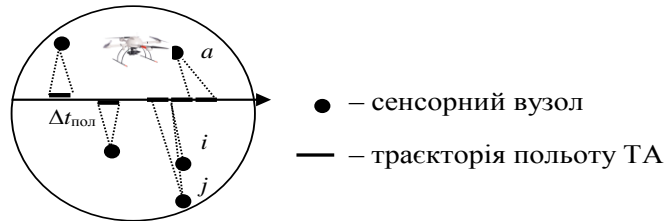


Рис. 5. Визначення інтервалу передач в залежності від відстані та наявної енергії вузлів

г) змінити маршрут та/або висоту польоту для задоволення вузлів з критичною енергією та починає передавати ПСС зі зміненими значеннями полів ПСС.

#### 4. Обмін даними (за запитом).

Коли вузол отримує повідомлення ПДП, він перевіряє MAC-адресу поля зі своєю MAC-адресою. Якщо адреса відповідає його MAC-адресі, він починає надсилати дані, якщо ні – він відкладає передачу. При прийомі визначеної кількості пакетів, ТА відправляє квитанцію вузлу та згідно визначеного графіка надсилає ПДП наступному за графіком вузлу кластера.

Проведено моделювання процесу обміну в середовищі MATLAB показало ефективність запропонованого методу. По-перше, гарантовано збір даних зі всіх вузлів сенсорної мережі. По-друге, в середньому на 10 – 15 % збільшений час функціонування сенсорної мережі при певному збільшенні часу збору даних у мережі.

В подальшому пропонується розглянути крос-протокол для об'єднання каналного та мережевого рівня при зборі даних ТА при динамічній кластеризації мережі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. „Интернет вещей”: Беспроводные сенсорные сети. Белая книга. Режим доступа: [https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/IEC\\_WP\\_Internet\\_of\\_Things\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_Ru\\_LR.pdf](https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/IEC_WP_Internet_of_Things_Wireless_Sensor_Networks_Ru_LR.pdf).
2. J-S. Lee, Y-W Su, C-C Shen, „A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Nov. 2007. doi:10.1109/IECON.2007.4460126.
3. A.-V. Vladuta, M. L. Pura, I. Bica MAC Protocol for Data Gathering in Wireless Sensor Networks with the Aid of Unmanned Aerial Vehicles // Digital Object Identifier 10.4316/AECE.2016.02007.
4. Dac-Tu Ho, Jingyu Park, Shigeru Shimamoto Novel multiple access scheme for wireless sensor network employing unmanned aerial vehicle // Conference Paper, November 2010, DOI: 10.1109/DASC.2010.5655304.
5. Dac-Tu Ho, Shigeru Shimamoto Highly Reliable Communication Protocol for WSN-UAV System Employing TDMA and PFS Scheme, <https://www.researchgate.net/publication/241637347>.
6. The 802.11g standard. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11g-2003.pdf>
7. The 802.11a/g OFDM PHY. [Online]. Available: <http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004slides/topic15.pdf>.
8. Романюк А.В. Задачі управління збором даних моніторингу БпЛА в безпроводових сенсорних мережах /А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІПІ. – 2018. – № 2. – С. 103 – 112.
9. A. Goldsmith, „Wireless communications,” Cambridge university press. 2005. <http://ee.sharif.edu/~pr.wireless.comm/references/Goldsmith.pdf>.