

## МОДЕЛЬ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ АЕРОПЛАТФОРМИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВУЗЛІВ ЗОНИ ПОКРИТТЯ

*Запропоновано аналітичну модель розрахунку пропускної здатності наземних вузлів, що обслуговуються телекомунікаційною аероплатформою. Описано ітераційний алгоритм пошуку місця розташування в просторі телекомунікаційної аероплатформи, яке забезпечує максимізацію пропускної здатності вузлів зони покриття.*

*Степаненко Е.А. Модель позиционирования телекоммуникационной аэроплатформы для оптимизации пропускной способности узлов зоны ее покрытия. Предложена аналитическая модель расчета пропускной способности наземных узлов, обслуживаемых телекоммуникационной аэроплатформой. Описан итерационный алгоритм поиска местоположения в пространстве телекоммуникационной аэроплатформы, обеспечивающее максимизацию пропускной способности узлов зоны покрытия.*

*E. Stepanenko Positioning model of telecommunication aeroplatform to optimize the capacity of nodes in its coverage area. An analytical model is proposed for calculating the capacity of ground nodes serviced by the telecommunications aerospace platform. An iterative algorithm for finding a location in the space of a telecommunications aeroplatform, which maximizes the throughput of nodes in the coverage area, is described.*

*Ключові слова:* наземно-повітряна мережа, пропускна здатність, телекомунікаційна аероплатформа.

**Постановка завдання в загальному вигляді.** Зараз проводиться багато досліджень із застосування безпілотних літальних апаратів в якості телекомунікаційних аероплатформ, здатних на вимогу надавати бездротовий зв'язок у потрібні райони [1 – 6]. Завдяки мобільності, оперативності, адаптації швидкості і висоти польоту, телекомунікаційні аероплатформи (ТА) можуть ефективно доповнювати існуючі наземні мережі зв'язку.

Сукупність ТА будуть створювати повітряні мережі типу FANET (Flying Ad-Hoc Networks), які призначені для виконання наступних основних завдань [1, 2]: забезпечення зв'язності між незв'язними сегментами наземної мережі, швидка організація резервної (додаткової) мережі (каналів) радіозв'язку з наземними абонентами; збільшення зони покриття в порівнянні з наземними ретрансляторами; покращення показників якості інформаційного обміну (пропускної здатності, часу передачі), тощо. Застосування ТА дозволяє будувати нову наземно-повітряну архітектуру систем радіозв'язку цивільного і військового призначення, однак потребує вирішення системою управління мережею множини задач планування і оперативного управління: тривимірного розгортання ТА; розрахунку часу і траєкторії польоту; управління топологією, забезпечення заданої якості інформаційного обміну тощо. Одним із завдань управління наземно-повітряною мережею є оптимізація пропускної здатності між наземними вузлами і ТА. Відомо, що швидкість передачі даних у сучасних широкосмугових радіоканалах, крім інших факторів, суттєво залежить від відстані між вузлами. Гранична пропускна здатність ТА обмежена протоколом каналного рівня. Тому виникає завдання для системи управління мережею (системи управління ТА) – знайти положення ТА в зоні обслуговування своїх вузлів, яке забезпечить максимум пропускної здатності їх радіоканалів при використанні певного протоколу каналного рівня.

### **Аналіз останніх публікацій і напрямки вирішення завдання**

На сьогоднішній час значна кількість публікацій присвячена дослідженню процесів управління наземно-повітряними мережами.

В роботі [3] досліджуються моделі оцінки пропускної здатності ТА випадкових протоколів доступу каналного рівня в мережах MANET. У [4] запропонована методика пошуку зв'язної топології, але не розглянута можливість корегування положення ТА для максимізації пропускної здатності в зоні обслуговування ТА. В [5] запропонований алгоритм оптимізації пропускної здатності в зоні обслуговування ТА шляхом визначення його положення тільки між двома наземними вузлами. В [6] розглядається вплив ТА на пропускну спроможність наземної мережі при використанні протоколу IEEE 802.11 в умовах використання однієї смуги частот як ТА, так і наземними вузлами (НВ). Однак в даних

роботах не розглядалось завдання знаходження положення ТА з метою оптимізації пропускної здатності всіх вузлів зони її обслуговування.

**Мета статті:** розробити модель знаходження положення ТА у просторі для максимізації сумарної пропускної здатності наземних вузлів, які вона обслуговує.

#### Виклад основного матеріалу

За результатами роботи алгоритму кластеризації [4] мережа наземних вузлів буде розбита на множину зон покриття наземних вузлів, які обслуговуються відповідними телекомунікаційними аероплатформами. Наступним завданням є оптимізація пропускної здатності наземних вузлів зони обслуговування ТА. Пропускна здатність є важливим показником ефективності функціонування мережі. Вона визначається як фактична швидкість передачі інформації і зазвичай вимірюється в бітах на секунду. Формула Шенона дає теоретичний максимум  $s = \Delta F \log_2(1 + SNR)$ , де  $s$  – пропускна здатність в бітах на секунду,  $SNR = P_c/N$  – співвідношення сигнал/шум в каналі,  $P_c$  – потужність сигналу на вході приймача в каналі,  $N$  – потужність шуму,  $\Delta F$  – ширина смуги каналу в герцах.

Потужність сигналу на вході приймача в загальному випадку у вільному просторі визначається [7]

$$P_c = (P_t G_t G_r \lambda^2) / ((4\pi)^2 d^\alpha),$$

де  $P_t$  – потужність передачі передавального вузла,  $G_t$  і  $G_r$  – коефіцієнти посилення на передавальному і приймальному вузлах відповідно,  $\lambda$  – довжина хвилі ( $\lambda = c/f$ , де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с,

$f$  – несуча частота),  $d$  – відстань між двома вузлами, а  $\alpha = 2$  – коефіцієнт загасання.

Тоді швидкість передачі на фізичному рівні дорівнює

$$s = \Delta F \log_2 \left( 1 + \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{N (4\pi d)^2} \right). \quad (1)$$

У стандарті IEEE 802.11 [8, 9] (табл. 1) в певних режимах роботи радіозасобів Aselsan [11] дані можуть передаватися з різною швидкістю, які тісно пов'язані з параметрами радіоканалу, такими як чутливість приймача  $P_{\min}$ , відношення  $SNR$  та смуга пропускання  $\Delta F$ .

Таблиця 1

Характеристики режимів роботи IEEE 802.11n

MCS	Модуляція, кодування	Ширина каналу 20 МГц				Ширина каналу 40 МГц			
		Швидкість, Мб/с		min SNR, dBm	RSSI, $P_{\min}$ , дБм	Швидкість, Мб/с		min SNR, dBm	RSSI, $P_{\min}$ , дБм
		GI=800 ns	GI=400 ns			GI=800 ns	GI=400 ns		
MCS0	BPSK-1/2	6,5	7.2	2	-82	13.5	15	5	-79
MCS1	QPSK-1/2	13.0	14.4	5	-79	27	30	8	-76
MCS2	QPSK-3/4	19,5	21.7	9	-77	40.5	45	12	-74
MCS3	16QAM-1/2	26	28.9	11	-74	54	60	14	-71
MCS4	16QAM-3/4	39	43.3	15	-70	81	90	18	-67
MCS5	64QAM-2/3	52	57.8	18	-66	108	120	21	-63
MCS6	64QAM-3/4	58,5	65	20	-65	121.5	135	23	-62
MCS7	64QAM-5/6	65	72.2	25	-64	150	150	28	-61
...	...	...	...	...	...	...	..	...	...
MCS31	64QAM-	260	288.9	25	-64	540	600	28	-61

	5/6								
--	-----	--	--	--	--	--	--	--	--

Крім того, використовуючи рівняння (1) зі стандартними умовами роботи для протоколу IEEE 802.11n допустимі швидкості передачі варіюються в залежності від наступних умов (табл. 1): тип радіоканалу (між двома наземними вузлами або між вузлом і ТА), відстань між ними, значення  $SNR$ . Припускаючи, що загасання в каналі не змінюється під час передачі фрейму і відстань між будь-якою парою вузлів, а також між кожним вузлом і ТА відомо в момент передачі, можуть бути визначені відповідні швидкості передачі.

Значення  $SNR$  постійно вимірюється як в ТА, так і на кожному мобільному терміналі з метою динамічного призначення сигнально-кодової конструкції для кожного фрейму даних, який передається. Таким чином,  $SNR$  можна контролювати шляхом зміни відстані між передавачем та приймачем. У традиційних системах безпроводового зв'язку положення базової станції або точки доступу є фіксованим і не може бути змінено для поліпшення  $SINR$ . Однак застосування ТА надає можливість управління його положенням відповідно до вимог навантаження вузлів з метою максимізації їх пропускної здатності.

У даній роботі розглядається завдання оптимального позиціонування ТА відносно його вузлів обслуговування для забезпечення максимальної пропускної здатності зони ТА.

*Модель мережі.* Розглядається неоднорідна ієрархічна мережа радіозв'язку. Наземні вузли випадковим чином розподілені на певній території, мають радіозасоби певної потужності (військовослужбовці, транспортні засоби), мобільні, оснащені системою позиціонування.

ТА і наземні вузли оснащені однаковим радіоустаткуванням і підтримують однакові протоколи інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11 [9], ASEL SAN [10] тощо), мають обмежені дальність радіозв'язку і швидкість обміну [10]. Кожен вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з іншими вузлами мережі і ТА.

ТА оснащена всеспрямованою та спрямованою антенами. У початковій фазі обслуговування вузлів, коли ТА здійснює пошук будь-якого вузла в зоні, ТА використовує всеспрямовану антену, при передачі даних конкретному вузлу – спрямовану.

Телекомунікаційна аероплатформа має можливість переміщуватися в трьох вимірах із змінною швидкістю або зависати на обмеженій висоті та на обмежений час. ТА володіє власною системою управління, що дозволяє самостійно приймати рішення в умовах відсутності зв'язності з центром управління мережею. Коли в зону радіозв'язку наземного вузла входить ТА, НВ відправляє ТА повідомлення про наявну інформацію свого стану (параметри радіоканалу, навантаження, зв'язність, маршрути тощо). Вважається, що кожен ТА знає свої координати, а також координати і параметри наземних вузлів інших ТА.

В загальному цілями системи управління мережі ТА можуть бути [4] екстремум або підтримка (виступають як обмеження) заданих критеріїв ефективності функціонування всієї мобільної компоненти (її зони, напряму, маршруту між окремою парою „відправник-адресат”)  $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$  – забезпечення зв'язності вузлів (підмереж), оптимум пропускної здатності, покриття, якості маршрутів передачі, ресурсів на реалізацію завдання, часу виконання завдання, тощо.

Застосування ТА дозволяє значно скоротити кількість ретрансляційних ділянок в маршрутах передачі між вузлами (до двох, якщо ці вузли потрапляють в одну зону обслуговування ТА). Однак вузли в зоні покриття ТА можуть знаходитися на різній відстані, тому швидкості передачі в радіоканалах між різними наземними вузлами будуть різними.

Пропонується модель та алгоритм пошуку положення ТА в зоні обслуговування для забезпечення максимуму її пропускної здатності. Збільшити швидкість передачі між наземним вузлом та ТА можна шляхом зменшення відстані між ними. Ця задача просто вирішується для двох вузлів [5], але стає складною для множини вузлів у зоні обслуговування ТА.

Пропускна здатність зони обслуговування ТА  $s_{TA}$  визначається сумою пропускних здатностей вузлів  $s_i$ , які знаходяться в зоні покриття цього ТА:

$$s_{TA} = \sum_{i=1}^n s_i .$$

Пропускна спроможність вузла значною мірою залежить від відстані між НВ-ТА (крім параметрів радіоканалу та прийомопередавачів). Наприклад, в протоколі 802.11 канална швидкість залежить від швидкості фізичного рівня та розміру фрейму. Будемо вважати в подальшому один фрейм одиницею передачі.

При реалізації централізованої версії PCF (Point Control Function) протоколу каналного рівня (наприклад, 802.11) ТА буде намагатись рівномірно розподіляти слоти для кожного вузла зони покриття. Однак у реальності кожний вузол знаходиться на різних відстанях від ТА, яка визначає швидкість передачі. Тому вузли, які знаходяться на більшій відстані від ТА будуть реалізовувати менші значення пропускної спроможності. Тому, змінюючи положення ТА у просторі ми можемо регулювати сумарну пропускну здатність  $s_{TA}$ .

Завдання ставиться наступним чином – знайти положення ТА в зоні обслуговування наземних вузлів, яке максимізує сумарну пропускну здатність визначених наземних вузлів.

Нехай  $k$ -та ТА в момент часу  $t$  знаходиться в позиції  $\chi$  у просторі  $(x_k, y_k, h)_t$  на визначеній висоті польоту  $h$  (рис. 1). Відома максимальна дальність передачі ТА $_k$  –  $d_{max}$  та, відповідно,  $n$  наземних вузлів, які знаходяться в зоні покриття  $\Theta_k$ . При рішенні завдання важливо забезпечити, щоб при переміщенні ТА всі вузли залишалися всередині зони покриття  $\Theta_k$ , розмір якої визначається величиною  $d_{max}$ .

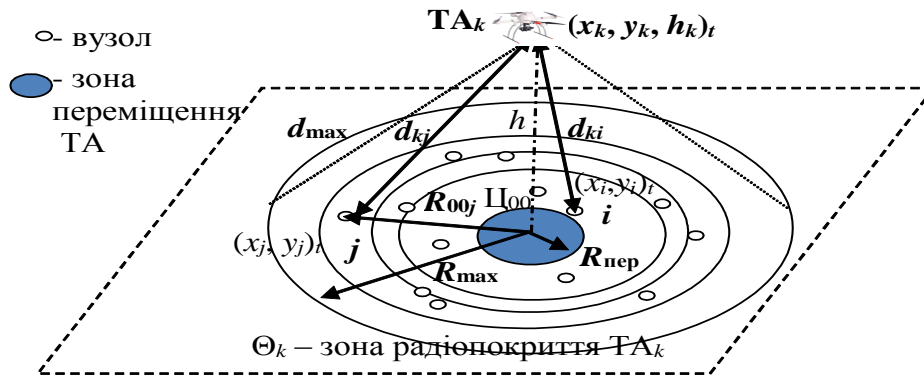


Рис. 1. Ілюстрація зони покриття наземних вузлів та зони можливого переміщення ТА

При відомій висоті польоту  $h$  та граничній дальності передачі між НВ та ТА ( $d_{max}$ ) можна визначити кругову область переміщення ТА, при якій всі вузли будуть покриватися цим ТА. Для цього:

1. Визначимо відстань  $R_{00j}$  до найвіддаленого вузла  $j$  від проекції положення ТА (рис. 1) ( $R_{00j} \leq R_{max}$ ) для  $\forall j \in \Theta_k$ .
2. Визначимо радіус можливого кола переміщення  $R_{пер}$  ТА

$$R_{пер} = R_{max} - R_{00j}, \quad R_{max} = \sqrt{d_{max}^2 - h^2},$$

де  $R_{max}$  – максимальний радіус зони покриття. Позначимо центр проекції положення ТА –  $\Pi_{00}$  як точку з координатами  $(0, 0)$ . Тоді метою рішення є визначення позиції ТА –  $\chi^* \in \Theta_{кп}$  ( $\Theta_{кп}$  – коло можливого переміщення  $k$ -ої ТА) при якій забезпечується  $s(\chi^*) \geq s(\chi)$  для  $\forall \chi \in \Theta_{кп}$ .

Цільова функція – максимум пропускної здатності (вираз 2) при обмеженнях (3 – 6).

$$\max s_k(\Theta_k) = \max_{\chi \in \Theta_{кп}} \sum_{i \in I} s_i t_i, \quad \forall i \in \Theta_k, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Theta} t_i \leq 1, \quad (3)$$

$$d(\chi, \Pi_{00}) \leq R_{\text{пер}}, \quad (4)$$

$$g_{ik} \geq s_{ik} t_i, \quad (5)$$

$$(g_{ik} - s_{ik} t_i) (t_i - t_j) \geq 0, \forall j \in n - i. \quad (6)$$

$$s_i = f(P_t, d_{ik}, N_i). \quad (7)$$

Вираз (2) описує цільову функцію, де  $t_i$  – інтервал часу, який виділений кожному  $i$ -му вузлу в одному слоті передачі. Вираз (3) гарантує передачу в певний момент часу тільки одного вузла (ТА реалізує централізовану версію розподілу слотів, наприклад, РСF для протоколу IEEE 802.11). Вираз (4) визначає переміщення ТА тільки в межах кола переміщення. Вираз (5) вказує, що час, відведений на передачу, не перевищує навантаження вузла, де  $g_{ik}$  – навантаження вузла. Вираз (6) вказує на справедливість надання часу передачі (більше потреба – більше часу). Пропускна спроможність конкретного вузла  $s_i$  визначається виразом 1 (вираз 7 відображає перелік основних параметрів залежності  $s_i$ : потужність передачі, відстань між наземним вузлом і ТА ( $d_{ik}$ ) та рівень шуму  $N_i$ ).

Цільова функція в формулі (2) є невиключною і тому може мати локальні максимуми. Відомі методи отримання рішення мають значну обчислювальну складність. Тому пропонується використати ітераційний алгоритм для обчислення наближеного значення положення ТА, яке намагається максимізувати пропускну здатність зони ТА. Цей алгоритм оцінює пропускну здатність зони в різних положеннях ТА всередині кола переміщення і вибирає позицію, яка має максимум розрахованої пропускну здатності.

Алгоритм включає наступні кроки:

1. Розрахувати коло допустимого переміщення ТА.
2. Визначити множину можливих місць розміщення ТА в середині кола переміщення у вигляді решітки точок.
3. Розрахувати загальну пропускну здатність зони у кожній точці решітки.
4. Вибрати точку решітки з максимальною пропускну здатністю, як результат рішення – бажане положення ТА.

Враховуючи, що практично неможливо оцінити розрахункову пропускну здатність у кожній точці всередині кола переміщення, яке містить безліч точок, визначимо сітку точок всередині кола, як показано на рис. 2. Для досягнення заданої точності обчислень крок сітки можна регулювати (рис. 2а та 2б).

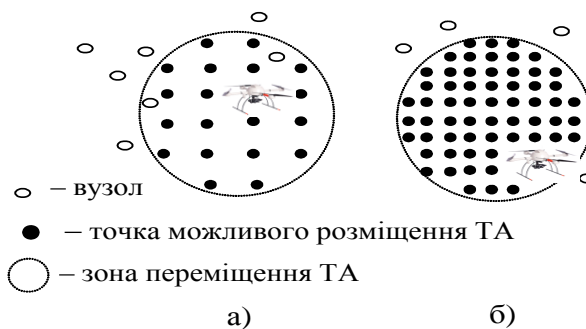


Рис. 2. Можливі місця розміщення ТА в зоні переміщення

Для оцінки пропускну здатності вузлів у точці решітки необхідно оцінити фізичну швидкість передачі даних  $s_{i\text{фіз}}$  для кожного вузла  $\forall i \in \Theta_k$  в зоні покриття. На основі  $s_{i\text{фіз}}$  визначається пропускну здатність на каналному (MAC)  $s_{i\text{маc}}$  та транспортному рівнях (віднімається значення службового трафіку, який визначає каналний та транспортний рівні).

Наступний процедура оцінює  $s_{i\text{маc}}$  для кожного вузла в точці решітки.

Дано: множина вузлів  $i=1\dots n$  з координатами  $(x_i, y_i)$ , які розміщені в зоні обслуговування  $k$ -го ТА, множина точок сітки можливого положення ТА, висота ТА

фіксована, модель радіоканалу (1), потужність передачі  $P_t$  і набір рівнів шуму  $N$  для кожного вузла, заданий протокол каналного рівня.

1. Обчислення відстані  $d_i$  між вузлом  $\forall i \in \Theta_k$  і точкою сітки.
2. Обчислення потужності прийому  $P_{ci}$  для вузла  $i$  на основі потужності передачі  $P_t$ , відстані  $d_i$  і модель каналу радіозв'язку. В нашому моделюванні ми використовували модель втрат у вільному просторі.
3. Розрахунок  $SNR$  (або отримання значення  $SNR$  телекомунікаційною аероплатформою від наземного вузла в процесі обміну).
4. Визначення фізичної швидкості передачі даних  $s_{i\text{физ}}$  відповідно до визначеного  $SNR$ , який також залежить від технології радіозв'язку, яка використовується.

При моделюванні  $s_{i\text{физ}}$  визначаються згідно з табл. 1 (мінімальні значення потужності отримано на основі вимог чутливості приймача, зазначених у стандарті IEEE802.11 [9], і значень  $SNR$ , рекомендованих для швидкості бітових помилок (BER)  $10^{-5}$  або менше).

5. Визначити пропускну здатність на каналному MAC рівні  $s_{i\text{маc}}$ , яка залежить від  $s_{i\text{физ}}$  і технології радіозв'язку. Значення пропускну здатності на каналному або транспортному рівні може бути отримано аналітичним або імітаційним моделюванням [11] (наприклад в табл. 2 наведений  $s_{i\text{маc}}$  для різних фізичних швидкостей даних для IEEE802.11a).

Таблиця 2

Взаємозв'язок між фізичною та каналною швидкістю передачі для протоколу IEEE 802.11a при різних розмірах пакету CBR

$s_{i\text{физ}}$ , Мбіт/с	54	48	36	24	18	12	9	6
CBR розмір пакета $b$	2264	2008	1496	984	728	472	344	216
$s_{i\text{маc}}$ , Мбіт/с	33.27	29.59	22.14	14.14	10.42	6.71	4.85	3.56

Пропускна здатність, що досягається окремим вузлом  $\forall i \in \Theta_k$  залежить від ефективної пропускну здатності цього вузла (без врахування службового трафіку). Ефективна пропускна здатність,  $s_{i\text{еф}} = t_i s_{i\text{маc}}$  вузла  $s$  залежить від часу передачі  $t_i$  і  $s_{i\text{маc}}$ , які визначається загальною кількістю користувачів  $|n|$  і рівнем вхідного навантаження  $g_i$ .

Звичайний алгоритм протоколу 802.11 PCF виділяє користувачам приблизно однаковий час передачі. Однак деякі вузли не повністю використовують канал, тому інші користувачі з більш високими вимогами до швидкості передачі даних  $g_i$  можуть використовувати цей залишковий час, збільшуючи тим самим ефективність використання ресурсу пропускну здатності. Алгоритм перерозподілу часу передачі абонентів зони наведений далі.

1. Розрахувати максимальну пропускну здатність кожного вузла (на каналному або транспортному рівні) згідно вищенаведеного алгоритму для кожної точки решітки.
2. Розподілити каналну швидкість порівну між всіма вузлами зони покриття ТА.
3. Обчислити резерв часу для абонентів, які потребують меншого часу на передачу. Визначити вузли, які будуть змагатись за резервний час.

4. Визначити пріоритет абонентів, які будуть змагатись (наприклад, по важливості в ієрархії управління).

5. Рівномірно додавати час згідно пріоритету для абонентів, які потребують більшого часу передачі. Якщо вимога до пропускну здатності певного вузла задоволена, то виключити його зі списку бажаючих збільшення часу.

6. Розрахувати загальну пропускну здатність зони в кожній точці.

7. Отримати оптимальне положення ТА, яке має максимальне значення пропускну здатності для всіх точок положення ТА.

Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму пошуку положення ТА для максимізації пропускну здатності зони обслуговування ТА було проведено моделювання за допомогою систем моделювання MATLAB.

Обмеження: відсутність джерел перешкод поза мережею та застосування моделі розповсюдження радіохвиль у вільному просторі. Залежності швидкості каналного (транспортного) рівня від фізичної швидкості передачі, отримані з досліджень [9, 12]. На прикладному рівні вхідний трафік представлений у вигляді трафіку постійної інтенсивності (CBR). Його рівень змінювався в різних діапазонах. Розмір пакета адаптувався відповідно до фізичного рівня IEEE802.11.

Були проведені експерименти та отримані залежності приросту пропускної здатності при різній щільності абонентів у зоні обслуговування, різному діапазоні вхідного навантаження.

На практиці щільність користувача навколо ТА розподілена нерівномірно. Наприклад, у сценарії переміщення військового підрозділу більша кількість вузлів будуть зосереджені навколо області спільних дій, а пункти управління встановлюються в іншій частині території. Тому були проведені експерименти для різних рівнів нерівномірності (асиметрії) в щільності вузлів: місцезнаходження 50 % користувачів у секторі кутів 90, 120, 150 градусів, а інші 50 % вузлів розміщені у решті зони покриття (рис. 3). Можна помітити, що підвищення пропускної здатності є значним при малій кількості вузлів у зоні та зменшується при збільшенні кількості вузлів. Зі збільшенням  $n$  приріст пропускної здатності зменшується. Алгоритм підвищує пропускну здатність в середньому на 30 % для двох вузлів і на 15 % коли кількість вузлів дорівнює 20. По мірі збільшення нерівномірності розподілу вузлів збільшується приріст пропускної здатності.

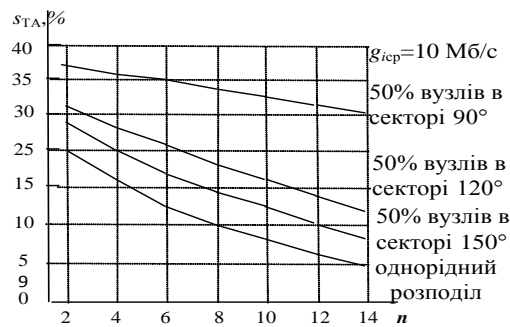


Рис. 3. Значення приросту пропускної здатності при різному розміщенні вузлів

Проведено моделювання залежності пропускної здатності зони ТА від рівня вхідного навантаження (зміна навантаження в певних межах) для різної кількості вузлів. Більший вигравш пропускної здатності досягається при невеликій кількості вузлів, і вигравш зменшується зі збільшенням кількості вузлів у зоні. При розширенні діапазону навантаження (необхідної швидкості передачі даних) збільшується вигравш сумарної пропускної здатності. Наприклад, для діапазонів вхідного навантаження [7... 8] Мбіт/с і [0...15] Мбіт/с, алгоритм досягає середнього підвищення пропускної здатності 21 % та 34 % відповідно.

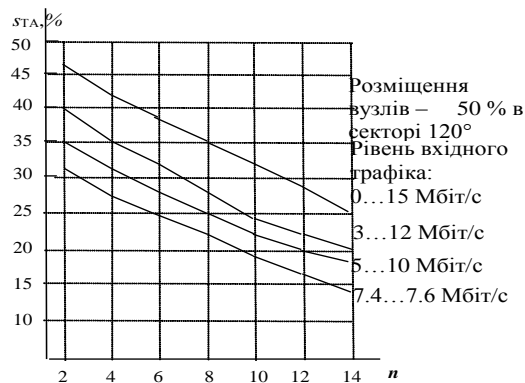


Рис. 4. Залежність вигравшу пропускної здатності від рівня трафіку та кількості вузлів

Обчислювальна складність процедури  $O(n)$  та алгоритму  $O(n^2)$ . Тому загальна обчислювальна складність дорівнює  $O(n_T n^2)$ , де  $n_T$  – кількість точок у зоні переміщення ТА. Зі збільшенням роздільної здатності сітки можливого розташування ТА алгоритм визначає позицію ТА близьку до оптимальної. Однак це значно збільшує обчислене навантаження. Час виконання алгоритму для 100 наземних вузлів та тисяч точок положення ТА не перевищив секунди. Фактично алгоритм працює в реальному масштабі часу та може бути використаний в спеціальному програмному забезпеченні системи управління ТА.

Таким чином, розроблена аналітична модель та алгоритм її реалізації щодо визначення положення ТА у просторі для оптимізації пропускної здатності вузлів зони обслуговування ТА при реалізації централізованого протоколу доступу до каналу. Результати моделювання продемонстрували збільшення пропускної здатності зони обслуговування ТА на 15–30 %. Рішення отримані в реальному масштабі часу, тобто модель може бути використана для оперативного управління положенням ТА.

Напрямом подальших досліджень є застосування запропонованої моделі для оптимізації пропускної здатності між вузлами повітряної мережі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Young-Han Nam, Merouane Debbah A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. <https://arxiv.org/abs/1803.00680>, 2018.
2. Lav Gupta, Raj Jain, Gabor Vaszkun Survey of Important Issues in UAV Communication Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, Issue 2, 2016, Page(s) 1123 – 1152, DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297.
3. Романченко І.С. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях/ І.С.Романченко, С.Л. Данилюк, С.М Чумаченко [та ін.] . – К.: НАУ, 2016. – 232 с.
4. Романюк В.А., Степаненко Є.О. Алгоритми побудови топології мереж радіозв'язку з телекомунікаційними аероплатформами // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 3. – С. 70 – 78.
5. Erlend Larsen, Lars Landmark and Øivind Kure Optimal UAV Relay Positions in Multi-Rate Networks // Published in Wireless Days, 2017, DOI:10.1109/WD.2017.7918107.
6. Erlend Larsen, Lars Landmark, Øivind Kure The Effects of a UAV on a Terrestrial MANET, DOI: 10.1109/MILCOM.2018.8599810, 2018.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом „Вильямс”, 2007. – 1104 с.
8. Гепко І.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. Киев: ЭКМО, 2009. – 672 с.
9. IEEE Std 802.11. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. 2016.
10. Станция радиорелейная широкополосная СРШ-5000 (Р-402). Описание. Технические характеристики. [mil.telecard.odessa.ua/product/ product-srsh](http://mil.telecard.odessa.ua/product/product-srsh).
11. Гурський Т.Г., Степаненко Є.О., Шишацький А.В. Оцінка граничної дальності зв'язку на сучасних радіо- та радіорелейних лініях // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2019. – № 1.
12. Чернега В. С. Оценка реальной пропускной способности компьютерных WiFi сетей на транспортном уровне // Таврический научный обозреватель № 3 (20), 2017.