

УДК 621.396.4

Лисенко О. І., д-р техн. наук,
Валуйський С. В.

ВПЛИВ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ПОЛОЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ РЕТРАНСЛЯТОРІВ НА ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ОБСЛУГОВУВАННЯ

Досліджено вплив нестабільності положення повітряних ретрансляторів на формування зони обслуговування наземних абонентів безпроводових епізодичних мереж. Запропоновано методи збільшення зони стабільного покриття на основі корекції діаграми спрямованості бортової антени та на основі синфазного баражування множини ретрансляторів.

Исследовано влияние нестабильности положения воздушных ретрансляторов на формирование зоны обслуживания наземных абонентов беспроводных эпизодических сетей. Предложены методы увеличения зоны стабильного покрытия на основе коррекции диаграммы направленности бортовой антенны и на основе синфазного барражирования множества ретрансляторов.

The influence of position instability of aerial repeaters on the formation of ground-based subscriber service area of wireless ad-hoc networks. Propose methods for increasing the zone of stable coatings based on the correction of board antenna radiation pattern and on the basis of common-mode standing patrol of many repeaters.

Вступ. Надзвичайні ситуації природного й техногенного характеру, які все частіше мають місце у нашому світі, призводять до повного або часткового виходу з ладу міської інфраструктури, у тому числі телекомунікаційних споруд (базових станцій стільникового зв'язку, кабельних ліній та ін.). Забезпечення зв'язку в підрозділах рятувальних бригад та інших мобільних служб у таких ситуаціях можливе шляхом розгортання безпроводових епізодичних мереж (БЕМ) або мереж із самоорганізацією. Мобільні абоненти (МА) таких мереж можуть вільно пересуватися містом та здійснювати обмін інформацією безпосередньо один з одним (у зоні прямої радіо видимості) або шляхом ретрансляції через сусідніх абонентів. Однак через складний рельєф міста (наявність великих та протяжних будівель) виникає проблема зв'язності таких абонентів. Одним із засобів підвищення зв'язності абонентів БЕМ може бути застосування мережі повітряних ретрансляторів (ПР), наприклад, на базі мініатюрних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [1]. Розміри

таких апаратів не перевищують 1м та можуть бути оперативно запуснені без спеціальних злітних смуг та установок. Для здійснення зв'язку через такі ПР абоненти повинні знаходитись в його зоні обслуговування. Однак нестабільність положення таких платформ у повітрі призводить до зменшення зони стабільного покриття та якості зв'язку з наземними абонентами. Тому це питання потребує додаткового дослідження та розробки методів компенсації даного ефекту.

Аналіз досліджень і публікацій. В існуючих публікаціях [2,3] вже висвітлювалися подібні проблеми, однак в основному вони вирішувалися для високо піднятих телекомунікаційних платформ (HAPs) на основі стратостатів. Мініатюрні ж БПЛА мають дещо іншу траєкторію руху та обмежене корисне навантаження, що потребує модернізації існуючих методів та розробки нових простих методів, які не збільшують корисне навантаження ПР.

Постановка завдання. Отже метою даної роботи є розробка методів збільшення зони стабільного покриття МА БЕМ в умовах нестабільності положення ПР.

Для вирішення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

1. Визначення параметрів зони обслуговування для фіксованого ПР.
2. Дослідження впливу нестабільності положення БПЛА на параметри зони обслуговування.
3. Модернізація існуючих та розробка нових методів збільшення зони стабільного покриття ПР.

Основна частина. Однією з визначальних характеристик функціонування БЕМ є *зона покриття* БПЛА, що визначається як частина поверхні земного шару, у межах якої створюється необхідний для прийому наземною станцією (МА) рівень сигналу, що випромінюється БПЛА, а також забезпечується необхідний рівень сигналу від наземної станції на вході приймача БПЛА. Регламентом радіозв'язку [4] визначено поняття *зони обслуговування* радіосистеми як частини поверхні Землі, на якій можуть розташовуватися наземні станції даної системи. На відміну від зони покриття у межах зони обслуговування не тільки забезпечується необхідний рівень сигналу на лініях між БПЛА та МА, але й дотримуються необхідні захисні інтервали по відношенню до сигналів інших систем, що заважають. Таким чином, зона обслуговування ніколи не виходить за межі зони покриття.

Для дослідження впливу мобільності БПЛА на формування зони обслуговування спочатку розраховуємо зону обслуговування при деякому фіксованому розміщенні платформи у просторі (рис.1).

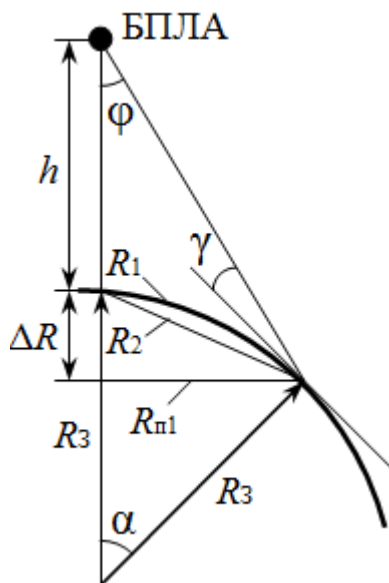


Рис.1. Геометрія повздовжнього перетину зони покриття БПЛА

Якщо обмежити зону видимості БПЛА тією частиною земної поверхні, для якої БПЛА видно під кутом не менше деякого заданого кута місця γ , то будуть справедливі наступні співвідношення:

$$\begin{cases} (h + R_3) \sin \varphi = R_3 \cos \varphi; \\ \alpha + \varphi + \gamma = \pi/2, \end{cases} \quad (1)$$

де h – висота зависання БПЛА над поверхнею Землі; R_3 – радіус Землі (~ 6378 км); φ – кут, що дорівнює половині максимального кутового розміру зони видимості відносно БПЛА; α – кутова відстань границі зони обслуговування від точки надіру відносно центру Землі.

Тоді максимальна похила дальність від БПЛА до границі зони обслуговування визначається виразом:

$$D^2 = R_3^2 + (h + R_3)^2 - 2R_3(h + R_3)\cos \alpha, \quad (2)$$

а кривизна поверхні Землі під точкою зависання БПЛА дорівнює: $\Delta R = R_3 \tan(\alpha/2) \sin \alpha$.

Радіус зони покриття БПЛА може бути визначений через параметри кривизни поверхні зони покриття: довжину дуги, що відображає випуклість поверхні зони покриття, $R_1 = \alpha R_3$, де α в радіанах; довжину хорди, що стягує цю дугу, $R_2 = 2 R_3 \sin(\alpha/2)$; відстань від точки зависання БПЛА до границі зони видимості $R_{n1} = R_3 \sin \alpha$. Як показано у [2] при $h \leq 30$ км розходження між значеннями R_1 , R_2 та R_{n1} не перевищує 0,1%, отже при розрахунку зони покриття можна користуватись будь-яким з вище вказаних параметрів. Також для збереження заданого інтервалу уразливості, необхідного для безконфліктної роботи протоколу множинного доступу (як показано у [5]), максимальна похила дальність D не має перевищувати 5 км. Враховуючи ці припущення та вирази (1), (2)

розрахуємо параметри зони покриття в залежності від обраного кута місця γ . Результати розрахунків наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункові параметри зони обслуговування БПЛА

Кут місця γ, \dots°	Висота розташування БПЛА $h, \text{ км}$	Діаметр $2R$ зони покриття, км
0	0	10
5	0,435	9,962
10	0,868	9,848
15	1,294	9,659
20	1,710	9,397
25	2,113	9,063
30	2,500	8,660
35	2,868	8,192
40	3,214	7,660
45	3,536	7,071
50	3,830	6,428
55	4,096	5,738
60	4,330	5,000
65	4,532	4,226
70	4,698	3,420
75	4,830	2,588
80	4,924	1,736
85	4,980	0,872

Зазвичай для наземної станції радіозв'язку кут місця лежить у межах від 5° до 90° . Для абонентських терміналів мереж на основі NAPs згідно рекомендації F.1569 мінімальний кут місця становить 20° . На практиці у межах щільно забудованого міста кут місця становить $60-90^\circ$ [3]. Згідно даному припущенні розмір стільника одного мініатюрного БПЛА становитиме порядку 5-6 км у діаметрі.

Однак через мобільність БПЛА зона покриття зазнає певних змін. По-перше, через те, що БПЛА не може зависнути у заданій точці (якщо це не гелікоптер), а лише має змогу обертатися навколо неї по колу мінімального радіусу r_{\min} , що визначається конструкторськими даними платформи. По-друге, через неточність виводу БПЛА ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$), що визначається погодними умовами (зокрема швидкістю вітру) та похибкою системи позиціонування (наприклад, GPS). Це призведе відповідно до нестабільності зони покриття через відхилення діаграми спрямованості (ДС) антени аероплатформи (рис.2а). У даному випадку зона стабільного прийому буде знаходитись у межах $(0, R - \Delta'')$, де $\Delta'' = r_{\min} + \Delta x$, а зона нестабільного прийому – у межах $(R - \Delta''; R + \Delta'')$. При $R=3000\text{м}$, $r_{\min}=200\text{м}$, $\Delta x=100\text{м}$ зона стабільного прийому $2R_{\text{ст}}$ зменшиться на 600м, що становить 10% від зони покриття $2R$ фіксованої платформи.

Для того, щоб збільшити зону стабільного прийому можна застосувати один з методів корекції ДС антени БПЛА [2], наприклад, пропорційний вихід країв ДС за зону стільника. У даному випадку зона обслуговування матиме форму еліпса через нахил кругової ДС, а зону стабільного прийому опише мала вісь меншого еліпса b' при переміщені БПЛА по колу мінімального радіуса із максимальною нестабільністю Δx у бік центру зони обслуговування ($\Delta' = r_{\min} - \Delta x$) (рис.2б). У свою чергу зону нестабільного прийому опише велика вісь більшого еліпса a'' при переміщені БПЛА по колу мінімального радіуса із максимальною нестабільністю Δx у протилежний бік від центру зони обслуговування ($\Delta'' = r_{\min} + \Delta x$).

Якщо представити головну пелюстку ДС антени БПЛА у вигляді конуса випромінювання з кутом φ (вершина конуса на БПЛА), нахиленого до Землі під кутом θ (при вершині конуса), а поверхню землі – як січну площину в перетині такого конуса, то при використанні проекційних правил нарисної геометрії та апарату тригонометрії можна отримати діаметри зон стабільного та нестабільного прийому:

$$a'' = r''_1 + r''_2;$$

$$b' = (4 \tan^2(\varphi/2) \cdot (h/\cos \theta' + \sin \theta' \cdot (r'_2 - r'_1)/2)^2 - (r'_2 - r'_1)^2 \cos^2 \theta')^{0,5}, \quad (3)$$

де $r'_1 = h \cdot (\tan \theta^{(c)} - \tan(\theta^{(c)} - \varphi/2))$; $r'_2 = h \cdot (\tan(\theta^{(c)} + \varphi/2) - \tan \theta^{(c)})$;

$$\theta^{(c)} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\Delta^{(c)} \sqrt{1 + \cos(\varphi) \sqrt{1 + \sin^2(\varphi) \cdot \Delta^{(c)2}/h^2}}}{h \cdot (1 - \cos^2(\varphi) \cdot \Delta^{(c)2}/h^2)}\right).$$

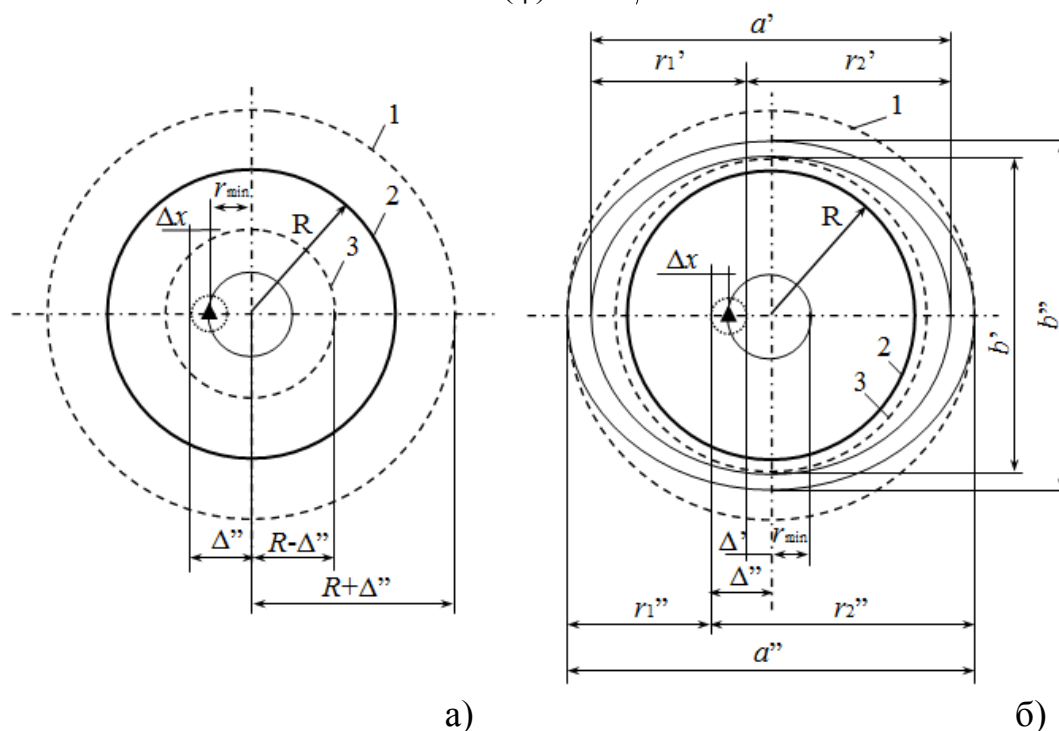


Рис.2. Вид зверху заданої зони обслуговування (2) та зон стабільного (3) і нестабільного (1) покриття, що утворені без методів корекції положення ДС (а) та методом пропорційного виходу країв ДС за зону стільника

Залежності приведені до $2R$ діаметрів зон стабільного та нестабільного покриття від зміщення БПЛА Δ при застосуванні методу пропорційного виходу країв ДС за зону стільника та без нього представлені на рис.3. Аналізуючи дані залежності можемо бачити, що без застосування методів корекції положення ДС розмір зони стабільного покриття зменшується, а зони стабільного покриття відповідно збільшується, прямо пропорційно росту зміщення БПЛА Δ . При застосуванні методу пропорційного виходу країв ДС за зону стільника розмір зони як стабільного, так і нестабільного покриття монотонно зростає із ростом зміщення БПЛА Δ . При чому у даному випадку зона стабільного прийому завжди переважає задану фіксовану зону обслуговування, а розмір зони нестабільного прийому значно менше відповідних значень у випадку відсутності корекції положення ДС. При зміщенні БПЛА менш ніж на 500м ($\Delta/2R \leq 0,1$) усі три зони будуть майже співпадати.

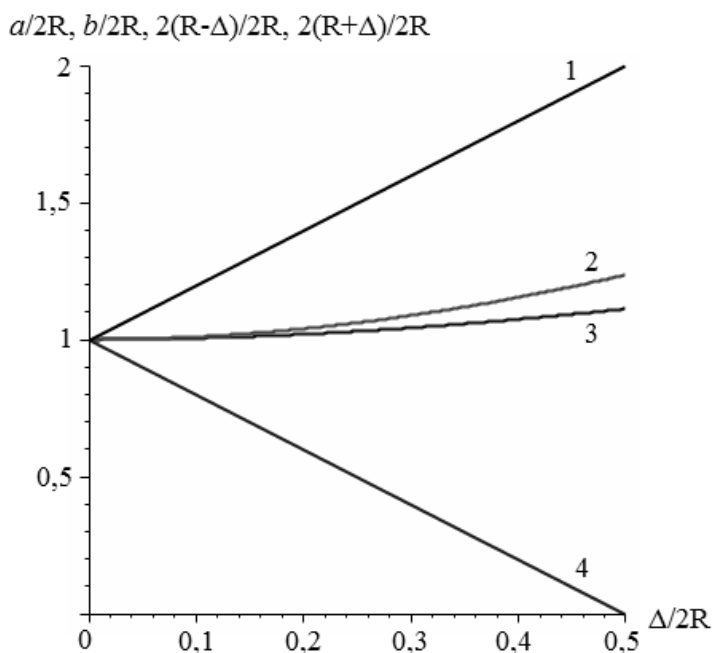


Рис.3. Залежності приведені до $2R$ діаметрів зон стабільного (3,4) та нестабільного (1,2) покриття від зміщення БПЛА Δ при застосуванні методу пропорційного виходу країв ДС за зону стільника (2,3) та без нього (1,4) ($2R=5$ км, $h=4,33$ км)

Без застосування методів корекції ДС бортової антени зону стабільного покриття можливо збільшити при застосуванні множини БПЛА, що синфазно рухаються з однаковим радіусом r та швидкістю V баражування на однаковій висоті ($R=\text{const}$) із зміщенням позиції один відносно одного на кут однакової величини $\omega=2\pi/N$, де $N=1,2,3,\dots$ –

кількість БПЛА. Тоді зону стабільного покриття буде утворювати точка перетину двох кіл радіуса R сусідніх БПЛА (рис.4). Зазначимо, що при цьому радіус зони нестабільного покриття залишиться незмінним $R+r$. Тоді із застосуванням тригонометричних перетворень радіус зони стабільного покриття L можна визначити наступним чином:

$$L = \begin{cases} R - r, & N < 2 \\ \sqrt{R^2 - \frac{1}{2}r^2(1 - \cos \frac{2\pi}{N})}, & N \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

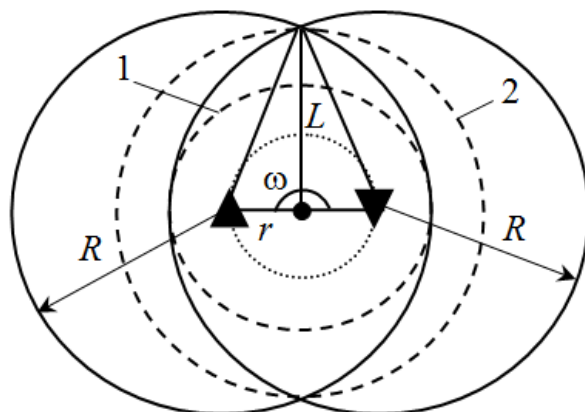


Рис.4. Формування зони стабільного покриття із застосуванням одного БПЛА (1) та із застосуванням двох БПЛА (2)

Для різних значень радіуса баражування r (при $R=2500\text{м}$) залежність розміру зони стабільного покриття від кількості БПЛА згідно (4) буде мати наступний вигляд (рис.5).

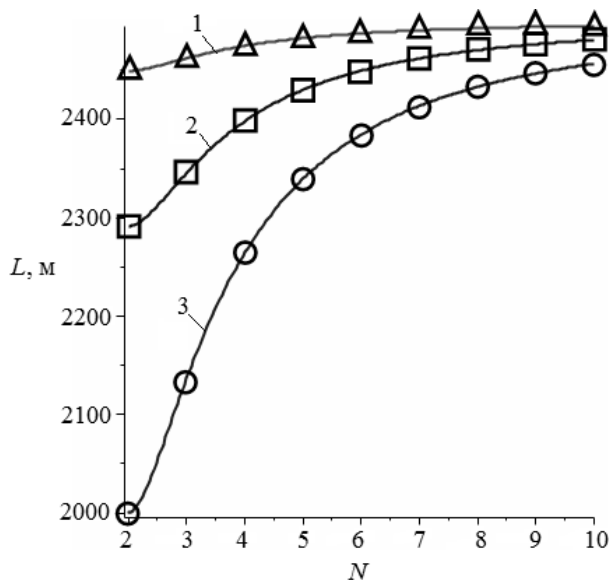


Рис.5. Залежність розміру зони стабільного покриття від кількості БПЛА при різних значеннях радіуса баражування: 1 – $r_1=500\text{м}$, 2 – $r_2=1000\text{м}$, 3 – $r_3=1500\text{м}$

Аналізуючи графіки на рис.5 та вираз (4) можемо бачити, що найбільший вклад у збільшенні зони стабільного покриття вносить другий

БПЛА, при застосуванні більшої кількості ретрансляторів приріст зменшується, а графіки асимптотично прямують до значення R . Також можемо бачити, що приріст L зменшується із зменшенням радіусу баражування r . Також, слід зазначити, що застосування декількох ретрансляторів при формуванні зони обслуговування одного стільника дозволяє збільшити надійність та інформаційну ємність мережі в N -кратному розмірі. Однак із збільшенням кількості ретрансляторів, що баражують по одному колу, збільшується також небезпека їх зіткнення, тому на практиці доцільніше буде застосовувати не більше 4 БПЛА.

Висновки.

Переміщення БПЛА (по колу мінімального радіуса) та неточність його виводу у задану точку простору при формуванні зони обслуговування призводить до збільшення зони нестабільного прийому та відповідно до зменшення зони стабільного прийому. Щоб запобігти цьому потрібно використовувати якомога менший радіус баражування БПЛА або застосовувати один з методів корекції ДС антени БПЛА, наприклад, на основі пропорційного виходу країв ДС за зону стільника, що дозволяє значно зменшити зону нестабільного прийому та відповідно збільшити зону стабільного прийому. При зміщенні БПЛА менш ніж на 500м ($\Delta/2R \leq 0,1$) ці дві зони будуть майже співпадати.

Також було запропоновано метод збільшення зони стабільного покриття на основі синфазного баражування множини повітряних ретрансляторів в районі заданого стільника. Найбільший вигравш дає застосування другого ретранслятора (65% на випадок $r=1000$ м, $R=2500$ м), із застосуванням більшої кількості вигравш зменшується. Застосування декількох ретрансляторів дозволяє також збільшити надійність та інформаційну ємність мережі.

Використані джерела інформації:

1. Лисенко О. І. Метод управління топологією мережі повітряних ретрансляторів для підвищення структурно-інформаційної зв'язності безпроводових епізодичних мереж / О. І. Лисенко, С. В. Валуйський // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2011. – № 1. – С. 117 – 126.
2. Ильченко М. Е., Кравчук С. А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. – К.: Наук. думка, 2008. – 580 с.
3. Holis J. Elevation dependent shadowing model for mobile communications via high altitude platforms in built-up areas / J. Holis, P. Pechac // IEEE trans. on antennas and propagation. – 2008. – Vol. 56. – №4. – pp. 1078 – 1084.
4. Регламент радиосвязи. Том.1. – М.: Радио и связь, 1985. – 509 с.
5. Leung K. K. Outdoor IEEE 802.11 cellular networks: radio and MAC design, and their Performance / K. K. Leung, M. V. Clark, B. McNair, Z. Kostic, L. J. Cimini, J. H. Winters // IEEE International Conf. on Com. – 2002. – Vol. 1. – pp. 512 – 516.

Рецензент: д.т.н. Асланян А.Е.