

УДК 621.396.44(045)

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ АЕРОПЛАТФОРМ

Лисенко О. І., д-р техн. наук, проф., *Кірчу П. І.*, *Валуйський С. В.*

Національний авіаційний університет

pkirchu@mail.ru

Для розв'язання задачі підвищення зв'язності бездротових епізодичних мереж (БЕМ) запропоновано використовувати БПЛА аероплатформу для розміщення ретрансляючих вузлів. Проведено аналіз впливу маневрів БПЛА на показники якості зв'язку в БЕМ, та наведено підхід до визначення обмежень на параметри просторового руху аероплатформи.

Ключові слова: зв'язність, показники якості, зона покриття, телекомунікаційна система.

For a solution of a problem of a raise of connectivity wireless webs it is offered to use UAV for the arrangement of repeaters. The analysis of influence of maneuvers UAV on communication quality indicators in wireless webs is carried out, and the approach to definition of restrictions on parameters of space movement of an aeroplatform is offered.

Keywords: connectivity, figure of merit, a cover zone, telecommunication system.

Вступ

Мобільність вузлів бездротової епізодичної мережі (БЕМ), швидка зміна характеру місцевості, обмежена енергетика радіоліній та енергозберігаючого ресурсу призводять до нестабільності з'єднань між вузлами та, як наслідок, до погіршення (або втрати) зв'язності БЕМ. Отже, виникає потреба в підвищенні зв'язності БЕМ. Одним зі способів підвищення зв'язності БЕМ може бути застосування телекомунікаційних систем на основі платформ повітряного базування (літаки, гелікоптери, дирижаблі тощо) [1; 2]. У цій статті як повітряну платформу запропоновано використовувати безпілотні літальні апарати (БПЛА), що мають широке використання у народному господарстві, зокрема в телекомунікаційній сфері.

Постановка завдання

БЕМ на основі БПЛА являють собою складні багатофункціональні динамічні системи, що потребують ефективної системи управління, зокрема ефективної підсистеми управління мережею БПЛА. Однією з головних функцій підсистеми є управління топологією мережі БПЛА та системою автоматичного керування літального апарату. Актуальним на сьогодні є завдання оптимального управління топологією мережі БПЛА, тобто знаходження оптимальної кількості БЛА, місця їх розташування та переміщення в просторі для підвищення зв'язності БЕМ.

Однією з визначальних характеристик функціонування телекомунікаційних систем на основі аероплатформ є її зона покриття, яка визначається як частина поверхні земної кулі, в межах якої створюється необхідний для прийому наземною станцією рівень сигналу, який випромінюється аероплатформою, а також забезпечується необхідний рівень сигналу від наземної станції на вході приймача аероплатформи. Зони покриття телекомунікаційних систем на основі аероплатформ можуть мати чарунки з малими кутами піднесення на краю зони обслуговування. Саме це потребує створення більш точної моделі аналізу геометрії зони обслуговування і, відповідно, розподілення в ній рівнів сигналу.

Фактор мобільності БПЛА в режимі аероплатформи вимагає врахування впливу відходу головної осі діаграми напрямленості (ДН) бортової антени аероплатформи на роботу абонентського терміналу. В умовах, коли на борту БПЛА немає відповідних механічних систем позиціонування антени, слід визначити необхідні обмеження на параметри просторового руху БПЛА для забезпечення необхідного для прийому наземною станцією рівня сигналу, який випромінюється аероплатформою, а також для забезпечення необхідного рівня сигналу на вході приймача аероплатформи.

Аналіз впливу маневрів БПЛА на характеристики телекомунікаційної мережі

Одним з основних критеріїв який впливає на показники якості обслуговування (QoS) є зв'язність бездротової епізодичної мережі [2].

Наприклад, у мережах військового призначення, таких як MANET, важливо зберігати з'єднаними усі вузли мережі. Зв'язність пари вузлів буде визначати достовірність переданої між ними інформації, тобто під зв'язністю мережі розуміють здатність будь-якої пари вузлів здійснювати інформаційний обмін, використовуючи проміжні вузли як ретранслятори. Імовірність зв'язності пари вузлів можна визначити через

імовірність безпомилкової передачі пакету даних між цими вузлами, тобто:

$$P_{ij}^{ca} = 1 - PER_{ij} \quad (1)$$

де PER_{ij} — імовірність пакетної помилки, яка визначається залежно від різновиду каналу мережі та координат розташування мобільних абонентів за відомими методиками, які наведені в працях [3; 4].

У цих роботах пару вузлів вважають зв'язаною, якщо ймовірність зв'язності цих вузлів

згідно з виразом (1) буде більше або дорівнювати деякому порогу δ , що відповідає деякому граничному значенню ймовірності пакетної помилки. Для опису зв'язності мережі використовують граф $G(N, A)$, що задається N вершинами (вузлами мережі) та сукупністю ребер (каналів зв'язку), що описуються матрицею зв'язності A , яка має такий вигляд:

$$[A]_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P_{ij}^{ca} \geq \delta; \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (2)$$

Одиничний елемент матриці відповідає наявності ребра між відповідними вершинами, тобто наявності каналу зв'язку між відповідними вузлами мережі.

Якщо кожен вузол у мережі може зв'язатися з будь-яким іншим вузлом напряму або шляхом маршрутизації через інші вузли, тоді можна сказати, що мережа є з'єднаною за виразом (2).

У працях, де досліджували БЕМ [5; 6; 7] припускають, що мережа передусім є зв'язною та концентрується на підвищенні зв'язності мережі, що розвивається. У працях [8; 9] показано, що введення розосередженої мережі базових станцій (МБС) може значно підвищити зв'язність мережі, а також як саме потрібно розмістити додаткові вузли так, щоб «нарощена» мережа була зв'язною. Тобто необхідно вибирати з'єднання, за допомогою яких було б ефективніше розповсюджувати інформацію мережею, так щоб усі вузли були з'єднані, а загальна зв'язність максимізована. Для розв'язання цієї задачі використовують метод мінімального кістякового дерева з теорії графів [4].

Кожне ребро графу може бути позначено вагою, що являє собою «відстань» між двома відповідними вершинами, тоді сумарна вага заданого кістякового дерева може бути обчислена як сума ваг усіх його ребер. У цьому випадку мінімальним кістяковим деревом (МКД) зваженого графу G можна називати кістякове дерево з вагою меншою (або рівною) вазі будь-якого іншого кістякового дерева графу G .

Приклад графу БЕМ та його МКД показано на рис. 1.

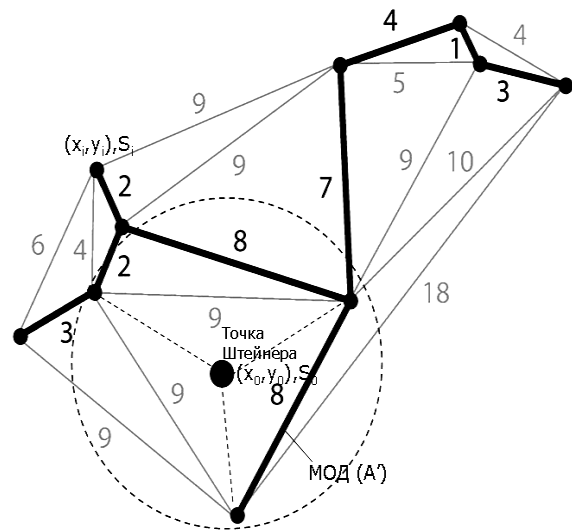


Рис. 1. Граф $G(N, A)$ бездротової епізодичної мережі (при $N = 10$)

Оскільки радіолінія БПЛА-МА значно переважає радіолінії між наземними вузлами за енергетикою (тобто $C_{0i} \gg C_{ij}, \forall i, j = \overline{1, N}$), то введення у граф однієї (або декілька) таких вершин (БЛА-вузлів) може значно підвищити зв'язність наземної БЕМ.

Пошук таких додаткових вершин з метою мінімізації сумарної ваги ребер графу називають «задачею Штейнера на графах», а точки проєкцій оптимального положення множини БЛА на місцевості $(x_{0j}, y_{0j}), j = \overline{1, K}$ — точками Штейнера (рис. 1).

Можливі з'єднання між різними парами вузлів позначені різними вагами, що відповідають затратам на передачу між ними. Разом потовщені ребра утворюють МКД, що поєднує усі вузли мережі.

Для знаходження МКД існують багато поліноміальних алгоритмів, наприклад, Пріма, Краскала та ін. [10].

Для кількісного визначення зв'язності кожного з'єднання пропонується позначити вагу кожного ребра, як функцію ймовірності безпомилкової передачі пакету даних, тобто

$$W_{ij} = -\log P_{ij}^{ca}, \quad (3)$$

де знак « \leftarrow » доданий для того, щоб зробити вагу позитивною.

Припустимо, що користувач i з'єднується з користувачем j через вузол k . Оскільки формула (3) має логарифмічну форму, то сума ваг $W_{ik} + W_{kj}$ буде добутком відповідних ймовірностей безпомилкової передачі пакету даних $P_{ik} P_{kj}$. З формули (3) очевидно, що чим менше вага ребра,

тим вища зв'язність відповідного з'єднання. Тобто задача максимізації зв'язності БЕМ зводиться до мінімізації ваги ребер відповідного графу.

Далі позначимо МКД через матрицю A' , де $[A']_{ij} = 1$, коли з'єднання між вузлами i та j є часткою МКД, та $[A']_{ij} = 0$ — в протилежному випадку.

Наведемо алгоритм знаходження координат (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) точки Штейнера в якій розміщуються БПЛА а також величину швидкості S_{0j} , $j = \overline{1, K}$ та напрямок переміщення. Для реалізації цього алгоритму використовують дві міри зв'язності: глобальну пакетну зв'язність та зв'язність найгіршого випадку.

Глобальну пакетну зв'язність (ГПЗ) можна визначити як ймовірність безпомилкової передачі пакету від одного вузла усім іншим через МКД. Припускають, що МКД вже побудовано та зважено згідно з виразом (3). Оскільки сума ваг у МКД відповідає загальній ймовірності безпомилкової передачі пакету через це МКД, то ГПЗ може бути обчислена так:

$$U^{\text{аг}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [A']_{ij} W_{ij}. \quad (4)$$

Чим менше $U^{\text{аг}}$, тим більша ймовірність, що пакет буде безпомилково доставлений усім вузлам мережі.

Зв'язність найгіршого випадку (ЗНВ) визначають як найнижчу ймовірність безпомилкової передачі для будь-якого з'єднання МКД. Цей тип зв'язності частково відображає, наскільки «близько» мережа до того моменту, щоб бути розділеною навпіл. Обчислення цієї міри зв'язності еквівалентно простому пошуку гілки МКД найбільшої ваги, тобто

$$U^{\text{іа}} = \max_{[A']} W_{ij} \quad (5)$$

при $[A']_{ij} = 1 \forall i, j$.

Іншими словами, бажано, щоб $U^{\text{іа}}$ було якомога меншим.

Нехай задано: множина наземних вузлів V_i , $i = \overline{1, N}$, де N — кількість наземних вузлів (МА), розосереджених у деякій зоні r, i^2 ; множина БПЛА B_j , $j = \overline{1, K}$, де K — кількість БПЛА; $R = \text{const}$ — радіус зони покриття кожного БПЛА (якщо вони знаходяться на однаковій висоті H відносно земної поверхні), м; $(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), S_{0j}$, $j = \overline{1, K}$ — координати розміщення та швидкість руху БПЛА (отримані через GPS); $(x_i, y_i), S_i$, $i = \overline{1, N}$ — координати розмі-

щення та швидкість руху наземних вузлів по земній поверхні (отримані через GPS). Будемо вважати, що всі МА знаходяться на однаковій висоті відносно земної поверхні.

Задачу знаходження координат розміщення множини БПЛА у просторі $(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), S_{0j}$, $j = \overline{1, K}$, розв'язують за допомогою мінімізації цільової функції зв'язності U .

$$\min_{(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), j = \overline{1, K}} U \quad (6)$$

Для розв'язання задачі переміщення БПЛА знаходять величину та напрямок швидкості переміщення кожного з множини БПЛА, в якому приріст цільової функції зв'язності ΔU буде максимальним:

$$\max_{S_{0j}, j = \overline{1, K}} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta t}, v_{\min} \leq \|S_{0j}\|^2 \leq v_{\max}^2, \quad (7)$$

де

$$\Delta U = U(x_{0j}(t + \Delta t), y_{0j}(t + \Delta t)) - U(x_{0j}(t), y_{0j}(t)),$$

де $t, t + \Delta t$ — поточний та наступний момент часу; v_{\min}, v_{\max} — мінімальна та максимальна швидкості переміщення БПЛА.

Для початку припускається, що в межах короткого періоду часу dt мережа й топологія МКД не змінюються. Рух БПЛА буде впливати тільки на ваги, ліній з'єднань з ним та МА. Визначимо набір вузлів, які з'єднані з БПЛА як V . БПЛА необхідно контролювати тільки прилеглі вузли в V . Градієнт для корисної зміни цільової функції зв'язності може бути написаний як:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} (U(D_{ij}^*) - U(D_{ij})); \quad (8)$$

$$D_{ij} = \|x_i + zy_i + S_i dt - x_j - zy_j - S_j dt\|^2.$$

Оскільки БПЛА перебуває в повітрі, нам необхідно розглядати проблему обмеження швидкості. Якщо градієнт у (8) маленький, з'єднані вузли повільно переміщуються, то БПЛА не повинен змінювати положення.

Під дією цієї умови, БПЛА повинен літати по малому колу над точкою Штейнера. Коли градієнт є досить великим, політ БПЛА повинен відбуватися проти напрямку градієнта зі швидкістю, пропорційною величині градієнта. Коли градієнт занадто великий, БПЛА може летіти тільки в напрямку градієнта з його максимальною швидкістю V_{\max} .

Визначення радіусу зони покриття однієї аероплатформи

Радіус зони покриття аероплатформи може бути визначений через параметри кривини поверхні зони покриття: довжину дуги, яка відображає випуклість поверхні зони покриття R_1 ,

довжину хорди, яка стягує цю дугу R_2 , відстані від точки Штейнера до границі зони видимості $R_{\text{П}}$, через припущення повністю «плоскої» поверхні зони обслуговування, коли її радіус визначається за допомогою відомих співвідношень прямокутного трикутника.

Зону покриття однієї чарунки можна розглядати у вигляді трьох концентричних кіл, показаних на рис. 2:

— середнє коло визначає зону дії ТСА при нерухомому розміщенні аероплатформи в центрі чарунки;

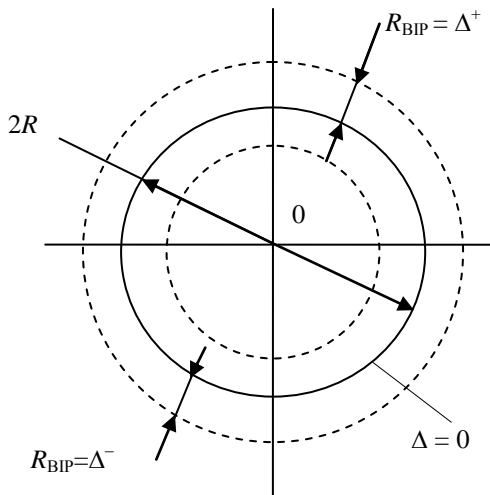


Рис. 2. Зони покриття одночарункової структури ТСА

— зовнішнє коло створюється в результаті збільшення кута нахилу антени при відході аероплатформи від центральної точки чарунки (точки Штейнера) на $\Delta = R_{\text{ВІР}}$ при баражуванні БПЛА по колу радіусом $R_{\text{ВІР}}$, який визначається відомою формулою

$$R_{\hat{A}^2D} = \frac{V_{\hat{A}^2D}^2}{g \sqrt{\left(\frac{1}{\cos \gamma}\right)^2 - 1}} \quad (9)$$

територія, отримана перетином середнього і внутрішнього кіл є зоною невпевненого прийому;

— внутрішнє коло визначає зону впевненого прийому, і власне, формує реальну зону дії ТСА з рухомою аероплатформою.

У праці [10] проведено дослідження, які доводять, що при застосуванні стандарту IEEE 802.11 для створення бездротових мереж, максимальна дальність між абонентами, за умов прямої видимості, становить 6 км. Виходячи з цього оптимальна похила дальність від аероплатформи до границі зони становить 5 км.

Отже, на основі вищесказаного, застосовуючи тригонометричні перетворення та обмеження на

мінімальний кут місця абонентського терміналу при формуванні зони обслуговування, можна визначити обмеження для розміщення аероплатформи по висоті, а також діаметр зони дії ТСА при нерухомій аероплатформі (км):

$$1,4 \leq h \leq 1,7 \quad 2R = 9,2 \text{ км}.$$

Вплив відходу головної осі діаграми напрямленості бортової антени аероплатформи на параметри просторового руху аероплатформи

Під час баражування БПЛА змінює своє положення в рамках визначеної кубічної зони, при цьому головна вісь ДН бортової антени відхиляється від визначеного напрямку в деяких межах, що в свою чергу впливає на якість зв'язку з АТ, у якої антена система не має спеціальних юстувальних механізмів для компенсації цієї девіації.

Для оцінки впливу відходу головної осі ДН бортової антени на параметри руху БПЛА, необхідно побудувати наближену модель баражування аероплатформи над точкою Штейнера.

На рис. 3 представлено розміри і координати положення аероплатформи і точки Штейнера у загальному випадку.

Тут H — висота розміщення аероплатформи над рівнем моря; h — відстань між початковою точкою $(0, 0, 0)$ і аероплатформою; θ_s — кут піднесення (місця); θ' — кут між лініями L і d .

Аероплатформа розміщується на висоті 1,7 км над рівнем моря в межах своєї зони позиціонування (утримання), яка може бути представлена у вигляді внутрішньої зони паралелепіпеда, який має довжину ребер $2\Delta h$ та $2\Delta^+ = 2\Delta^- = 2R_{\text{ВІР}}$.

Застосування моделі паралелепіпеда для формування просторової зони місцезнаходження аероплатформи дає змогу достатньо просто отримати кут девіації в найгіршому випадку (при максимальному відхиленні) [1].

У випадку, коли позиція точки Штейнера $(d \cos(\delta), d \sin(\delta), 0)$ збігається з точкою $(0, 0, 0)$, кут девіації φ_{S1} у найгіршому випадку від переміщення БПЛА по колу може бути визначений як:

$$\varphi_{S1} = \arccos \left(\frac{h + \Delta h}{\sqrt{(h + \Delta h)^2 + 2R_{\hat{A}^2D}^2}} \right). \quad (10)$$

Для забезпечення руху аероплатформи по колу радіусом $R_{\text{ВІР}}$ зі сталою висотою, необхідно щоб БПЛА рухався без ковзання з заданим кутом крену γ .

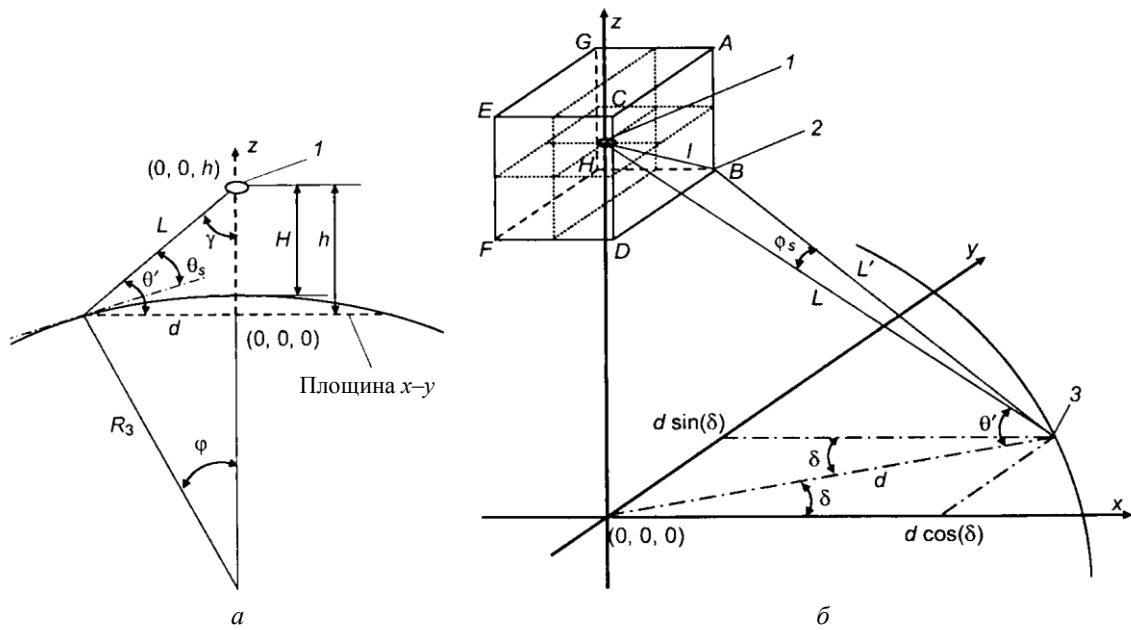


Рис. 3. Геометричне представлення положення аероплатформи і точки Штейнера:
 а — вертикальний переріз; б — представлення зони девіації аероплатформи;
 1 — референтне положення аероплатформи (0, 0, h); 2 — позиція аероплатформи при максимальному зсуві (x', y', h + Δh); 3 — позиція точки Штейнера

Оскільки антена на борту БПЛА закріплена жорстко без використання юстувального механізму (для мінімізації ваги конструкції), то кут крену γ буде вносити додаткову складову φ_{S2} у загальний кут девіації головної осі ДН бортової антени, а саме $\varphi_{S2} = \gamma$. Результуючий кут девіації φ_S осі головного пелюстка ДН бортової антени виражається як сума кутів φ_{S1} і φ_{S2} . Враховуючи формули (10) та (11), вираз для визначення результуючого кута девіації φ_S , залежно від радіусу баражування $R_{ВІР}$, та зміни висоти польоту аероплатформи Δh , може бути записаний як:

$$\varphi_S = \arccos\left(\frac{h + \Delta h}{\sqrt{(h + \Delta h)^2 + 2R_{АД}^2}}\right) + \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{\frac{V^2}{R_{АД}^2 g^2} + 1}}\right). \quad (11)$$

Варіації коефіцієнта підсилення (КП) бортової антени внаслідок руху аероплатформи можуть бути розраховані з ДН для конкретного кута девіації.

На рис. 4 зображено ДН бортової антени. Для забезпечення необхідної якості обслуговування абонентів, які розміщені в зоні покриття аероплатформи, необхідно щоб зміна коефіцієнта підсилення $КП/КП_{\max}$ була не менше — 3 дБ.

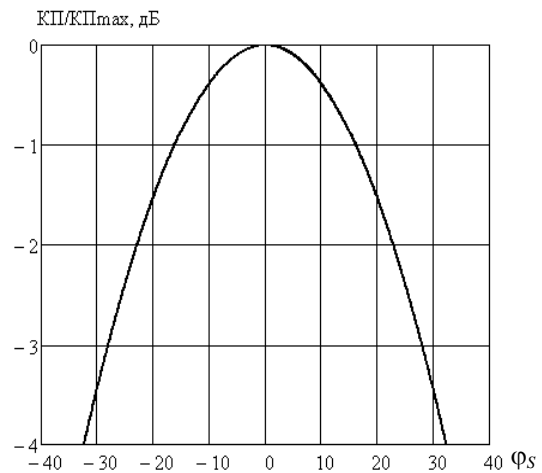


Рис. 4. ДН бортової антени аероплатформи

На рис. 5 зображено залежність кута девіації осі головного пелюстка ДН бортової антени від радіуса розвороту БПЛА при швидкості польоту $v = 23$ м/с, висоті $h = 1700$ м та максимальному відхиленні по висоті $\Delta h = 300$ м.

З графіку видно, що мінімальний радіус розвороту становить $R_{ВІР\min} = 160$ м, а максимальний $R_{ВІР\max} = 340$ м; оптимальний радіус розвороту становить $R_{ВІР\opt} = 230$ м, при мінімально можливому куті девіації $\varphi_{S\min} = 26,3^\circ$.

Отже, використовуючи вираз (9), мінімальний кут крену БПЛА становитиме $\gamma_{\min} = 9,026^\circ$, максимальний кут крену $\gamma_{\max} = 18,65^\circ$, а оптимальний кут крену, при якому забезпечується мінімальний кут девіації ДН, буде $\gamma_{\opt} = 13,2^\circ$.

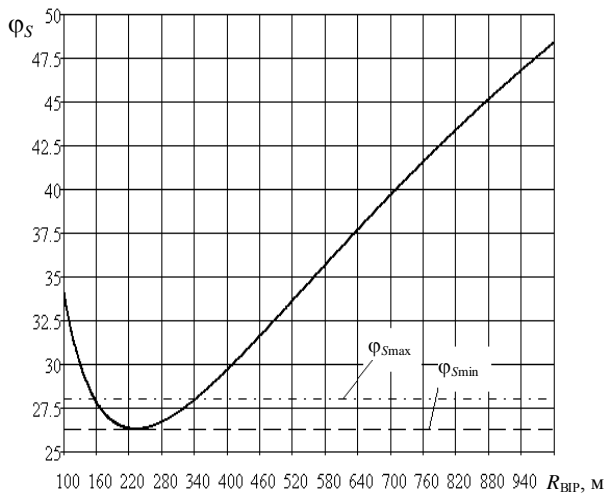


Рис. 5. Залежність кута девіації ДН бортової антени від радіусу розвороту БПЛА

Аналізуючи вираз (11), можна зробити висновок, що залежність кута девіації φ_{S1} від радіусу розвороту аероплатформи має лінійний характер.

Беручи до уваги те, що максимальний кут девіації φ_{Smax} має становити не більше 28° , а також вище сказане, робимо висновок, що максимальний кут тангажу не повинен перевищувати 15° .

Висновки

Аналіз впливу маневрів БПЛА на характеристики телекомунікаційної мережі дав можливість вибрати оптимальний алгоритм розміщення та переміщення БПЛА в просторі, таким чином, щоб забезпечити поліпшення глобальної зв'язності БЕМ та зв'язності найгіршого випадку. Даний алгоритм надає можливість визначення оптимальних для забезпечення зв'язності мережі координат розміщення БПЛА та вектора швидкості аероплатформи у випадку переміщення точки Штейнера.

Проведення аналізу залежності показників якості зв'язку від параметрів руху аероплатформи дало змогу визначити радіус зони покриття, а також мінімальну та максимальну висоту польоту БПЛА. Аналізуючи графіки залежності кута девіації бортової антени та графік залежності коефіцієнта підсилення, було визначено обмеження на параметри руху БПЛА, а саме мінімальний та максимальний кути крену та тангажу, при дотриманні яких забезпечується необхідний рівень якості зв'язку в зоні покриття

ЛІТЕРАТУРА

1. Ильченко М. Е. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ / М. Е. Ильченко, С. А. Кравчук. — К. : Наук. думка, 2008. — 580 с.

2. Міночкін А. І. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення / А. І. Міночкін, В. А. Романюк // Збірник наукових праць № 2. — К. : ВІПІ НТУУ «КПІ». — 2005. — С. 83—90.

3. Давыдов А. В. Улучшенная оценка вероятности пакетной ошибки сверточных кодов в релейском канале с независимыми замираниями / А. В. Давыдов, А. А. Ломаев // Труды Научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 7 мая, 2005 г.). — Нижний Новгород : ННГУ, 2005. —

Т. 1. — С. 194—195.

4. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис: пер. с англ. / под ред. Д. Д. Кловского. — М. : Радио и связь, 2000. — 800 с.

5. Han Z. Smart deployment/movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET / Z. Han, A. L. Swindlehurst and K. J. R. Liu // in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf., 2006. — P. 252—257.

6. Beard R., Kingston D., Quigley M., Snyder D., Christiansen R, Johnson W., Mclain T., Goodrich M. Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed Wing UAVs // AIAA Journal of Aerospace Computing, Information and Communication. — V. 2, no. 1, January 2005. — P. 92—108.

7. Wieselthier J. E., Nguyen G. D., Ephremides A. On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks // in Proc. IEEE INFOCOM (Tel-Aviv, Israel, Mar. 2000). — V. 2. — P. 585—594.

8. Dousse O., Thiran P., Hasler M. Connectivity in ad-hoc and hybrid networks // in Proc. INFOCOM (New York, Jun. 2002). — P. 1079—1088.

9. Li N., Hou J. C. Improving connectivity of wireless ad hoc networks // in Proc. 2nd Annu. Int. Conf. MobiQuitous (San Diego, CA, Jul. 2005). — P. 314—324.

10. Leung K. K., Clark M. V., McNair B., Kostic Z., Cimini L. J., Winters J. H. Outdoor IEEE 802.11 cellular networks: radio and MAC design, and their Performance // IEEE International Conference on Communications 2002 (ICC 2002). — V. 1, April 2002. — P. 512—516.