

УДК 621.396

С. В. КОЗЕЛКОВ, доктор техн. наук, професор;

К. П. СТОРЧАК, канд. техн. наук, доцент;

Н. В. КОРШУН, канд. техн. наук, доцент,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ СИНТЕЗУ РАДІОІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Одним із важливих завдань при розробці траєкторної радіоінтерферометричної системи є визначення методу траєкторних вимірювань космічних апаратів (КА). Саме такий метод і розглядається в цій статті. Ідеться про створення системи траєкторних вимірювань для підвищення точності прогнозування орбітально-траєкторних параметрів руху КА і підвищення якості його балістико-навігаційного забезпечення. Основу такої системи мають становити вимірювання, виконувані за допомогою двохелементного наземно-космічного радіоінтерферометра, що складається з наземного радіотехнічного комплексу управління (НРТКУ) та бортового радіотехнічного комплексу КА, який має бути розміщено на геостаціонарній орбіті. Пропонується отримувати поточні траєкторно-орбітальні дані щодо положення КА вимірюванням крос-кореляційної функції радіосигналу КА та оцінюванням її основних параметрів, необхідних для розв'язання навігаційної задачі. Пропонується здійснювати траєкторні вимірювання КА, використовуючи опорні космічні джерела, астрономічне місце розташування яких відоме. Геометрична інтерпретація зазначеного методу спирається на подвійну різницю часу поширення радіосигналів від низькоорбітального КА, опорного КА і космічного джерела (КД) до приймальних пристроїв наземного радіотехнічного комплексу управління. Таким чином, у наведеному методі траєкторних вимірювань використовуються диференціальні спостереження КА на тлі КД, що перебувають на близькій кутовій відстані, а вимірюваними є різниці частот інтерференції та групових затримок. При цьому існує можливість отримання траєкторно-орбітальної інформації про КА за будь-якими радіосигналами, що він їх випромінює.

**Ключові слова:** космічний апарат; наземний радіотехнічний комплекс управління; метод траєкторних вимірювань; радіоінтерферометр з наддовгою базою.

### Вступ

При розробці систем високої складності постає низка принципів питань, розв'язання яких визначає зовнішні обриси такої системи та можливості її розвитку.

З огляду на особливості розв'язання навігаційної задачі при управлінні КА в умовах обмежених географічних можливостей, коли йдеться про розміщення тільки одного наземного радіотехнічного комплексу (РТК), метод траєкторних вимірювань КА має забезпечити розміщення пунктів просторово-часових вимірювань КА, геометричну інтерпретацію цих вимірювань, аналіз методичних особливостей обробки даних при цьому інформації, а також вибір засобів для радіотехнічної реалізації зазначених вимірювань.

### Основна частина

Основу пропонованого методу траєкторних вимірювань КА становлять радіоінтерферометричні вимірювання з наддовгою базою (РНДВ). При цьому як база вимірювань використовується відстань між наземним РТК і бортовим РТК опорного КА, що постійно перебуває в зоні видимості наземного РТК. Реалізація бортового РТК може являти собою систему КА, розташованих на високовитягнутій еліптичній орбіті ( $H = 200\,000$  км), або систему КА, розташованих на геостаціонарній орбіті ( $H = 36\,000$  км). Геометрична інтерпретація пропонованого методу траєкторних вимірювань спирається на подвійну різницю часу поширення радіосигналів від КА, опорного КА і опорного КД (див. рисунок).

Тоді РНДВ-вимірювання можна подати у вигляді

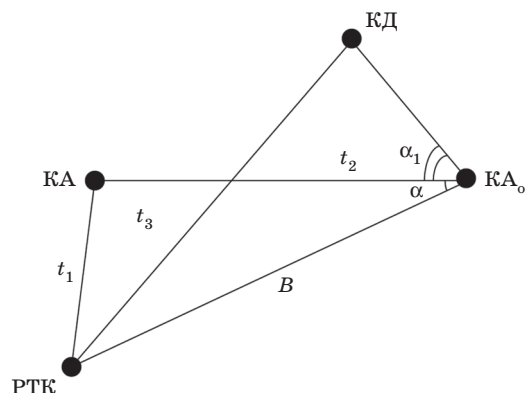
$$JF_{КА} - JF_{КА0} = (t_1 - t_2) - (t_3 - t_4),$$

де  $JF_{КА} = t_1 - t_2$  — різниця часу поширення радіосигналу від наземного РТК до вимірюваного КА і від вимірюваного КА до опорного,

$$t_1 - t_2 = \frac{B \cos \alpha}{c},$$

де  $\alpha$  — кут між базою  $B$  вимірювань і напрямом на вимірюваний КА;

$c$  — швидкість світла,  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  м/с;



Геометрична інтерпретація траєкторної радіоінтерферометричної системи

$JF_{\text{КА0}} = t_3 - t_4$  — різниця часу поширення радіосигналу від наземного РТК до опорного КД і від опорного КД до опорного КА,

$$t_3 - t_4 = \frac{B \cos(\alpha - \alpha_1)}{c},$$

де  $\alpha_1$  — кут між напрямом від опорного КА до вимірюваного КА і напрямом від опорного КА до опорного КД.

Із достатнім ступенем точності для вимірювань  $JF$  справджується рівність

$$JF = -\frac{B}{c} \sin \alpha \alpha_1. \quad (1)$$

Тоді співвідношення для визначення кутового нахилу КА відносно опорного КА (у проекції на базу) набуває вигляду

$$\alpha_1 = -\frac{cJF}{B \sin \alpha}. \quad (2)$$

Із (2) випливає, що помилка вимірювання кута  $\alpha_1$  пропорційна до помилки вимірювання  $JF$  і при заданій його точності буде тим менша, чим більше значення  $B \sin \alpha$ . Для отримання найкращих точнісних характеристик траєкторних вимірювань КА бажано, щоб база  $B$  і кут  $\alpha$  були якомога більші.

З огляду на місцезнаходження опорного КА на геостаціонарній орбіті запропонований метод траєкторних вимірювань забезпечує базу вимірювань, яка значно перевищує максимально можливу базу вимірювань у тому разі, коли для РНДБ-вимірювань використовуються тільки наземні РТК.

Якщо траєкторні вимірювання проводити за наявності однієї бази, то область локалізації КА на небесній сфері подається смугою, ширина якої визначається помилкою  $\alpha_1$  (уздовж розташування проекції бази). У разі використання двох перетинних баз як другу базу можна взяти відстань від наземної РТК до опорного КД або опорного КА. Тоді локалізація об'єкта вимірювань визначається перетином зазначених смуг.

Нехай  $\alpha_1, \alpha_2$  — помилки вимірювання кутового положення КА відповідно на першій і другій базі,  $\alpha_3$  — кут перетину напрямів цих баз. Тоді максимальні відстані між межами області локалізації, відлічуваними по двох ортогональних напрямках (якщо напрям  $\alpha_1$  вважати першим), визначаються так: по першому напрямку маємо  $\alpha_1$ ; по другому напрямку дістаємо  $[\alpha_1 + \alpha_1 \cos \alpha_3] / \sin \alpha_3$ .

Мінімальна невизначеність області локалізації КА по обох напрямках буде в разі ортогональності напрямів баз, тобто при  $\alpha_3 = \pi/2$ .

РНДБ-вимірювання з двох перетинних баз, що дають кутове положення об'єкта на небесній сфері, доповнюються вимірюванням третьої координати — дальністю до КА. Звідси випливає цінне для практики експлуатації космічних систем (КС) повне просторове визначення КА. У граничному варіанті використання результатів навіть двох таких трійок вимірювань дозволяє розв'язати навігаційне завдання управління.

Ґрунтуючись на РНДБ-спостереженнях сигналу, що його випромінює КА, можна виміряти його крос-кореляційну функцію та оцінити її основні параметри, необхідні для розв'язання навігаційного завдання [1]: фазу  $\Phi(t, f)$  та частоту  $f_u = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{dt}$  інтерференції, де  $t$  — час,  $f$  — частота вхідного сигналу, а також групову геометричну затримку  $\tau_g$ .

Розглянемо випадок РНДБ-вимірювань, коли в діаграму спрямованості двохелементного інтерферометра потрапляє тільки одне точкове джерело.

Формальна помилка  $\sigma_\tau$  вимірювання групової геометричної затримки залежить від середньоквадратичної синтезованої смуги частот  $\Delta V_e$  і відношення сигнал/шум  $h_{\text{КР}}$  на виході корелятора

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi \Delta V h_{\text{КР}}}. \quad (3)$$

Тут  $\Delta V_e = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k V_i^2}$  — середньоквадратичне значення смуги частот для  $k$ -канального синтезу смуги сигналу на частотах  $V_i$ . Для одноканального прийому  $\Delta V_e = \frac{\Delta V}{\sqrt{12}}$ .

Відношення сигнал-шум на виході корелятора в загальному вигляді подається виразом [1; 2], в якому чисельник визначає сигнал, а знаменник — шум:

$$h_{\text{КР}} = \frac{\sqrt{T_{\text{AM}} T_{\text{AN}}} \int_{-\infty}^{\infty} H_m(\omega) H_n^*(\omega) d\omega}{\sqrt{(T_{\text{AM}} + T_{\text{SM}})(T_{\text{AN}} + T_{\text{SN}}) + T_{\text{AM}} T_{\text{AN}}} \sqrt{2\Delta V_{\text{LF}} \int_{-\infty}^{\infty} |H_m(\omega)|^2 |H_n(\omega)|^2 d\omega^2}}, \quad (4)$$

де  $T_{AM}, T_{AN}$  — еквівалентні шумові температури сигналу джерела на антенах  $m$  і  $n$ ;  
 $T_{SM}, T_{SN}$  — еквівалентні шумові температури антенно-приймального пристрою (АПП);  
 $H_m(\omega), H_n(\omega)$  — частотні характеристики фільтрів проміжної частоти;  
 $\Delta V_{LF}$  — ширина смуги частот низькочастотного фільтра на виході корелятора.  
 При  $T_A \ll T_S$  і  $2\Delta V_{LF} = 1/\tau_a$  дістаємо

$$h_{KP} = \sqrt{\frac{T_{AM}T_{AN}}{T_{SM}T_{SN}} \Delta V_{JF} \tau_a},$$

де  $\Delta V_{JF}$  — ширина прямокутної функції  $H_m(\omega)$  і  $H_n(\omega)$ .

Для випадку РНДБ-спостереження КА у виразах (3) і (4) величини  $\Delta V_e$  і  $h_{KP}$  пов'язані з квазідетермінованим сигналом, що його випромінює КА: монохроматичним, періодичним або псевдошумовим.

У загальному вигляді завдання РНДБ-вимірювань КА аналогічне завданню спектральних радіоінтерферометричних вимірювань, оскільки спектр потужності сигналу КА обмежений і не має постійної спектральної густини, як у разі КД із суцільним рівномірним спектром у робочому діапазоні частот. У зв'язку з цим методика вимірювання частоти інтерференції та геометричної групової затримки для КА потребує уточнення, оскільки фазовий спектр комплексного крос-кореляційного спектра, за нахилом якого визначається групова затримка, не може бути просто апроксимований прямою лінією і є складною функцією частоти.

Важливим новим чинником, що впливає на точність вимірювань, є стабільність бортового генератора, що, як правило, на 2-3 порядки гірша за стабільність наземних водневих генераторів [3; 4]. Зміни частоти бортового генератора в часі обмежують застосування частотно-інтерференційного методу РНДБ-вимірювань.

Залежності відношення сигнал-шум на виході корелятора  $h_{KP}$  і виході антенно-фідерного тракту КА  $h_{KA}$  для однакових антен і приймальних систем спростяться і визначатимуться виразами [3]:

$$h_{KP} = \frac{\frac{\sqrt{\Lambda}}{\sqrt{\Lambda_1 \Lambda_2}}}{\sqrt{2(N\Lambda + 1) + \frac{1}{N\Lambda}}} \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}, \quad (5)$$

$$h_{KA} = \frac{\sqrt{\Lambda}}{\sqrt{2 + \frac{1}{N\Lambda}}} \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a},$$

де  $\Lambda_2 = \frac{T_{AN}}{T_{SM}}$ . Для випадку  $\Delta f_p = \Delta JF$  при  $N = 1$  формули набирають такого вигляду:

$$h_{KP} = \frac{\sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}}{\sqrt{2\left(1 + \frac{1}{\Lambda}\right) + \frac{1}{\Lambda^2}}}, \quad (6)$$

$$h_{KA} = \frac{\sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}}{\sqrt{\frac{2}{\Lambda} + \frac{1}{\Lambda^2}}}. \quad (7)$$

Для сильного сигналу  $\Lambda \gg 1$

$$h_{KP} = \sqrt{\Delta V_{JF} \tau_a} \quad h_{KA} = \sqrt{N\Lambda_1 \Lambda_2} \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}.$$

У разі слабого сигналу дістаємо приблизно однакові оцінки відношення сигнал-шум

$$h_{KP} = \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a} \quad h_{KA} \approx \sqrt{2\Delta V_{JF} \tau_a}. \quad (8)$$

Скориставшись методом найменших квадратів (МНК), можна оцінити групову затримку добром прямої лінії по точках фазового спектра взаємної кореляційної функції. Помилка затримки визначається виразом (3) для випадку поодинокій смуги ( $\Delta V_1 = \Delta f_e/12$ )

$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{3}}{\pi h_{KP} \Delta f_e}. \quad (9)$$

Якщо спектр сигналу КА має  $K$  ділянок у смузі робочих частот, наприклад центральну частоту і кілька підносійних, можна здійснити синтез смуги частот, як це робиться на базі технологій Mark-3 і Mark-4 [2; 3]. У такому разі помилка оцінки затримки визначається виразом

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sqrt{3}}{\pi h_{\text{КР}} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K V^2}}, \quad (10)$$

де  $h_{\text{КР}}$  — середньоквадратичне відношення сигнал-шум у сумарній енергетичній смузі частот сигналу КА,  $h_{\text{КР}} = \sqrt{\sum_{i=1}^K h_{\text{КР}i}^2}$ .

Порівнявши вирази, якими подається відношення сигнал-шум для випадків РНДБ-спостережень КА і КД, можемо згідно з (5) і (6) знайти відношення  $\mu$  відповідних величин при однакових значеннях  $\Lambda$ :

$$\mu = \frac{h_{\text{КА}}}{h_{\text{КД}}} = \sqrt{\frac{2(N\Lambda)^2}{2N\Lambda + 1} + 1}.$$

Аналізуючи останню формулу, бачимо, що при  $N\Lambda = 1$  значення  $\mu = \sqrt{\frac{5}{3}}$ , тобто досягається методичний виграш стосовно відношення сигнал-шум.

При  $N\Lambda \ll 1$ , маємо  $\mu \approx 1 + (N\Lambda)^2$ .

При  $N\Lambda \gg 1$  виграш  $\mu \approx 1 + \sqrt{N\Lambda}$  значний. Отже, у такому разі узгоджена фільтрація сигналу з КА за допомогою кореляційного спектрального аналізу доцільна.

Якщо окремі ділянки сигналу  $\Delta f_E$  рівні між собою, а  $T_{\text{АЕ}}(V_i) = \text{const}$ , то  $h_{\text{КР}} = h_{\text{КР}i} \sqrt{K}$ . При цьому (10) набирає вигляду [2; 3]:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{2\pi\Delta V_i h_{\text{КР}i} \sqrt{K}}. \quad (11)$$

Аналогічно, скориставшись МНК, можна оцінити частоту інтерференції шляхом добору прямої лінії по точках, рівномірно рознесених за часом вимірювання фази. У такому разі формальна помилка вимірювання оцінки визначається виразом [2; 3]:

$$\sigma_f = \frac{1}{2\pi h_{\text{КР}i} \sqrt{\sum_{i=1}^K t_i^2}}. \quad (12)$$

Беручи до уваги, що  $\sum_{i=1}^K t_i^2 = \frac{1}{T} \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} t^2 dt = \frac{\tau_a^3}{12T} = \frac{K_t \tau_a^3}{12}$ , де  $T$  — інтервал вимірювань, дістаємо [2; 3]

$$\sigma_f = \frac{\sqrt{3}}{\pi h_{\text{КР}} \tau_a \sqrt{K_t}}.$$

Розглядаючи квазідетермінований сигнал, у виразах для  $\sigma_{\tau}$  і  $\sigma_f$  слід брати значення  $h_{\text{КР}}$  згідно з формулою (5).

У разі диференціального методу спостережень КА на тлі КД, що перебувають на близькій кутовій відстані, вимірюваними величинами є різниці частот інтерференції та групових затримок.

Для досягнення найвищої точності кутових вимірювань, які спираються на використання опорних квазарів, необхідно виконати умови

$$\sigma_{\tau\text{КД}}^2 \ll \sigma_{\tau\text{КА}}^2, \quad \sigma_{f\text{КД}}^2 \ll \sigma_{f\text{КА}}^2. \quad (13)$$

При цьому помилки диференціальних вимірювань визначатимуться тільки помилками вимірювань із застосуванням КА, тобто [2; 3]

$$\sigma_{\tau\text{КД}}^2 \approx \sigma_{\tau\text{КА}}^2, \quad \sigma_{f\text{КД}}^2 \approx \sigma_{f\text{КА}}^2.$$

Зауважимо, що в разі РНДБ-вимірювань квазідетермінованих періодичних сигналів порушення умови вибору часу інтеграції, де  $T_{\text{КА}}$  — період повторення сигналу КА, призводитиме до флуктуацій сигналу на виході корелятора. Це, у свою чергу, підвищить шумову температуру вхідних радіопристроїв і знизить завадостійкість РТК.

А в тих випадках, коли період повторення сигналу набагато більший від періоду спостереження (скажімо, для Р-коду КНС ГЛОНАСС і GPS) або псевдовипадкова послідовність не повторювана, як, наприклад, сигнал неконтрольованого випромінювання (НКВ), необхідно застосовувати нормування крос-спектра потужності, використовуючи дані автокореляційного спектра, як для випадку спектральних РНДБ-спостережень [2]. У разі великого відношення сигнал-шум  $h_{\text{КР}}$  можна отримати значний виграш щодо крос-спектра кореляції, нормованого на автокореляційний спектр [2; 3].

Вираз (10) визначає формальну помилку вимірювання затримки з використанням синтезу смуги сигналу КА. Аналіз цього виразу дозволяє дійти висновку, що коли задано вимоги стосовно  $\sigma_r$ , можна сформулювати широкий клас сигналів із борту КА, які в необхідних співвідношеннях інтенсивності та форми спектра задовольняють задані умови щодо точності. Таким чином, будь-які сигнали, що їх випромінює КА, можуть бути використані для РНДБ-вимірювань. Послідовна зміна режимів модуляції бортового передавача спонукає до адаптивного узгодженого прийому та обробки, що уможливають зрештою безперервний супровід КА. Тоді відпадає, зокрема, потреба формувати спеціалізовані бортові сигнали для проведення сеансів навігаційних РНДБ-вимірювань.

### Висновки

Для подальшого підвищення точності прогнозування орбітально-траєкторних параметрів руху КА і підвищення якості балістико-навігаційного забезпечення управління ними доцільно зосередити зусилля на створенні принципово нової траєкторної системи. Основу такої системи мають становити вимірювання, виконані за допомогою двохелементного наземно-космічного радіоінтерферометра. Одна його частина — це НРТКУ, а друга — бортовий радіотехнічний комплекс КА. Його планується розмістити на геостаціонарній орбіті, аби поточні траєкторно-орбітальні дані про положення КА отримувати за результатами вимірювань крос-кореляційної функції радіосигналу КА та оцінювання її основних параметрів, необхідних для розв'язання навігаційної задачі. Траєкторні вимірювання стосовно КА запропоновано здійснювати з використанням опорних космічних джерел, астрономічне місцезнаходження яких відоме.

Геометрична інтерпретація даного методу унаочнює взаємозв'язок часу поширення радіосигналів від низькоорбітального КА, опорного КА і КД до приймальних пристроїв наземного радіотехнічного комплексу управління. Таким чином, наведений метод траєкторних вимірювань спирається на диференціальні спостереження за поведінкою КА на тлі КД, що перебувають на близькій кутовій відстані один від одного, а вимірюваними є різниці частот інтерференції та групових затримок.

Важливо, що отримати траєкторно-орбітальну інформацію про КА можна за будь-якими радіосигналами, що їх випромінюють КА, зокрема й сигналами неконтрольованого випромінювання.

### Список використаної літератури

1. Козелков С. В. Метод траекторных радиоинтерферометрических измерений космического аппарата // Информационные системы: сб. науч. тр. 1999. Вып. 1 (12). С. 146–151.
2. Козелков С. В. Модернизация навигационного планетного радиолокатора // Системы обработки информации. 1999. Вып. 2 (6). С. 62–165.
3. Козелков С. В., Козелкова К. С. Измерения орбитальных параметров КА наземным РТК // Системы обработки информации: сб. науч. пр. 2010. Вып. 2 (83). С. 100–102.
4. Сторчак К. П. Методи інформаційно-технологічної побудови супутникової системи збору та обробки даних // Зв'язок. 2017. № 6 (130). С. 31–34.

С. В. Козелков, К. П. Сторчак, Н. В. Коршун

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА СИНТЕЗА РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Одной из важных задач при разработке траекторной радиоинтерферометрической системы является определение метода траекторных измерений космических аппаратов (КА), который рассматривается в данной статье. Речь идет о создании системы траекторных измерений для повышения точности прогнозирования орбитально-траекторных параметров движения КА и улучшения качества баллистико-навигационного обеспечения. Основу указанной системы должны составлять измерения, полученные при помощи двухэлементного наземно-космического радиоинтерферометра, состоящего из наземного радиотехнического комплекса управления (НРТКУ) и бортового радиотехнического комплекса КА, который будет размещен на геостационарной орбите. Предлагается получать текущие траекторно-орбитальные данные о положении КА за счет измерений крос-корреляционной функции радиосигнала КА и оценки ее основных параметров, необходимых для решения навигационной задачи. Траекторные измерения КА будут проводиться с использованием опорных космических источников, астрономическое местоположение которых известно. Геометрическая интерпретация предложенного метода основана на двойной разности времени распространения радиосигналов от низкоорбитального КА, опорного КА и космического источника (КИ) в приемных устройствах наземного радиотехнического комплекса управления. Таким образом, в приведенном методе траекторных измерений используются дифференциальные наблюдения КА на фоне КИ, находящегося на близком угловом расстоянии, а измеряемыми есть разности частот интерференции и групповых задержек. Также существует возможность получения траекторно-орбитальной информации о КА по любым радиосигналам излучаемым КА.

**Ключевые слова:** космический аппарат; наземный радиотехнический комплекс управления; метод траекторных измерений; радиоинтерферометр со сверхдлинной базой.



S. V. Kozelkov, K. P. Storchak, N. V. Korshun

### DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL APPARATUS OF RADIOINTERFEROMETRIC COMPLEX SYNTHESIS

One of the important tasks in the development of the trajectory radio-interferometric system is the determination of the method of trajectory measurements of space vehicles (SV), which is considered in this article. The paper considers the development of a system of trajectory measurements to improve the accuracy of forecasting orbital trajectory parameters of spacecraft motion and improve the quality of ballistic-navigation support. The basis of such a system should be the measurements obtained by a two-element ground-space radiointerferometer, which consists of a ground-based radio-technical control complex (GBRTC) and an on-board radio-technical complex of spacecraft that will be placed in a geostationary orbit. It is proposed to obtain information on the current orbital-orbital data of the spacecraft position by measuring the crocheting function of the satellite radio signal and estimating its main parameters necessary for solving the navigation problem. It is proposed to carry out spacecraft trajectory measurements using reference space sources, whose astronomical location is known. The geometrical interpretation of the proposed method is a double difference in the propagation time of radio signals from a low-orbit spacecraft, a reference spacecraft and a space source (SS) in receiving devices of a ground-based radio-technical control complex. Thus, in this method of trajectory measurements, differential observations of a space vehicle on a background of space source at a close angular distance are used, and the differences in the frequencies of interference and group delays are measured. Also, it is possible to obtain orbit information about the spacecraft by any radio signals emitted by the spacecraft.

**Keywords:** spacecraft; ground-based radio-technical control complex; method of trajectory measurements; radiointerferometer with extra-long base.

УДК 621.396.4

Д. С. ГОРДЕЄВА, магістрант;

А. П. БОНДАРЧУК, канд. техн. наук, доцент,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ ЗА РАХУНОК МІКРОСТІЛЬНИКІВ

**Експоненціальне зростання мобільного трафіку даних, зумовлене впровадженням нового покоління безпроводових пристроїв, призвело до того, що стільникові мережі дедалі частіше стикаються з гострою проблемою, не маючи змоги задовольнити величезний попит на пропускну здатність мережі. Водночас потреба абонентів у все вищій швидкості передавання даних, як і постійно зростаюча кількість безпроводових користувачів — ось ті чинники, що зумовили небувале зростання обсягів споживання електроенергії та експлуатаційних витрат операторів стільникових мереж. Саме це спонукало до невідкладного створення енергоефективних телекомунікацій. Одним із нововведень у даній сфері є гетерогенні мережі — Heterogeneous Network (HetNet), в яких можуть бути використані стільники малої споживаної (мікро-, піко- та фемтостільники) потужності. У цій статті розглянуто накладання мікростільників на мережу, яка складається з макростільників, аби дослідити, як мікростільники впливають на поліпшення енергоефективності гетерогенної мережі. Описано основні параметри для аналітичного моделювання архітектури гетерогенної мережі, необхідні при виконанні розрахунків. Обчислено енергоефективність, яка враховує три аспекти впливу на неї: кількість мікростільників, їх радіус, а також відстань між сайтами макростільників. Окрім того, у пропонованій статті взято до уваги сценарій різної кількості користувачів у гетерогенній мережі. Це дозволило отримати найбільш оптимальний варіант щодо енергоефективності та визначити необхідні кількісні значення для радіуса мікростільника, кількості мікростільників, відстані між сайтами для макростільників. Було також побудовано графіки, які показують, що використання мікростільників доцільне за великої кількості користувачів. Адже мікростільники покращують також покриття мережі по краях макростільників і не повинні зазнавати простоїв, коли витрачається енергія мережі, але жодні функції стосовно її покриття не виконуються.**

**Ключові слова:** гетерогенна мережа; макростільник; мікростільник; енергоефективність; спектральна ефективність.

### Вступ

Неухильно зростаючий попит споживачів на послуги стільникових мереж змушує компанії вкладати великі кошти в розвиток ефективних технологій для задоволення цього попиту. Утім найбільш ефективні технології вимагають величезних потужностей та є надто енергомісткими. Тому останніми роками велика увага приділяється проблемі енергозбереження в індустрії телекомунікацій. Адже ця індустрія продукує відносно високі карбонові викиди, які ведуть до забруднення навколишнього середовища (2% всесвітніх викидів CO<sub>2</sub> походить від інформаційних і телекомунікаційних технологій [1]). Через це питання споживання енергії стало однією з головних проблем і дало початок новим дослідженням стосовно енергоефективних телекомунікацій, націленим на скорочення споживання енергії в телекомунікаційних системах із неодмінним досягненням високої швидкості передавання даних.

© Д. С. Гордеєва, А. П. Бондарчук, 2018