

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 CO₂ 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. Гордєєва, А. П. Бондарчук, 2018

Сьогодні головне нововведення являють собою гетерогенні мережі, які, використовуючи стільники малої споживаної потужності, покращують водночас покриття мережі.

З огляду на це актуальним є вирішення щодо використання мікростільників у мережі, яка складається лише з макростільників. При цьому досягається не тільки покращення покриття мережі, а й зменшення кількості використовуваної в ній енергії, тобто підвищення енергоефективності гетерогенної стільникової мережі.

Докладне висвітлення підходу до загальної проблеми енергоефективності можна знайти в [1; 2] та посиланнях на ці джерела.

В [1; 2] запропоновано, зокрема, три важливі групи аспектів щодо створення енергозберігаючих мереж: зміни в апаратній частині базових станцій (БС), гетерогенне планування мережі та проектування енергоефективної системи. Деякі джерела зосереджуються на можливостях заощадження енергії, які можуть з'явитися в результаті зміни в апаратній базі. Ці зміни поділяються на чотири частини: 1) використання більш ефективних підсилювачів потужності; 2) забезпечення взаємодії БС; 3) проектування самостійних оптимізованих БС; 4) використання відновлюваних джерел енергії.

Повертаючись до трьох щойно згаданих груп аспектів зі створення енергозберігаючих мереж, зауважимо, що перші дві групи не входять у сферу даної праці, а третя група включає в себе одне з найбільш перспективних вирішень проблеми енергоефективності безпроводових стільникових мереж: гетерогенне розгортання. У [3] енергоефективність досліджується по двох групах: енергоефективне управління радіоресурсами та стратегії розгортання мережі.

Отже, аспект, який буде розглянуто в цій праці, полягає в тому, аби отримати енергоефективність за допомогою гетерогенного планування мережі. Наприклад, ідея, запропонована в [4; 5], стосовно енергоефективності стільникової мережі, полягає в тому, щоб закрити невикористані вузли в однорідній макростільниковій мережі. Утім закриття макростільникових станцій не є справді практично виправданим підходом, оскільки існуватимуть мікростільники, які зовсім не використовуватимуться або їх використання буде непостійним, хоча всі вони матимуть статичну потужність, а отже, марно споживатимуть енергію мережі.

У [6] автори вивчають енергоспоживання гетерогенної стільникової мережі, що складається зі звичайних макро- та різної кількості мікростільників низької потужності. У зазначеній праці замість вирішення проблеми оптимізації автори чисельно оцінюють енергоспоживання мережі та обчислюють мінімальну передавану потужність за умов фіксованого охоплення стосовно відстані між сайтами — *Inter Site Distance (ISD)*.

У [7] докладніше досліджуються моделі споживання енергії різних типів БС.

Споживана потужність поділяється на дві частини: статичну і динамічну. Статична частина являє собою споживану потужність у порожній БС, а динамічна відповідає за споживання, пов'язане із формуванням трафіку.

У [8] на підставі спостережень, сформульовано важливий у практичному плані висновок: розгортання мікростільників може значно зменшити споживання енергії в зоні, якщо вони не накладаються один на одного.

Наголосимо, що всі наведені в списку літератури праці розглядають ту чи іншу форму обчислень, не розв'язуючи проблеми оптимізації енергоефективності (ЕЕ).

Література з питань оптимізації ЕЕ здебільшого обмежується оптимізацією за одним параметром. Наприклад, у [9] досліджено вплив кількості мікростільників на оптимальну ЕЕ. У [10] стверджується, що енергоспоживання можна зменшити за допомогою стратегічного сну, не створюючи «дірок» для покриття. В [11] проблему оптимізації розгортання стільникових мереж узято стосовно лише макростільників. У [12] кількість мікростільників та потужність передавання взято як параметри оптимізації, хоча потужність передавання зазвичай визначається попитом на трафік.

Мета цієї статті — забезпечити підвищення ЕЕ гетерогенної мережі з урахуванням впливу на ЕЕ параметрів мікростільникової мережі.

Основна частина

Далі досліджено розгортання гетерогенних стільникових мереж у плані оптимізації їх ЕЕ, а також розглянуто гексагональну сітку з макростільників, де кожний стільник зазнає завад від сусідніх стільників. Усі міркування здійснено за припущення про фіксоване обмеження покриття, яке гарантує, що певна мінімальна частка (у відсотках) гексагональної ділянки сайту буде покрита.

Наведена тут модель розгортання стільникової мережі відрізняється від більшості відомих моделей тим, що при розгортанні мікростільники накладаються на макростільники, забезпечуючи заощадження електроенергії. Адже радіус дії макростільників може зменшуватися завдяки тому, що кількість мікростільників збільшується.

Для розрахунку енергоефективності гетерогенної мережі спочатку необхідно ввести метрику.

Потужність споживання в тій чи іншій зоні не може повністю відбивати енергоефективність, оскільки ця потужність не враховує змін спектральної ефективності.

У цій праці відношення спектральної ефективності в зоні до споживання енергії в цій зоні виступає як *метрика енергоефективності*.

Узагальнену формулу для визначення ЕЕ можна подати у вигляді

$$EE = \frac{\text{Спектральна ефективність у зоні}}{\text{Споживана енергія в зоні}} = \frac{\sum S_i}{\sum P_i} = \frac{(\text{біт/с}) : (\text{Гц/км}^2)}{\text{Вт/км}^2} = (\text{біт/Дж}) : \text{Гц}, \quad (1)$$

де S_i — спектральна ефективність у зоні для i -ї БС; P_i — споживана енергія в зоні для i -ї БС.

Сума як у чисельнику, так і в знаменнику береться для того, щоб урахувати все покриття, створюване всіма БС у даній зоні обслуговування. Споживана енергія в зоні — це загальна потужність, яка споживається всіма БС. Спектральна ефективність — це загальна швидкість передавання даних у зоні, що припадає на певну ділянку, і пропускна здатність пристрою, забезпечувана всією базовою станцією в даній зоні обслуговування. Як впливає із загальної формули (1), спектральна ефективність вимірюється в $(\text{біт/с}) : (\text{Гц/км}^2)$, а енергія, споживана в цій зоні — у Вт/км^2 . Шляхом відповідних перетворень знайдемо, що одиницею виміру енергоефективності в цій статті виступає $(\text{біт/Дж}) : \text{Гц}$.

Модель споживання потужності

Для якомога точнішого аналізу енергоефективності в моделі споживання енергії необхідно врахувати потужність, що споживається на базових станціях для обробки та передавання сигналів, охолодження мережі тощо (окрім передаваної радіочастотної потужності). Чим детальніше буде змодельовано споживання енергії, тим точніший буде аналіз.

Для того щоб обчислити отриману на мобільних станціях потужність, розглянемо детерміністичні втрати на шляху, ефекти загасання та затінення. Сила P_{rx} прийнятого сигналу (у децибелах) подається як функція відстані r між передавачем і приймачем:

$$P_{rx}(r) = P_{tx} - PL(r) - \xi - \zeta, \quad (2)$$

де P_{tx} — потужність переданого сигналу; $PL(r)$ — втрати на шляху; ξ — змінна затінення; ζ — випадкова змінна загасання.

Для розрахунків покриття ми використовуємо міські макростільники та моделі втрат на шляху для мікросхем, які наведено в [1].

Потужність передавання радіочастоти становить лише частку від загальної потужності, споживаної БС. Для того щоб урахувати ефекти обробки сигналів основної смуги, передавання, охолодження тощо, розглянемо модель споживання енергії, яку наведено в [13]:

$$P_i = N_{tx_i} (P_{0,i} + \Delta_i P_{tx,i}), \quad 0 < P_{tx,i} \leq P_{\max,i}, \quad (3)$$

де $i = M$, $i = m$ — індекси, що стосуються відповідно макро- і мікростільників; N_{tx_i} — кількість приймально-передавальних кіл; $P_{0,i}$ — споживана потужність при нульовій радіочастотній вихідній потужності; Δ_i — приріст навантаження, який залежить від енергоспоживання; $P_{\max,i}$ — максимальний бюджет потужності БС.

Постійний член $P_{0,i}$ включає в себе потужність, споживану в БС за рахунок обробки сигналу, охолодження зворотного тракту тощо. Значення цих параметрів наведено в [13].

Використовуються моделі втрат на трасі для макро- і мікростільників, описані в [14].

Енергоефективність

Далі буде визначено енергоефективність як розв'язок задачі оптимізації за певними параметрами, такими як розмір і кількість мікростільників та відстані ISD між сайтами макростільників.

Задачу оптимізації сформулюємо в такий спосіб:

$$\text{максимізувати дробовий вираз} \quad \frac{S(R_M, r_m, ISD, N_m)}{P(R_M, r_m, ISD, N_m)} \quad (4)$$

за умов $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$,

тобто при виконанні таких обмежень:

$$C_1: 0 < ISD \leq 2000; C_2: R_M \leq ISD; C_3: 250 \leq r_m \leq 500; C_4: r_m \leq R_M; C_5: \alpha A_C \leq A;$$

$$C_6: S_{target} \leq S; C_7: R_M, r_m, ISD \in R; C_8: N_m \in Z.$$

Тут R_M, r_m — радіус відповідно макро- і мікростільника;

N_m — кількість мікростільників в одному сайті;

α — частка (у відсотках) цільової зони покриття;

A_C — загальна площа обслуговування;

A — загальна площа, покрита всіма макро- та мікростільниками;

S_{target} — спектральна ефективність мережі цільової зони покриття.

Важливо зазначити, що радіус макростільника не є незалежною змінною, а являє собою функцію від кількості мікростільників, їхнього радіуса, ISD та значення обмежень щодо покриття. Тут беремо як аргументи ISD і r_m , щоб вони підходили для комерційних мереж.

Розглядаючи взаємовплив сусідніх макростільників, достатньо задачу оптимізації (4) розв'язати для єдиного макростільника, розташованого в середині сайту. У цьому разі важливо відзначити одну й ту саму кількість мікростільників на один макростільник. Наприклад, це може бути вісім мікростільників, що припадають на один макростільник (рис. 1).

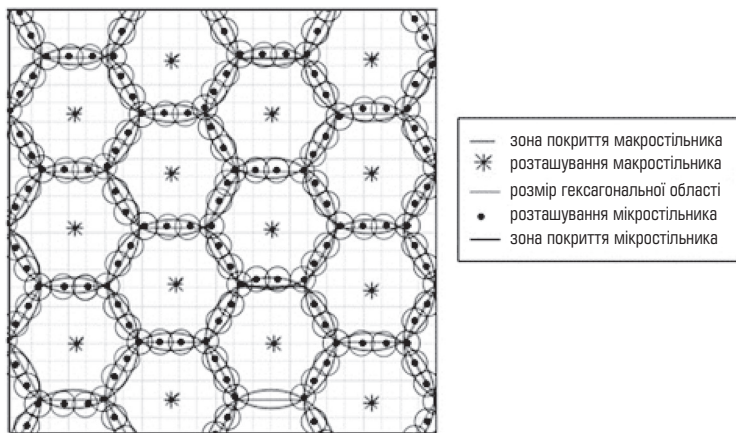


Рис. 1. Схема розташування восьми мікростільників на один макростільник

Розглянемо задачу оптимізації (4) докладніше.

Знаменник задачі оптимізації $P(R_M, r_m, \text{ISD}, N_m)$ визначається як загальна споживана потужність зони безпроводової стільникової мережі. Оскільки ми припускаємо повне навантаження, дістаємо:

$$P(R_M, r_m, \text{ISD}, N_m) = \frac{1}{A_C} \sum_{i=0}^{N_m} P_{i \text{ full load}},$$

де A_C — розмір однієї гексагональної клітинки;

$P_{0 \text{ full load}}$ — повне навантаження енергії споживання в зоні макростільника. Це навантаження можна розрахувати згідно з (3);

$P_{i \text{ full load}}, i = 1, \dots, N_m$ — повне навантаження енергії споживання в зоні мікростільника. Його також можна розрахувати згідно з (3).

Чисельник задачі оптимізації $S(R_M, r_m, \text{ISD}, N_m)$ можна подати у вигляді

$$S(R_M, r_m, \text{ISD}, N_m) = \sum_{i=0}^{N_m} S_i P_r(U_i > 0),$$

де S_0 — спектральна ефективність зони макростільника;

$S_i, i = 1, \dots, N_m$ — спектральна ефективність зони мікростільника;

U_i — кількість користувачів, які обслуговуються i -ю БС;

$P_r(U_i > 0)$ — імовірність такої події, що область обслуговування відповідної БС не є порожньою. Цю ймовірність можна розрахувати так:

$$P_r(U_i > 0) = 1 - P_r(U_i = 0) = 1 - \left(1 - \frac{A_i}{A_C}\right)^{N_u},$$

де A_i — розмір зони обслуговування i -ї БС.

Ми припускаємо, що є $N_u = \sum_i U_i$ користувачів, які рівномірно розподілені на сайті, причому N_u/A_C — це щільність користувачів.

Спектральна ефективність S_i області конкретної БС є загальною досяжною швидкістю передавання даних на одиницю площі, яку розраховано для окремих користувачів у зоні обслуговування цієї БС [15],

$$S_i = \frac{1}{A_C} \left[\sum_{u=i}^{N_i} \log_2(1 + \gamma_u(r_{ui})) \right],$$

де $\gamma_u(r_{ui})$ — відношення SINR сигналу до завад і шумів для користувача u ; r_{ui} — відстань від користувача u до i -ї БС.

Припускається універсальне повторне використання частоти. Іншими словами, усі сигнали від сусідніх макро- та мікростільників до БС сприяють рівню завад. У результаті можна визначити рівень SINR користувача u , якого обслуговує i -та БС, у такий спосіб:

$$\gamma_u(r_{ui}) = \frac{P_{rx,u}(r_{ui})}{\sum_{j \neq i} P_{rx,u}(r_{uj}) + P_N},$$

де $P_{rx,u}(r_{ui})$ — прийнятий рівень потужності від i -ї БС до користувача u , котрий можна розрахувати, використовуючи (3).

SINR — це випадкова величина, значення якої зумовлюється затіненням та швидким загасанням.

Використовуючи програмне забезпечення MATLAB, обчислюємо показники енергоефективності моделі розгортання гексагональної сітки у низхідних каналах за допомогою моделювання за методом Монте-Карло. Для ініціювання мережі генерується велика кількість рівномірно розподілених користувачів у зоні обслуговування.

Далі обчислюємо енергоефективність та спектральну ефективність мережі як функцію від ISD, кількості та радіуса мікростільників, а також щільності користувачів. Припускається, що обмеження покриття становить 95%. Вважається, що ISD між макростільниками становить 500...1500 м, що відповідає типовим розмірам макростільників.

Стосовно спектральної ефективності маємо обмеження до 10 (біт/с):(Гц/км²). Буде вирішено проблему при щільності 100 користувачів на кілометр квадратний.

З огляду на те, що кількість мікростільників є цілим параметром, ми розв'язуємо задачу оптимізації, охоплюючи низку підпроблем, з урахуванням фіксованої кількості мікростільників.

Залежність енергоефективності від кількості мікростільників, їхнього радіуса та ISD унаочнюють відповідно рис. 2-4.

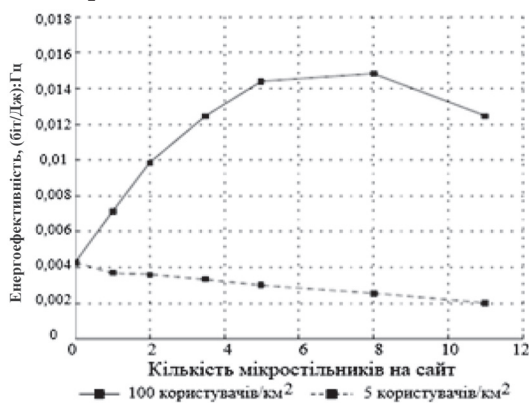


Рис. 2. Енергоефективність залежно від кількості мікростільників

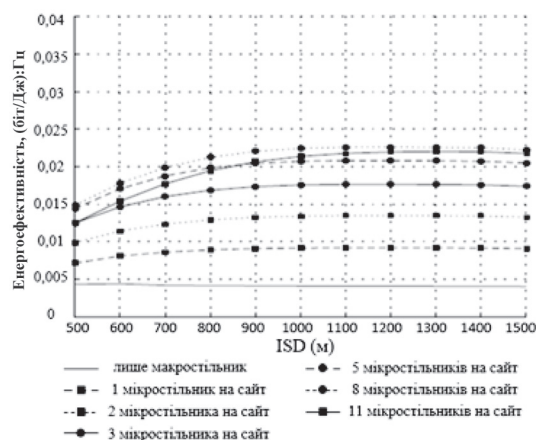


Рис. 4. Залежність енергоефективності від ISD

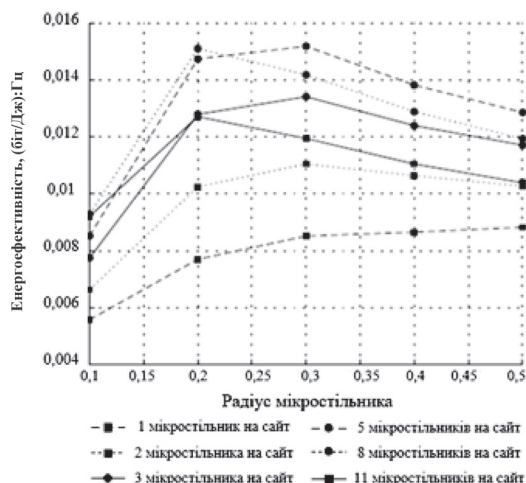


Рис. 3. Залежність енергоефективності від радіуса мікростільника

Отже, як показують графіки, найоптимальніший варіант стосовно енергоефективності в гетерогенній мережі включає в себе вісім мікростільників на макростільник, при розмірі мікростільника, що становить 20% від розміру шестикутника (сайту), коли ISD дорівнює 500 м.

Важливо зазначити, що вісім мікростільників на сайт не є довільним числом. Це мінімальна кількість мікростільників на сайті, які можуть бути розгорнуті навколо шестикутника без будь-яких розривів між мікроелементами та за повноцінного використання енергії.

Висновки

Проаналізовано вплив трьох головних складових гетерогенної мережі на її енергоефективність та визначено найоптимальніший варіант споживання енергії при фіксованих параметрах мережі.

Список використаної літератури

1. **3GPP TR 36.902 v1.2.0** *Self-configuring and self-optimizing network use cases and solutions (Release 9)*, Mar. 2011.
2. **Green raido: Radio techniques to enable energy-efficient wireless networks** / C. Han, T. Harold, S. Armour [a. o.] // *IEEE Communications Magazine*. 2011.
3. **A survey of energy-efficient wireless communications** / D. Feng, C. Jiang, G. Lim [a. o.] // *IEEE Communications Surveys Tutorials*. February 2012. P. 167–178.
4. **Energy savings for cellular network with evaluation of impact on data traffic performance** / K. Dufkova, M. Bjelica, Byongkwon Moon [a. o.] // *In Wireless Conference (EW), 2010 European*. April 2010. P. 916–923.
5. **Optimal energy savings in cellular access networks**. In *Communications Workshops, 2009. ICC Workshops 2009* / M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo and M. Meo // *IEEE International Conference*. June 2009. P. 1–5.
6. **Fehske A. J., Richter F. and Fettweis G. P.** *Energy efficiency improvements through micro sites in cellular mobile radio networks* // *Proceedings of IEEE GLOBECOM Workshops, November 30 – December 4, 2009, Honolulu, Hawaii, USA*. P. 1–5.
7. **Power Consumption Modeling of Different Base Station Types in Heterogeneous Cellular Networks** / O. Arnold, G. Richter, O. Fettweis, O. Blume // *Future Network and Mobile Summit, Technische Universitat Dresden*. 2010. P. 1–8.
8. **Demirtas M. and Soysal A.** *Energy and spectral efficient microcell deployment in heterogeneous cellular networks* // *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. May 2015.
9. **Energy efficiency in heterogeneous networks** / J. Tang, D. K. C. So, E. Alsusa [a. o.] // *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. June 2015.
10. **Energy efficient heterogeneous cellular networks** / Y. S. Soh, T. Q. S. Quek, M. Kountouris and H. Shin // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. May 2013. P. 840–850.
11. **Spectral and energy efficiency trade-offs in cellular networks** / D. Tsilimantos, J. M. Gorce, K. Jaffrs-Runser, and H. Vincent Poor // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Jan 2016. P. 54–66.
12. **Energy efficient base station deployment scheme in heterogeneous cellular network** / Q. Ren, J. Fan, X. Luo [a. o.] // *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. May 2015.
13. **How much energy is needed to run a wireless network?** / G. Auer, V. Giannini, C. Desset [a. o.] // *IEEE Wireless Communications*. October 2011. P. 40–49.
14. **Mahmut Demirtas, Alkan Soysal.** *Nonoverlay Heterogeneous Network Planning for Energy Efficiency* // *Wireless Communications and Mobile Computing Volume*. 2017. P. 11.
15. **Alouini M. S. and Goldsmith A.** *Area spectral efficiency of cellular mobile radio systems* // *IEEE 47th Vehicular Technology Conference*. 1997.

Рецензент: доктор техн. наук, ст. наук. співробітник М. М. Степанов, Державний університет телекомунікацій, Київ.

Д. С. Гордеева, А. П. Бондарчук

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ ЗА СЧЕТ МИКРОСОТ

С экспоненциальным ростом мобильного трафика данных, обусловленным внедрением нового поколения беспроводных устройств, сотовые сети сталкиваются с острой проблемой из-за невозможности удовлетворить огромный спрос на пропускную способность сети. В то же время потребность абонентов во все более высокой скорости передачи данных и постоянно растущее число беспроводных пользователей привело к небывалому росту потребления электроэнергии и эксплуатационных расходов сотовых сетей. Это дало толчок к созданию энергоэффективных телекоммуникаций. Одним из новшеств в данной сфере является гетерогенные сети — *Heterogeneous Network (HetNet)*, в которых могут быть использованы соты малой потребляемой мощности (микро-, пико- и фемтосоты). В данной работе рассмотрено наложение микросот на сеть, состоящую из макросот для того, чтобы исследовать, как микросоты способствуют энергоэффективности гетерогенной сети. Описаны основные параметры, необходимые для аналитического моделирования архитектуры гетерогенной сети и выполнения расчетов по энергоэффективности сети с учетом количества микросот, их радиуса, а также расстояния между сайтами макросот. В итоге удалось получить оптимальный по энергоэффективности вариант и показать, в каких случаях использование микросот дает требуемый эффект.

Ключевые слова: гетерогенная сеть; макросота; микросота; энергоэффективность; спектральная эффективность.

D. S. Hordieieva, A. P. Bondarchuk

INCREASING OF ENERGY EFFICIENCY IN HETEROGENEOUS NETWORKS THROUGH MICROCELLS

With the exponential growth of mobile data traffic, which is caused by a new generation of wireless devices, cellular networks face a big challenge in order to meet the high demand for network bandwidth. At the same time, subscriber's need for higher data rate and the ever growing number of wireless users has led to a rapid increase in electricity consumption and operating costs of cellular networks. This gave impetus to the creation of energy-efficient telecommunications. One of the innovations in this area is Heterogeneous Network (HetNet), in which cells of low power consumption (microcells, picocells and femtocells) can be used. In this paper we consider the superposition of microcells on a network that consists of macrocells in order to investigate how microcells affect the energy efficiency of a heterogeneous network. The main parameters for analytical modeling of the heterogeneous network architecture, which are necessary for performing calculations, are described. Energy efficiency is calculated, which takes into account three aspects that affect it: the number of microcells, their radius, and the distance between macrocell sites. Also, this article takes into account the scenarios of different number of users in a heterogeneous network, which made it possible to obtain the optimal variant for energy efficiency and determine the necessary quantitative values for the radius of microcells, the number of microcells, the distance between sites for macrocells and the dependency graphs. It is shown that the use of microcells is appropriate for a large number users, because microcells also improve the coverage of the network on the edge of macrocells and should not stand idle, that is, use the energy of the network, but not perform any functions of the network.

Keywords: heterogeneous network; energy efficiency; spectral efficiency.

УДК 004.8+65.05+681.5

В. В. ВИШНІВСЬКИЙ, доктор техн. наук, професор;

О. В. ЗІНЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент;

Ю. І. КАТКОВ, канд. техн. наук, доцент;

С. О. СЕРИХ, канд. техн. наук, доцент,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ІНФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

Розкрито сутність інтелектуальних технологій та створюваних на їх основі інтелектуальних систем як складової складних організаційно-технічних систем і здійснено докладне порівняння процесів реорганізації та самоорганізації. Запропоновано перелік інформаційних показників інтелектуальних систем, необхідних для оцінювання процесів реорганізації (самоорганізації).

Ключові слова: інтелектуальна технологія; інтелектуальні системи; інформаційні показники інтелектуальних систем; реорганізація; самоорганізація; кон'югація; асоціація; інгресія; егресія; депресія; регресія.

Вступ

Інформаційні системи (ІС) активно впроваджуються в усі галузі виробництва товарів і послуг. Більшість рутинних операцій із перетворення інформації в складних організаційно-технічних системах (СОТС) уже автоматизовано. Проте підвищення ефективності впровадження ІС у різні сфери людської діяльності тісно пов'язане з рівнем їх інтелектуалізації, тобто впровадженням інтелектуальних технологій, штучного інтелекту, хмарних технологій, а також створенням на їх основі *інтелектуальних систем (ІнтС)*, до яких здебільшого відносять інтелектуально-інформаційні, експертні, розрахунково-логічні, гібридно-інтелектуальні та рефлекторно-інтелектуальні системи [1].

У [2] показано, що в СОТС існують так звані *критичні елементи*, вплив на які може призвести до критичного стану всієї СОТС. У [3] розкрито роль і місце інформаційної інфраструктури щодо явища критичності в СОТС та необхідності здійснення заходів із реорганізації, які мають на меті адаптува-

ти організаційно-функціональну структуру СОТС до нових умов функціонування. ІнтС — важлива складова ІС, що забезпечує моделювання розумових процесів, притаманних людині при прийнятті рішень у різних галузях соціально-економічної діяльності на основі методів штучного інтелекту. У свою чергу, ІС є складовою СОТС, а це дає змогу передбачати умови виникнення критичного стану через поведження елементів ІнтС. Для оцінювання стану будь-якого елемента системи потрібно відстежувати поточні значення його інформаційних показників (характеристик) та для порівняння — нормовані значення відповідних критеріїв.

Справді, під час впливу загрози на деякий критичний елемент ІнтС виникає ситуація невизначеності його стану, коли бракує інформації щодо поточних значень деякої сукупності інформаційних показників для прийняття рішення про адаптацію множини інших елементів ІС або СОТС до нових умов функціонування.

У цій статті *об'єктом дослідження* є ІнтС, що належить до класу автоматизованих систем

© В. В. Вишнівський, О. В. Зінченко, Ю. І. Катков, С. О. Сєрих, 2018