

УДК 621.29 (045)

Одарченко Р.С., к.т.н.

## **МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПІДСИСТЕМИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ОПЕРАТОРА СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

Національний авіаційний університет

[odarchenko.r.s@mail.ru](mailto:odarchenko.r.s@mail.ru)

*За допомогою проведеного аналізу встановлено, що заявлені вимоги до мереж четвертого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, фактична якість обслуговування абонентів перебуває на досить низькому рівні, що свідчить про низьку ефективність існуючих методів планування радіомереж, транспортних підсистем та методів керування. Тому в даній роботі було розроблено метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора. Запропонований метод дозволяє при необхідності збільшити радіус зон обслуговування абонентів стільникових мереж до 80%, що дозволяє мінімізувати необхідну кількість базових станцій для побудови мережі, а тому майже в 2 рази зменшити витрати оператора стільникового зв'язку на побудову підсистеми базових станцій*

**Ключові слова:** LTE, частотний діапазон, пропускна здатність, базова станція, затухання

### **Вступ**

В Стратегії розвитку інформаційно-го суспільства в Україні до пріоритетів формування сучасної інформаційної інфраструктури країни віднесено створення високошвидкісних мереж широкопasmового мобільного доступу до Інтернет на всій території України. Йдеться про широкопasmовий доступ на базі використання технологій мобільного зв'язку третього і четвертого поколінь 3G і 4G (від англ. Generation – покоління) та 5G в майбутньому. На вирішення питань щодо впровадження 4G технологій на території України спрямовано реалізацію національного проекту “Відкритий світ”, яким передбачається створення інформаційно-комунікаційної освітньої мережі національного рівня на базі технологій радіозв'язку четвертого покоління.

Стандарт 4G обіцяє набагато більші швидкості передачі даних: понад 100 Мбіт/с швидкорухомим абонентам (наприклад, потягам і автомобілям) та 1 Гбіт/с абонентам з невеликою рухливістю (наприклад, пішоходам і фіксованим абонентам) згідно з міжнародною специфікацією International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced) від 2008 року.

Особливістю розвитку мереж LTE (Long Term Evolution) є можливість їх побудови на вже розвинених мережах, як операторів GSM, так і операторів CDMA, що помітно знижує вартість розгортання мереж. Складність переходу до LTE-мереж в Україні зумовлена проблемами отримання ліцензій для нового спектру частот і необхідністю спеціальних абонентських пристроїв, здатних одночасно працювати в мережах LTE і 3G.

Виходячи з вищесказаного, можна сказати, що розвиток інфраструктури широкопasmового доступу до Інтернет на всій території України на базі створення високошвидкісних мереж четвертого покоління є задачею актуальною та перспективною.

Крім того в світі та в Україні зокрема планується повсюдне розгортання концепції обчислювальної мережі фізичних об'єктів, оснащених вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або з зовнішнім середовищем, яка розглядає організацію таких мереж як явище, здатне перебудувати економічні та суспільні процеси, що виключає з частини дій і операцій необхідність участі людини, тобто концепції IoT (Інтернету речей). В цій концепції надважливим завданням яв-

ляється надання наднадійного постійного зв'язку різнорідних об'єктів між собою. В якості технологічних рішень для цього можуть бути використані стільникові мережі нових поколінь з підвищеним рівнем ефективності.

В цих умовах в концепції, яка включає як мобільних абонентів, так і різноманітні пристрої (Інтернет всього – ІюЕ), для кінцевих користувачів важливо завжди отримувати високошвидкісний та якісний доступ до мережевих ресурсів, незалежно від місця знаходження.

Тому під час організації мереж мобільного стільникового зв'язку одними з ключових залишаються задачі планування, оптимізації та максимально ефективного використання ресурсів цієї мережі.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Структура мережі LTE сильно відрізняється від мереж стандарту 3G [3]. Істотні зміни зазнала і підсистема базових станцій, і підсистема комутації [4-5]. Була змінена технологія передачі даних між обладнанням користувача та базовою станцією [5]. Також зазнали зміни і протоколи передачі даних між мережевими елементами [6].

### **Постановка мети дослідження**

Проте все одно для належної підтримки нових широкосмугових технологій радіодоступу в сучасних стільникових мережах повинна бути підвищена ефекти-

вність передачі інформації при зниженні вартості доставки кожного мегабайта трафіку та забезпеченні якості обслуговування (QoS), необхідного кожному типу трафіку. Таким чином, з метою оптимізації вже існуючих та побудови нових мереж 3G/4G необхідно розробляти методи, які дозволять підвищити ефективність стільникових мереж зв'язку для того, щоб вони могли відповідати ряду критеріїв.

Тому метою даної роботи було обрано розробку методів оптимізації підсистеми базових станцій оператора стільникового зв'язку.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити математичну модель для опису підсистеми базових станцій, а потім на її основі запропонувати методи її оптимізації.

### **Математична модель**

Кількість необхідних базових станцій для покриття всієї необхідної території обслуговування можна визначити за наступною формулою:

$$N_{BC} = \frac{S_{обсл}}{S_{ст}}; \quad (1)$$

де  $S_{обсл}$  - загальна площа обслуговування абонентів;

Площа яку обслуговується однією БС в стільнику визначається за формулою:

$$S_{ст} = p \cdot d_{max}^2; \quad (2)$$

$d_{max}$  - це максимальний радіус стільника, який є функцією від багатьох змінних:

$$d_{max} = f(P_{BC}, G_{нрд}, G_{нрм}, B_{аб}, B_{фід}, IM, L_{мет}, L_{розн}, R_{аб}, N_{аб}, C_{BC}, P_{bit}); \quad (3)$$

Відповідно і кількість необхідних базових станцій являється функцією багатьох змінних, яку з метою зменшення ви-

трат оператора стільникового зв'язку необхідно мінімізувати:

$$N_{ст} = f(P_{BC}, G_{нрд}, G_{нрм}, B_{аб}, B_{фід}, IM, L_{мет}, L_{розн}, R_{аб}, N_{аб}, C_{BC}, P_{bit}) \rightarrow \min; \quad (4)$$

Враховуючи те, що деякі змінні параметри на практиці є чітко визначеними (технічні характеристики систем), то запишемо задачу параметричної оптимізації у наступному вигляді :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{\max} = f(P_{BC}, G_{nрd}, G_{nрm}, B_{аб}, B_{фiд}, IM, L_{мет}, L_{розп}, R_{аб}, N_{аб}, C_{BC}, P_{bit}, h_{BC}, h_{MC}) \rightarrow \max; \\ 0 < P_{BC} \leq P_{BC.\max}; \\ R_{аб.\min} < R_{аб} \leq R_{аб.\max}; \\ 0 \leq P_{bit} \leq P_{bit.\dot{о}он}; \\ h_{BC.\min} \leq h_{BC} \leq h_{BC.\max}; \\ Price \leq Price_{\dot{о}он}; \end{array} \right.$$

Вартість встановлення базових станцій включає вартість БС  $Price_{BC}$ , вартість оренди площі для встановлення БС  $Price_{ор.пл}$ , вартість встановлення БС  $Price_{вст.БС}$  вартість підняття антени БС

$$Price = Price_{BC} + Price_{ор.пл} + Price_{вст.БС} + Price_{афт} + Price_{ант} + Price_{вст.ант}; \quad (5)$$

Вартість БС відрізняється для кожного виробника обладнання і пропорційна випромінюваній потужності передавача  $Price_{BC} = P_{nрd} \cdot Price_{дБ.nрd}$ , де  $Price_{дБ.nрd}$  - вартість 1 дБ потужності БС. Вартість антенно-фідерного тракту  $Price_{афт} = Price_{м.афт} \cdot l_{афт}$ , де  $l_{афт}$  - довжина антенно-фідерного тракту, вартість встановлення антени на висоті  $h_{BC}$   $Price_{вст.ант} = h_{BC} \cdot Price_{м.вст.ант}$ , де  $Price_{м.вст.ант}$  - вартість встановлення одного метру антени БС.  $Price_{ор.пл}$  визначається орендодавцем,  $Price_{вст.БС}$  визначається підрядником, який буде виконувати ці роботи,  $Price_{ант}$  визначено виробником обладнання.

Загальна пропускна здатність однієї БС може бути визначена за допомогою наступного виразу:

$$C_{BC} = W \cdot b; \quad (6)$$

де  $\beta$  – спектральна ефективність БС;  $W$  – загальна виділена смуга часто в стільнику для однієї БС;

$Price_{вст.ант}$ , вартість антенно-фідерного тракту для підключення БС до антени  $Price_{афт}$ , вартість антени  $Price_{ант}$ :

Необхідна пропускна здатність для обслуговування всіх абонентів в стільнику може бути визначена наступним чином:

$$R_{заг} = R_{аб} \cdot N_{акт.аб}, \quad (7)$$

де  $N_{акт.аб}$  - кількість активних абонентів, яких необхідно обслуговувати.

Вона повинна бути меншою загальної пропускної здатності БС:

$$R_{заг} \leq C_{BC}; \quad (8)$$

Кількість активних абонентів залежить від площі обслуговування в межах міської забудови  $S_{заб}$ , на вулиці  $S_{вул}$ , щільностей абонентів відповідно в будівлях та на вулиці  $S$  та коефіцієнтів їх активності  $n$ :

$$N_{акт.аб} = n_{буд} \cdot S_{буд} \cdot S_{заб} \cdot N_{пов} + n_{вул} \cdot S_{вул} \cdot S_{вул} \quad (9)$$

Щільності абонентів визначають наступним чином для рис. 1:

$$S = \frac{N_{люд}}{S}; \quad (10)$$

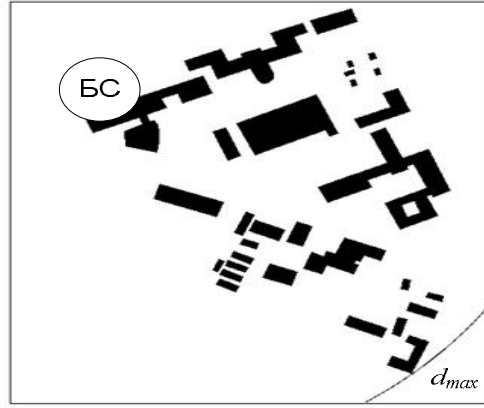


Рис. 1. Схематичне зображення ЗІО (споруди показано чорним кольором)

Для  $R_{заг}$  повинна виконуватись наступна умова:

$$R_{заг} = R_{аб} \cdot (n_{б\gamma\delta} \cdot s_{б\gamma\delta} \cdot S_{заб} \cdot N_{нов} + n_{бул} \cdot s_{бул} \cdot S_{бул}) \leq W \cdot b; \quad (11)$$

Площа забудови у стільнику визначається:

$$S_{заб} = S_{см} \cdot w_{заб}; \quad (12)$$

Тоді площа покриття на вулиці буде:

$$S_{бул} = S_{см} - S_{заб} = p \cdot d_{max}^2 - p \cdot d_{max}^2 \cdot w_{заб} = p \cdot d_{max}^2 (1 - w_{заб}); \quad (13)$$

Таким чином:

$$\begin{aligned} R_{заг} &= R_{аб} \cdot (n_{б\gamma\delta} \cdot s_{б\gamma\delta} \cdot p \cdot d_{max}^2 \cdot w_{заб} \cdot N_{нов} + n_{бул} \cdot s_{бул} \cdot p \cdot d_{max}^2 \cdot (1 - w_{заб})) = \\ &= R_{аб} \cdot p \cdot d_{max}^2 \cdot (n_{б\gamma\delta} \cdot s_{б\gamma\delta} \cdot w_{заб} \cdot N_{нов} + n_{бул} \cdot s_{бул} \cdot (1 - w_{заб})) \leq W \cdot b; \end{aligned} \quad (14)$$

При цьому допустимі втрати радіосигналу на трасі розповсюдження радіохвиль:

$$L = P_{TX} + G_{TX} - P_{RX} - B_{BODY} + G_{RX} - B_{fid} - IM - L_{slow} - L_{мет} - L_{\phi}, \quad (15)$$

де  $P_{BC}$  – потужність передавача базової станції;  $G_{прд}$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени;  $P_{прм}$  – чутливість приймача;  $B_{тіло}$  – втрати в тілі абонента;  $G_{прм}$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени;  $B_{фід}$  – втрати у фідері,  $IM$  – за-

пас по інтерференції;  $L_{нов}$  – запас на повільні завмирання, береться рівним 10.3 дБ;  $L_{\phi}$  – врати сигналу у фідерних лініях;  $L_{мет}$  – втрати, обумовлені поглинаннями в атмосферних газах, гідро метеорах, тумані тощо, дБ.

Таким чином, отримуємо:

$$d_{max} = 10^V; \quad (16)$$

де  $V = (L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + a(h_m) + K) / (44,5 - 6,55 \lg(h_{BC}))$   
 $h_{BC}$  - висота підйому антени БС;  $h_m$  - висота підйому антени мобільного абонента.

Тому:

$$d_{max} = 10^{(L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + a(h_m) + K) / (44,5 - 6,55 \lg(h_{BC}))}; \quad (17)$$

Також повинна виконуватись умова:

$$d_{max} \leq \sqrt{\frac{W \cdot b}{R_{аб} \cdot p \cdot (n_{б\gamma\delta} \cdot s_{б\gamma\delta} \cdot w_{заб} \cdot N_{нов} + n_{бул} \cdot s_{бул} \cdot (1 - w_{заб}))}}; \quad (18)$$

$$h_{BC} \leq h_{BC, доп}; \quad (19)$$

Підставляючи (17) до нерівності (18), отримуємо:

$$\begin{aligned}
 & 10 \left( L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + a(h_m) + K \right) / \left( 44,5 - 6,55 \lg(h_{BC}) \right) \leq \\
 & \leq \sqrt{\frac{W \cdot b}{R_{a\bar{b}} \cdot p \cdot (n_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot s_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot w_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + n_{вул} \cdot s_{вул} \cdot (1 - w_{z\bar{a}\bar{b}}))}}; \\
 & \left( L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + 13,82 \lg(h_{BC}) + a(h_m) + K \right) / \left( 44,5 - 6,55 \lg(h_{BC}) \right) \leq \\
 & \leq \lg \left( \sqrt{\frac{W \cdot b}{R_{a\bar{b}} \cdot p \cdot (n_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot s_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot w_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + n_{вул} \cdot s_{вул} \cdot (1 - w_{z\bar{a}\bar{b}}))}} \right); \\
 & \lg(h_{BC}) \cdot \left( 13,82 + 6,55 \cdot \lg \left( \sqrt{\frac{W \cdot b}{R_{a\bar{b}} \cdot p \cdot (n_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot s_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot w_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + n_{вул} \cdot s_{вул} \cdot (1 - w_{z\bar{a}\bar{b}}))}} \right) \right) \leq \\
 & \leq L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + a(h_m) + K + \\
 & + 44,5 \cdot \lg \left( \sqrt{\frac{W \cdot b}{R_{a\bar{b}} \cdot p \cdot (n_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot s_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot w_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + n_{вул} \cdot s_{вул} \cdot (1 - w_{z\bar{a}\bar{b}}))}} \right); \\
 & Z = \sqrt{\frac{W \cdot b}{R_{a\bar{b}} \cdot p \cdot (n_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot s_{\bar{b}y\bar{d}} \cdot w_{z\bar{a}\bar{b}} \cdot N_{нов} + n_{вул} \cdot s_{вул} \cdot (1 - w_{z\bar{a}\bar{b}}))}}; \\
 & \lg(h_{BC}) \leq \frac{L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + a(h_m) + K + 44,5 \cdot \lg(Z)}{13,82 + 6,55 \cdot \lg(Z)}; \\
 & h_{BC} = 10^{\frac{L - 69,55 + 26,16 \lg(f) + a(h_m) + K + 44,5 \cdot \lg(Z)}{13,82 + 6,55 \cdot \lg(Z)}};
 \end{aligned}$$

**Методи оптимізації підсистеми БС**

Таким чином, важливою задачею для операторів стільникового зв'язку є підвищення рівня прийнятого радіосигналу, проте при виконанні всіх обмежень, наведених вище. Таким чином, запропонований метод оптимізації підсистеми базових станцій представляється наступним чином.

**Етап 1.** Оцінка середньої необхідної пропускної здатності для обслуговування одного абонента  $R_{a\bar{b}} = \sum_{i=1}^N R_i$ , де  $N$  – кількість послуг, що характерні кожному абоненту,  $R_i$  – необхідна пропускна здатність

для якісного надання кожного сервісу абоненту.

**Етап 2.** Визначення на основі аналізу статистичних даних щодо обслуговування абонентів стільникового оператора визначення щільностей абонентів відповідно в будівлях та на вулиці  $S$  за формулою (17), коефіцієнтів їх активності та оцінка щільності забудови за допомогою піксельного аналізу цифрових карт місцевості.

**Етап 3.** Зменшення втрат в фідері  $B_{\phi id}$  шляхом використання підходу feederline (значення фідерів 7/8'' і 1/2'') та feederless.

**Етап 4.** Вибір оптимальної висоти підйому антен БС за формулою (19) з

урахуванням обмежень, наведених в представленій вище математичній моделі, для розміщення антен GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100 та LTE на одній мачті.

Рекомендації для оператора стільникового зв'язку. Для приведеного вище методу можливо знайти реалістичне рішення, яке може бути впроваджене мобільним оператором.

Першою розглянемо проблему є складність та великої кількості обладнання сучасних базових станцій. Детальна архітектура мультистандартної (з використанням стандартів GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100, LTE-800, LTE-2600) зображена на рис. 2. Як бачимо, при сучасному підході для реалізації такої БС потрібно мінімум 3 BBU, 5 RRU та 15 антен (кількість антен з розрахунку 3 антени на кожен частотний діапазон). Така архітектура БС є складною, габаритною, важкою для опори та незручною в експлуатації.

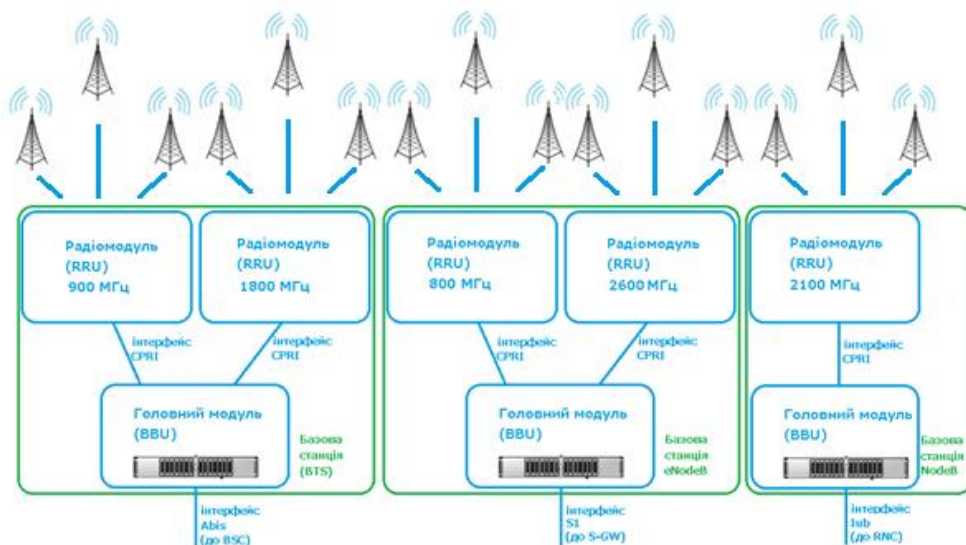


Рис.2. Сучасна архітектура базових станцій

Наступним кроком є використання активних антен, в які вмонтовано радіомодулі RRU. Використання активних антен надає цілий ряд переваг. По-перше, спрощується архітектура БС, адже з неї зникають радіомодулі як окремі елементи. По-друге, зникає необхідність в використанні фідерів та МШП, що полегшує експлуатацію і монтаж обладнання і зменшує вагу конструкції. Третя, найголовніша перевага – повністю зникає затухан-

ням Першим кроком для оптимізації архітектури БС є зменшення кількості BBU. Сьогодні зазвичай для кожного стандарту має використовуватись власний BBU.

Зменшення кількості BBU можна досягти завдяки використанню SDR (Software Defined Radio) – програмно-конфігурованої радіопідсистеми. Ця технологія дозволяє встановлювати або змінювати робочі радіочастотні параметри, включаючи діапазон частот, тип модуляції та вихідну потужність. До спільного головного процесорного модуля можливо підключити декілька радіомодулів, кожен з яких забезпечує створення електромагнітного випромінювання в необхідному частотному діапазоні. Використання цієї технології призведе до спрощення обладнання базової станції, суттєвого зменшення габаритів обладнання, та зменшення споживаного струму.

ня у фідері, що значно збільшує зону обслуговування БС.

Третім кроком є зменшення кількості антен. Сьогодні існують рішення для комбінування антен кількох частотних діапазонів у одному корпусі, що дозволить використовувати по одній антені на кожен сектор замість п'яти для кожного зі стандартів окремо. Це, по-перше, зменшить кількість антен з 15 до 3, і, по-друге вирішить усі проблеми з встановленням антен нових стандартів. Використання

мультидіапазонних антен дозволить забезпечити максимальну висоту підвісу для всіх стандартів одночасно, зекономити на антенномісцях та додаткових площах зменшить навантаження на опору та кількість споживаної електроенергії у порівнянні з використанням однодіапазонних антен.

Четвертим рішенням для оптимізації БС є використання електричних азимутів. Це дозволить змінювати напрям антени віддалено без необхідності підійматися на вежу, тобто забезпечить більшу гнучкість мережі. Також завдяки електричному азимуту можливо розташувати антени різних стандартів під кутом одне до одного. Це є великою перевагою, адже не завжди антени всіх технологій мають випромінювати електромагнітні хвилі в одну сторону (по одному азимуту) з точки зору радіопланування.

Застосування цих рішень по оптимізації базової станції значно спрощує архітектуру базових станцій. Архітектура оптимізованої базової станції зображена на рис.3. Вона має лише 4 фізичних елементи (1 BBU та 3 антени з вмонтованими RRU) порівняно з 23 елементами такої ж базової станції при використанні сучасних підходів до побудови. Також цей метод оптимізації спрощує монтаж та експлуатацію обладнання, зменшує операційні та капітальні витрати оператора та завдяки зменшенню втрат електромагнітного випромінювання та збільшенню висоти підвісу антен збільшує площу покриття базовою станцією. Впровадження такої схеми побудови дозволить оператору ефективніше використовувати свої ресурси та швидше розширювати власну мережу.

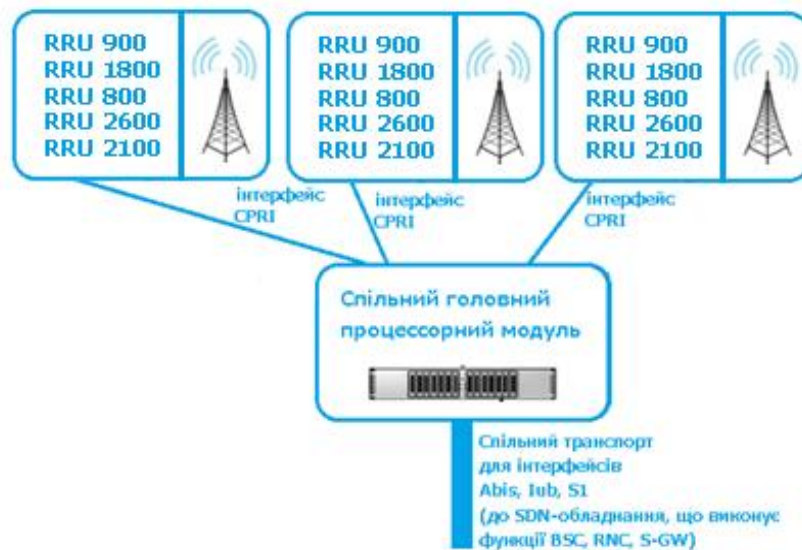


Рис. 3. Архітектура оптимізованої базової станції

Моделювання величини затухань для БС. Представимо результати моделювання залежності напруженості електромагнітного поля від відстані (рис. 4). При цьому врахуємо, що за підходів feederline (значення фідерів 7/8'' і 1/2'') та feederless, антени LTE потрібно вшати під існуючими антенами GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100, тобто хоча б на 9 м

нижче за існуючі антени. При використанні оптимізованого методу побудови БС антени LTE розміщуються на рівні найвищих з цих антен, так як антени всіх стандартів комбінуються у одному корпусі. На графіках: червона лінія – оптимізована БС, синя лінія з кругами – підключення feederless, зелена лінія з квадратами – підключення feederline.

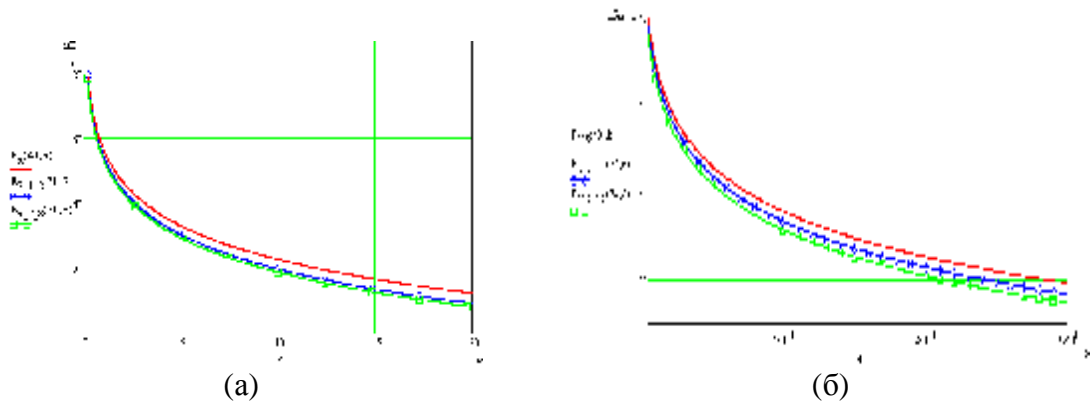


Рис. 4 Напруженість електромагнітного поля (а) та рівень (б) прийнятого сигналу розрахована за моделлю Окумура-Хата

Аналіз залежностей показав, що виграш в рівні сигналу при збільшенні висоти підвісу не дуже значний – до 0,7 дБ. А при зміні висоти підвісу від 40 м до 20 м – маємо збільшення рівня сигналу в приймачі до 3,2 дБ. Таке збільшення рівня сигналу вже є досить значним і часто призводитиме до покращення швидкості передачі даних для абонентів. Отже, використання мультистандартних антен призводить до відчутного покращення рівня сигналу.

Площа покриття оптимізованої БС більша за площу покриття БС з підключенням feederless на 38,52% та 79,51% для підходу feederline.

Для визначення наскільки покращиться покриття БС при використанні запропонованого методу оптимізації БС проведемо моделювання для трьох підходів до підключення антен до радіомодулів: feederline, feederless та з використанням активних антен (рис. 5)

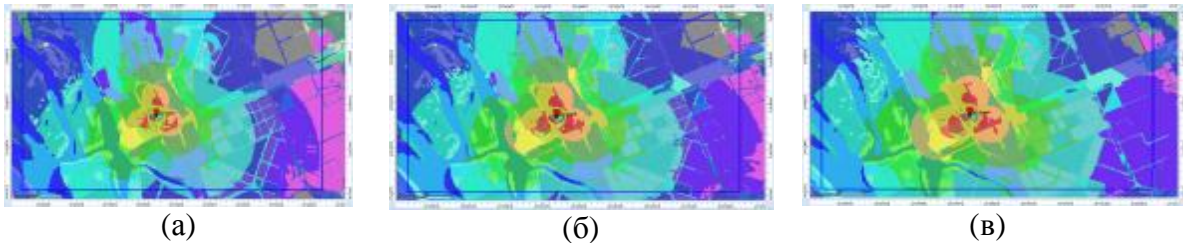


Рис. 5. Порівняння покриття при використанні feederline (зліва зверху), feederless (права зверху) та запропонованому методу оптимізації (посередині)

Крім того, що збільшилася площа покриття взагалі, також покращилася і якість зв'язку. Так можна сказати, адже збільшилася не тільки площа «зеленого» покриття на рівні -100 dBm, а й площа «жовтого» і «червоного» покриття з рівнями -90 dBm і -80 dBm відповідно. При більшому рівні сигналу мережа мобільного оператора пропонує кращий сервіс, тобто більш швидку швидкість передачі

даних завдяки можливості використовувати менш завадостійкі, а отже більш швидкі методи модуляції.

Щоб зрозуміти, наскільки кількісно збільшилася площа покриття, скористаємося вбудованою в Atoll функцією побудови гістограм. Отримаємо три гістограми для кожної з карт покриття, які зображені на рис. 6.



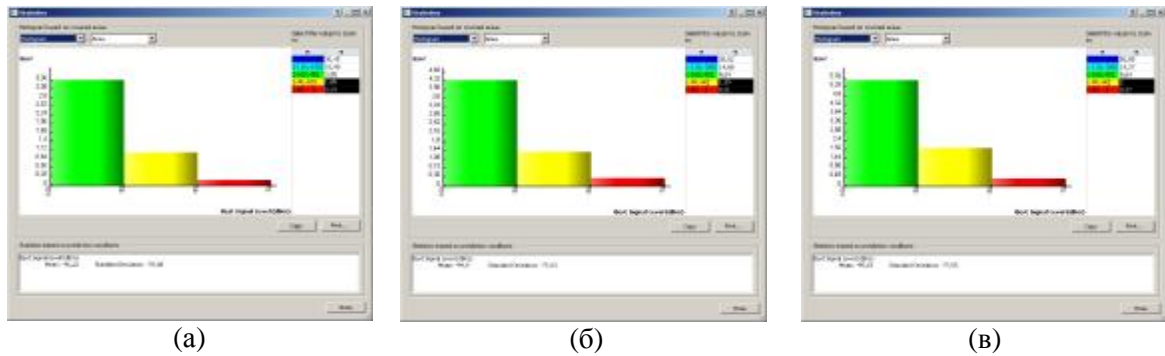


Рис. 6. Гістограми, що показують площу покриття при різних рівнях прийнятого сигналу

Загальна площа покриття для feederline підключення складає 4,5 км<sup>2</sup>, для feederless підключення – 6,54 км<sup>2</sup> та для оптимізованої архітектури – 8,01 км<sup>2</sup>.

Отже площа покриття однієї БС при запропонованому методі побудови БС у порівнянні з feederline підключенням покращилася на 78%, та на 22% в порівнянні з feederless підключенням.

Отримані результати не повністю співпадають, але дуже схожі на результати математичного моделювання з попереднього розділу, де було отримано на 80% більшу площу в порівнянні з feederline і на 39% в порівнянні з feederless підключеннями. Математичне моделювання не

враховувало рельєф та типи місцевостей, було більш спрощеним, тому результати моделювання в Atoll є більш правдоподібними. Але моделювання в Atoll було прив'язано до конкретної місцевості, а саме густої міської забудови міста Києва. Ми можемо очікувати значно більшого покращення в площі покриття оптимізованої БС порівняно з іншими підходами, якщо проведемо таке моделювання в приміській або сільській місцевостях.

Для моделювання більш масштабної мережі на карті було розміщено 9 БС з різною кількістю секторів, як показано на рис. 7.

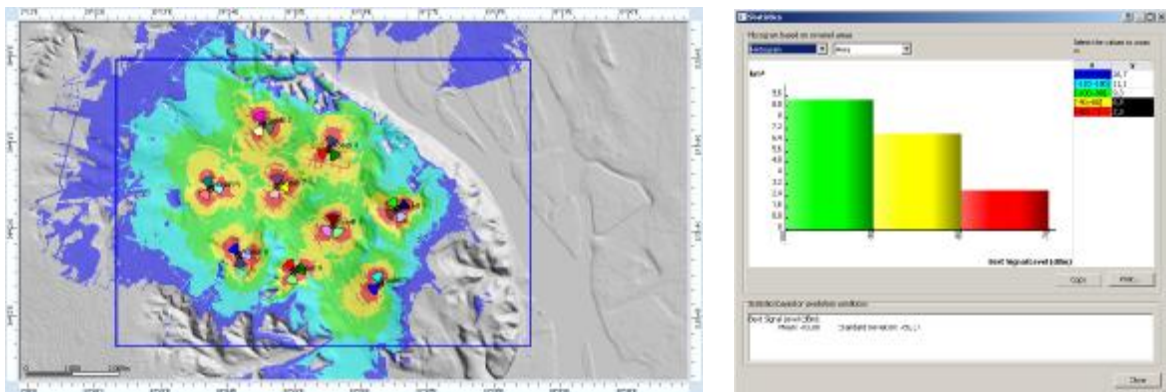


Рис. 7. Карти покриття та гістограми при використанні трьох підходів до побудови базових станцій

Порівняння оптимізованої БС та БС з підключеннями feederline дає нам зрозуміти, що запропонований підхід набагато краще. Приблизно 65% площі покриття БС зросло більше ніж на 5 dBm, приблизно 35% площі – від 4 до 5 dBm. При порівнянні із більш сучасною схемою під-

ключення feederless також бачимо позитивний результат, але на приблизно 60% площі рівень сигналу покращився тільки на 3 dB, приблизно на 30% площі більш ніж на 3 dB. В деяких випадках 3 dB можуть допомогти абоненту перейти на більш швидкісну схему модуляції.

Також з гістограм видно, що в деяких дуже рідких (близько 1% площі) випадках рівень сигналу навпаки погіршився.

### **Висновки**

За аналізом якості обслуговування абонентів у реалізованих проектах мереж LTE в світі та стільникових мереж 3G в Україні встановлено, що заявлені вимоги до мереж четвертого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, а фактична якість обслуговування абонентів перебуває на досить низькому рівні, що свідчить про низьку ефективність існуючих методів планування радіомереж, транспортних підсистем та методів керування. Тому в даній роботі було розроблено метод оптимізації підсистеми базових станцій стільникового оператора, який полягає в послідовному визначенні оптимальної структури підсистеми із врахуванням обмежень по якості обслуговування, допустимої смуги частот, кількості активних абонентів, використанні мультистандартних активних антенних систем та програмно-конфігурованого радіо інтерфейсу. Запропонований метод дозволяє при необхідності збільшити радіус зон обслуговування абонентів стільникових мереж до 80%, що дозволяє мінімізувати необхідну кількість базових станцій для побудови мережі, а тому майже в 2 рази зменшити витрати оператора стільникового зв'язку на побудову підсистеми базових станцій.

### **Список літератури**

1. Мобільний зв'язок в Україні [електронний ресурс] — електронні текстові дані. — Режим доступу: <http://uateka.com/uk/article/society/1227/>
2. Єрохін В. Ф. Аналіз і прогноз розвитку систем мобільного зв'язку загального користування / В. Ф. Єрохін, Б. А. Гиндич, О. В. Кувшинов. — Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ” № 1. — 2011. — С. 54–64.
3. Вишне夫斯基 В. М. Энциклопедия WiMAX: Путь к 4G / В. М. Вишне夫斯基, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. — М. : Техносфера, 2009. — 472 с.
4. GSA Evolution to LTE report [Електронний ресурс]. — Електронні текстові дані. — Режим доступу:
5. [http://www.gsacom.com/downloads/pdf/GSA\\_Evolution\\_to\\_LTE\\_report\\_060514.php4](http://www.gsacom.com/downloads/pdf/GSA_Evolution_to_LTE_report_060514.php4)
6. Ericsson Mobility Report [Електронний ресурс]. — Електронні текстові дані. — Режим доступу: <http://www.ericsson.com/mobility-report>
7. Understanding 5G [Електронний ресурс]— електронні текстові дані. — Режим доступу: <http://www.arnitsu.com>
8. Тихвинский В. О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В. О. Тихвинский, С. В. Терентьев, А. Б. Юрчук. — М. : Эко-Трендз, 2010. — 284 с.
9. Скрипин В. Глава НКРСИ: 4G в Украине появится не раньше 2016 года [Електронний ресурс]. — Електронні текстові дані. — Режим доступу: <http://itc.ua/news/glava-nkrsi-4g-v-ukraine-poyavitsya-ne-ranshe-2016-goda/>

Статтю подано до редакції 30.11.2016