

УДК 514.83

Валерій БОНДАРЕНКО

bondarenkoval@ukr.net

Ігор КОЗАРЬ

i.kozar97@gmail.com

м. Дніпро

ГЕОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ КЛАСТЕРІВ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

У даній роботі розглядається задача планування телекомунікаційних мереж на прикладі мереж стільникового зв'язку. Продемонстрований багатокритерійний підхід до її вирішення. Розглядаються геометричні методи оптимізації побудови зон покриття базових і абонентських станцій.

Ключові слова: стільниковий зв'язок, зони покриття, вибір позиції, оптимізація планування, метод найменших квадратів.

Постановка проблеми

Ефективне планування розміщення базових станцій (БС) є ключовою проблемою для операторів стільникового зв'язку при розгортанні і вдосконаленні мережі стільникового зв'язку. Це досить складне завдання, повноцінного і закінченого рішення якого покине існує, оскільки воно залежить від багатьох факторів абсолютно різної природи. Проте з позиції ефективності витрат на будівництво та експлуатацію мереж завдання є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перш за все слід виокремити дослідження потужної «Томської школи» (Томський державний університет систем управління і радіоелектроніки, Кафедра радіотехнічних систем), яку очолює д.т.н., проф., член-кор. САН ВШ Мелихов С.В., у складі науковців: Кологривов В.А., Єгоров Л.Л., Покаместов Д.О., Крюков Я.В. та ін. Ними опубліковано понад 15 статей, зокрема, за такою тематикою досліджень:

- запропоновано варіант геометричного алгоритму корекції зон покриття БС;
- сформульована нелінійна задача розрахунку зон покриття БС стільникової мережі на основі методу лінеаризації нелінійних систем алгебраїчних рівнянь Нью-

тона-Рафсона за наданою двовимірною густиною розподілу абонентів на місцевості;

- запропоновано алгоритм розрахунку зон покриття БС з використанням модифікованого методу зважених найменших квадратів, заснованого на перестановці стовпців у транспонованій матриці еластичності системи лінійних алгебраїчних рівнянь довільної стільникової структури;

- на основі методу лінеаризації нелінійних систем алгебраїчних рівнянь Ньютона-Рафсона запропоновано нелінійний алгоритм методу найменших квадратів для її розв'язання;

- розроблено алгоритм розрахунку зон обслуговування кластера БС систем стільникового зв'язку за наданого розподілу абонентів на території; опис кластера надано за допомогою перевизначеної системи лінійних рівнянь, що враховують розподіл навантаження та відстані між БС.

Найбільш типового втілення ця тематика досліджень набула у дисертації Єгорова Л.Л. [5].

Постановка завдання

Метою цієї роботи є формулювання оптимальних вимог до розміщення базових станцій, визначення критерія оптимальності розроблення алгоритму розрахунку зон покриття та їх корекції у майбутньому.

Виклад основного матеріалу

Класичний метод розрахунку зон обслуговування. Покриття базових станцій – полігони, в яких очікується, що сигнал даної станції буде вище, ніж сигнал інших станцій. У класичній теорії поширення радіохвиль, при розрахунках рівня сигналу на трасі між передавачем та приймачем, використовується квадратична формула Введенського.

$$E_d = \frac{2.18 \cdot \sqrt{P_1 \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot h_2}}{r^2 \cdot \lambda}, \text{ МВ/М}$$

де r – відстань між передавальною і приймальною антенами, км; h_1 – висота передавальної антени, м; h_2 – висота приймальної антени, м; P_1 – потужність передавача, кВт; λ – довжина хвилі, м; E_d – діюче значення напруженості поля; D_1 – коефіцієнт спрямованої дії передавальної антени.

Формула Введенського має фундаментальне значення для розрахунків ультракоротких ліній зв'язку та вельми наочно характеризує залежність рівня сигналу від відстані, довжини хвилі і висоти антен.

Емпірична модель Окамура-Хата. Сучасне місто для частот 900-го і 1800-го діапазону представляє складний комплекс неоднорідностей, де просторовий розподіл рівня сигналу має дуже складний характер. Проте, можна виділити характерні умови, при яких поширення радіохвиль для частот 900-го і 1800-го діапазону буде різним. Виявляється, що з точки зору законів поширення радіохвиль слід розрізняти випадки, коли

1. Приймальна антена (MS) розташована поза будівлею, нижче рівня дахів. Тоді можливі такі характерні випадки:

– Радіальні вулиці. Приймальні антени (MS) знаходяться на вулицях, напрямком яких збігається з напрямком поширення радіохвиль.

– Поперечні вулиці. Прийом здійснюється на вулицях, які перпендикулярні до напрямку поширення радіохвиль.

– Довільно орієнтовані вулиці.

2. Приймальна антена розташована всередині будівлі.

3. Приймальна антена розташована на даху будівлі вище рівня дахів навколишніх будівель.

В області планування стільникових мереж є різні програмні продукти, здатні розрахувати зони покриття окремо стоячих базових станцій (БС) (рис. 1). За допомогою даних програм немає можливості розглядати і аналізувати кластерну систему розташування БС. Таким чином, актуальна необхідність алгоритму для розрахунку системи БС. У даній роботі запропонований такий алгоритм, який на основі методу найменших квадратів здатний здійснювати автоматичний розрахунок кластерної системи БС.

Система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) може бути розв'язною – мати єдине точне рішення або нерозв'язною – не мати точного рішення. І якщо в першому випадку знімаються всі питання з отриманого результату з огляду на його єдиність і однозначність, то в другому випадку можливо лише наближене рішення, наприклад аппроксимацією за методом найменших квадратів (МНК) з мінімальною середньоквадратичною помилкою [4].

На основі [4] знайдено рішення перевизначення СЛАР виду $A \cdot r = d$ методом найменших квадратів (МНК) при середньому квадраті помилки:

$$E^2 = \sum (a \times r - d)^2 \quad (1)$$

для знаходження зон покриття БС по мінімуму функції помилки $E^2(r)$:

$$r = [A^T \times A]^{-1} \times A^T \times d, \quad (2)$$

де $r = |r_i|$ – вектор-стовпець невідомих, відповідних радіусів зон покриття; $A = [a_{ij}]$ – матриця еластичності зон покриття, що визначається інтенсивностями навантажень сусідніх БС; A^T – транспонована матриця A ; $d = |d_i|$ – вектор відомих відстаней (прольотів) між відповідними парами БС.

Розрахунки показують, що рішення (2) з використанням МНК не завжди визначає вдале оптимальне покриття певної території декількома БС. Тому розробка модифікованого методу, що дозволяє знайти інші рішення з меншими середньоквадратичними помилками, актуальна.

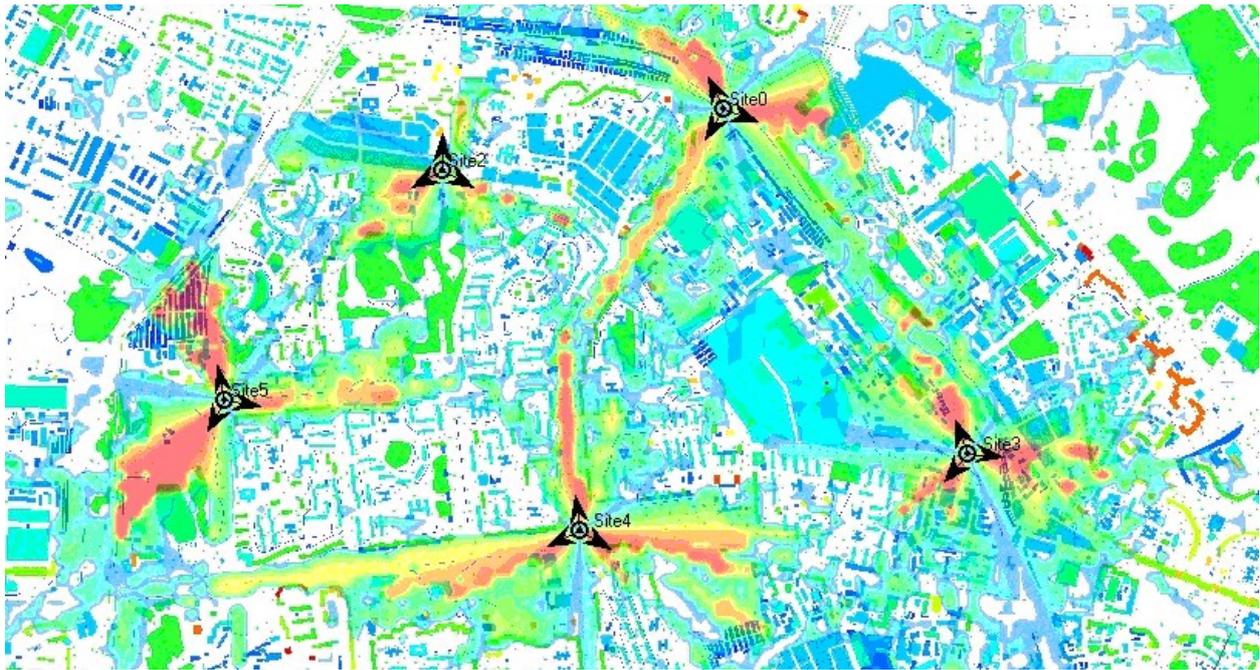


Рис. 1. Задача розрахунку зон покриття базових станцій.

Метод зважених найменших квадратів. Відомо [4], що з урахуванням додаткових факторів можна отримати різний набір векторів-рішень r , наприклад, застосовуючи метод зважених найменших квадратів (МЗНК). Суть МЗНК полягає у введенні в СЛАР матриці ваг W таким чином, що вихідна система $A r = d$ перетворюється в систему виду $W M r = W d$. Виважене рішення при цьому зводиться до задачі про найменші квадрати з додатковим параметром W , за допомогою якого можливо варіювання вектора r за критерієм найменшої середньої помилки:

$$r = (A^T W^T W A)^{-1} A^T W^T W d. \quad (3)$$

Для формалізації процесу пошуку оптимального покриття території декількома БС пропонується покращити МЗНК (нижче покращений МЗНК) шляхом використання матриці перестановок P , що замінює здобуток $W^T W$ у (3):

$$r = (A^T P A)^{-1} A^T P d, \quad (4)$$

причому P – це матриця перестановок стовпців в матриці A^T або матриця перестановок рядків в матриці A .

Алгоритм формування матриці P наступний: на перетині i -го рядка та j -го стовпчика записується 1, що означає переста-

новку i -го стовпця на місце j -го стовпця, інші елементи i -го рядка заповнюються нулями. Очевидно, при одиничній матриці P перестановки відсутні, а будь-яка перестановка співмірна перестановці відповідних рядків одиничної матриці; перемноження A^T з матрицею перестановок P веде до перестановки стовпців в матриці A^T :

$$A^T P = A_{ij}^T,$$

де A_{ij}^T – транспонована матриця еластичності з переставленими i -м і j -м стовпчиками. Зауважимо, що в матриці P може бути відображена одночасна перестановка відразу декількох стовпців матриці A^T .

З використанням матриці перестановок вираз (4) перетворюється:

$$r = (A_{ij}^T A)^{-1} A_{ij}^T d. \quad (5)$$

Фізичний сенс використання матриці перестановок в перевизначених системах зводиться до зміни взаємного впливу рівнянь різних прольотів мережі БС, що призводить до корекції зон обслуговування і зміни структури покриття території.

Критерій оптимальності.

Для повноцінної та адекватної оцінки отриманих результатів потрібен критерій оптимальності. Найкращим рішенням з

точки зору оптимального покриття буде являтися випадок, що охоплює найбільшу

площу з найменшими перекриттями і недопокряттями зон сусідніх БС (рис. 2).

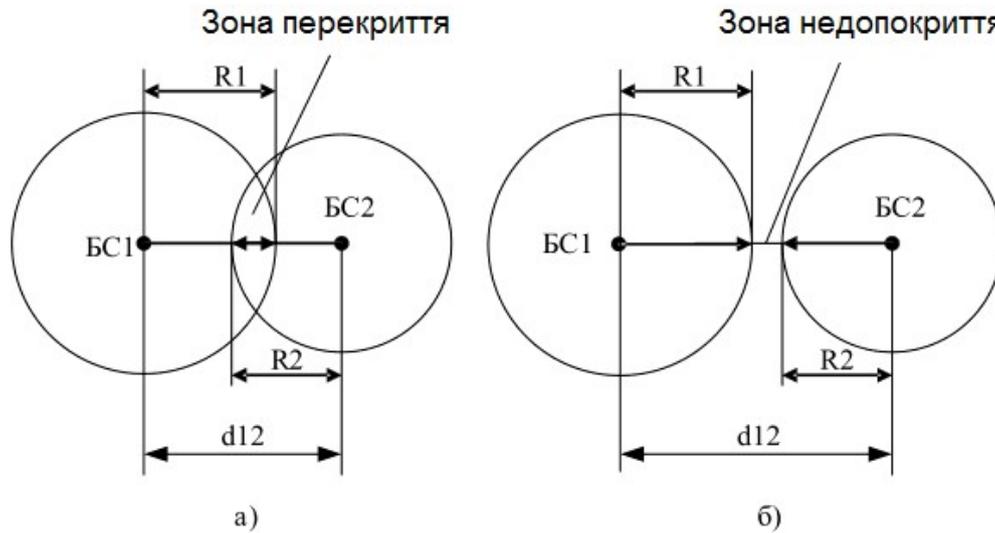


Рис. 2. Варіанти покриття території базовими станціями

Мінімізація цих областей і визначає критерій оптимальності. В якості міри оцінки оптимальності доцільно прийняти певне математичне поняття «оптимальність» Φ , яка показує сумарну середньоквадратичну помилку рішення. Складові норми, тобто різниці суми радіусів зон обслуговування пари БС і відстані між цією парою БС, пропорційні площам пере/ недопокряття:

$$\Phi = \sqrt{\sum ((r_i + r_j) - d_{ij})^2}. \quad (6)$$

де Φ – сумарна середньоквадратична помилка рішення; r_i і r_j – радіуси зон обслуговування відповідних БС_i і БС_j; d_{ij} – прольот між БС_i і БС_j.

У разі перекриття зон різниця буде мати знак «+», в разі недопокряття – знак «-». Знак різниці не має принципового значення в зв'язку зі зведенням різності до другого степеня. Таким чином, критерій оптимальності покриття території зонами обслуговування БС може бути записаний у вигляді: $|\Phi| \rightarrow 0$.

Найкращий випадок, коли відсутні зони перекриття і недопокряття, відповідає $|\Phi| = 0$.

Розрахунок покриття БС.

Як приклад ефективності запропонованого покращеного МЗНК проведемо

розрахунок зон покриття БС залежно від завантаженості БС, їх взаємного розташування і довжини прольотів.

Розглянемо симетричну групу з п'яти БС (розмірністю $q = 5$) з розташуванням чотирьох БС у вершинах квадратів, а п'ятої БС – на перетині діагоналей (рис. 3). Інтенсивності поступаючих навантажень для кожного БС візьмемо однаковими $y_{1-5} = 1$ Ерл, прольоти між парами БС $d_{12} = d_{25} = d_{45} = d_{14} = 10$ км, $d_{13} = d_{23} = d_{35} = d_{34} = 7,071$ км, коефіцієнт запасу по випромінюванню потужностями БС $k = 2$. Розглянемо рішення первизначеної СЛАР восьмого порядку як з допомогою МЗНК, так і з допомогою покращеного МЗНК у відповідності з виразами (2) та (4).

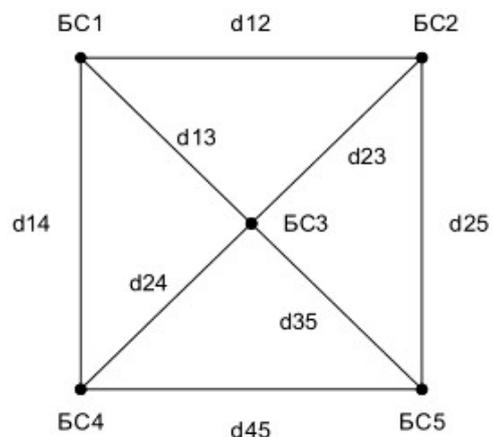


Рис. 3. Група БС розмірністю $q = 5$

При однакових навантаженнях на БС розрахунок зон покриття МЗНК відповідно до (2) і покращеного МЗНК відповідно до (4) призводить до одного результату: $r_1 = r_2 = r_4 = r_5 = 5$ км, $r_3 = 2,071$ км (рис. 4), що є наслідком симетрії розташування БС і однорідності розподілу навантажень.

Аналогічним чином отримуємо незалежне від перестановок рішення вихідної системи рівнянь при зміні коефіцієнта запасу по потужностям від $k = 2$ до $k = 1.8$, що еквіва-

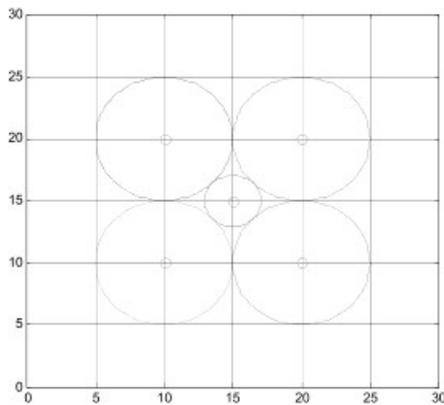


Рис. 4. МЗНК, покращений МЗНК. Розподілення зон обслуговування для $q = 5$; $k = 2$; $y_{1-5} = 1$ Ерл

Використання покращеного МЗНК для даної перевизначеної СЛАР виявило одинадцять неповторних варіантів рішення, сім з яких отримані при перестановках першого стовпчика з іншими і чотири – внаслідок інших можливих перестановок.

Розглянемо варіант з несиметричним розташуванням БС. Віднесемо БС₅ на координатній площині в точку з координата-

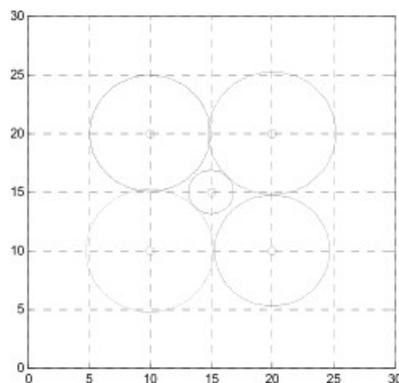


Рис. 6. МЗНК. Розподілення зон обслуговування для $q = 5$; $k = 1.8$; $y_{1-4} = 1$ Ерл; $y_5 = 2$.

лентно збільшенню радіусів зон покриття БС в 1,1 рази (рис. 5). Як бачимо, радіуси зон покриття збільшилися, але топологія зон залишилася незмінною. Це також обумовлено вихідної симетрією групи БС.

Збільшення навантаження на БС₅ вдвічі (з 1 до 2 Ерл) при розрахунку по МЗНК призводить до лише невеликого скорочення радіуса зон обслуговування БС₃ і БС₅ і незначного збільшення радіусів зон обслуговування БС₂ і БС₄ (рис. 6).

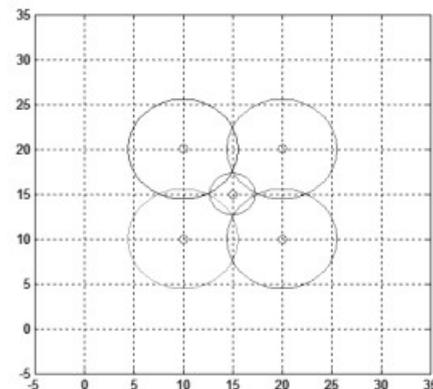


Рис. 5. МЗНК, покращений МЗНК. Розподілення зон обслуговування для $q = 5$; $k = 2$; $y_{1-5} = 1$ Ерл

ми (22; 7), при цьому $d_{12} = d_{14} = 10$ км, $d_{13} = d_{23} = d_{34} = 7.07$ км, $d_{25} = d_{45} = 12.61$ км, $d_{35} = 9.89$ км.

Також зробимо інтенсивності надходячих навантажень на всіх БС рівними $y_{1-5} = 1$ Ерл при коефіцієнті запасу за потужностями $k = 2$. Рішення МЗНК представлено на рис. 7.

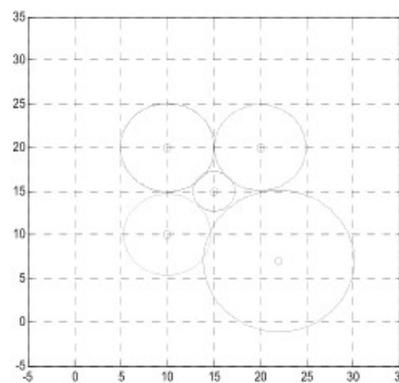


Рис. 7. МЗНК. Розподілення зон обслуговування для $q = 5$; $k = 2$; $y_{1-5} = 1$ Ерл

При використанні покращеного МЗНК виявлено десять неповторних варіантів.

Аналіз отриманих результатів.

Для аналізу отриманих результатів розраховані значення Φ для симетричної групи і несиметричної групи з різними навантаженнями на BC_5 зведені в табл. 1. Жирними цифрами виділені найменші значення Φ .

Всього було розраховано п'ять варіантів несиметричних груп, проте в таблиці наве-

дені результати лише одного варіанту, відповідного зображенню на рис. 7. Цих даних достатньо для узагальнюючих висновків.

Висновки і перспективи досліджень

1. В роботі запропонований і обгрутований геометричний варіант алгоритму розрахунку розмірів зон покриття BC стільникового зв'язку.

Табл. 1. Значення Φ для симетричної і несиметричної групи з різними навантаженнями на BC_5

Спосіб вирішення	Симетричне з навантаженням на BC_5	Несиметричне з навантаженням на BC_5	Несиметричне з навантаженням на BC_5
	1Ерл	1Ерл	2Ерл
Покр. МЗНК, 1	3.2746	1.6588	2.1284
Покр. МЗНК, 2	1.5954	1.5180	2.2322
Покр. МЗНК, 3	0.6096	0.7024	1.9000
Покр. МЗНК, 4	1.2965	0.7155	1.8695
Покр. МЗНК, 5	1.3518	0.9090	2.7979
Покр. МЗНК, 6	0.6314	3.1502	2.2234
Покр. МЗНК, 7	2.0416	1.5180	2.0347
Покр. МЗНК, 8	2.2939	3.0430	2.0160
Покр. МЗНК, 9	2.0172	0.7980	2.2234
Покр. МЗНК, 10	0.8332	6.6124	1.8968
Покр. МЗНК, 11	0.9925	0.6457	4.8333
МЗНК	0.6314	0.6457	1.9218

2. Запропонований покращений МЗНК, який в порівнянні з МЗНК дозволяє знаходити набір рішень по покриттю території групою BC , серед яких може бути рішення з найменшою середньоквадратичною помилкою. Результати розрахунків адекватно враховують геометричну конфігурацію груп.

3. Для симетричної групи з однаковими навантаженнями на BC розрахунки оптимальних зон покриття МЗНК та покращеного МЗНК дають однаковий результат (див. рис. 4, 5). При несиметричних групах найкращий варіант за критерієм оптимальності міститься в векторі рішень покращеного МЗНК.

4. Поряд з прийнятними варіантами є варіанти, які на практиці не можуть бути використані. Вони характеризуються не виправдано заниженими або завищеними зонами охоплення окремих BC , а також великим значенням Φ .

5. Ряд вдалих варіантів рішень візуально мало відрізняються один від одного, проте саме в цій групі містяться найкращі рішення з точки зору критерію оптимальності.

6. Отриманий набір рішень дозволяє проводити вибір варіанту не тільки за критерієм оптимальності, але і виходячи з особливостей практичної ситуації. Зокрема, реальна обстановка не завжди вимагає пропорційного розподілу території між BC . Часто необхідно забезпечення зв'язку в якомусь важкодоступному місці. Тому слід окремо виділити групу рішень, які є актуальними не з точки зору оптимального, а локального покриття території з малою щільністю.

Перспективи подальших досліджень.

1. Підвищення рівня автоматизації розрахунків.

2. Доопрацювання після практичного тестування та подальшого впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лазарев, Ю.С. MatLab 5.x. [Текст] / Ю.С. Лазарев. – Киев : ВУН, 2000. – 384 с.
2. Основы сотового планирования [Текст] // БиЛайн университет, Вымпелком, 2005. – 210 с.
3. Бабков, В.Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование [Текст] / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 536 с.
4. Журкин, И.Г. Методы вычислений в геодезии: учебное пособие [Текст] / И.Г. Журкин, Ю.М. Нейман. – М.: Недра, 1988. – 304 с.
5. Егоров, Л.Л. Алгоритмы, методики и программный комплекс расчёта зон обслуживания базовых станций сотовых сетей связи: дис....канд. техн. наук: 05.13.18 [Текст]. – Томск, 2011. – 148 с.

Valerii BONDARENKO, Ihor KOZAR
Dnipro

GEOMETRIC METHODS FOR OPTIMIZING CLUSTERS OF CELLULAR BASE STATIONS

The In this paper the problem of telecommunication network planning is considered on the example of cellular networks. The multicriteria approach to its solution is demonstrated. Geometrical methods of optimization of construction of coverage areas of Note B and user equipment (UE) are considered.

Keywords: Cellular connectivity, Coverage areas, Positions selection, Planning optimization, Ordinary least squares.

Валерій БОНДАРЕНКО, Ігорь КОЗАРЬ
Дніпро

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ КЛАСТЕРОВ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ

В данной работе рассматривается задача планирования телекоммуникационных сетей на примере сетей сотовой связи. Продемонстрирован многокритериальный подход к ее решению. Рассматриваются геометрические методы оптимизации построения зон покрытия базовых и абонентских станций.

Ключевые слова: сотовая связь, зоны покрытия, выбор позиции, оптимизация планирования, метод наименьших квадратов.

Стаття надійшла до редколегії 19.03.2018