

УДК 681.3.06:621.396.2

А.О. Макаренко, Г.О. Гринкевич

Державний університет телекомунікацій, Київ

## ПРОГРАМА ПОПЕРЕДНЬОГО РОЗРАХУНКУ ЗОНИ РАДІОПОКРИТТЯ МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ В SEREDOVICHI MATHCAD

Розроблена програма автоматизації розрахунку зони радіопокриття базової станції при попередньому плануванні мережі в MathCad дозволяє знайти число базових станцій, які необхідно встановити для обслуговування з необхідною якістю заданої кількості абонентів; визначити доцільність застосування секторних антен для зменшення взаємних перешкод між станціями, що працюють у тому самому частотному каналі і розташовані в різних стільниках; знайти параметри, що визначають необхідну енергетику базових станцій.

**Ключові слова:** системи зв'язку з рухомими об'єктами, стільник, зона радіопокриття, навантаження, програма.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Системи зв'язку з рухомими об'єктами через принципове обмеження на випромінювану ними потужність, що накладається органами державного регулювання, не в змозі однією базовою станцією (БС) забезпечити радіопокриття великого за територією регіону через затухання радіохвиль. Тому вони будуються за принципом поділення регіону на певну кількість зон – стільників порівняно невеликої площі.

Завданням частотно-територіального планування є визначення оптимальної кількості і конфігурації розташування БС, а також вибір розподілу частот або груп частот для кожного стільника, які забезпечують покриття максимальної території при мінімальних матеріальних витратах і максимальній кількості каналів зв'язку в заданому діапазоні частот це, очевидно, багатоваріантне завдання, при рішенні якої враховується велика кількість найрізноманітніших чинників [1, 3, 4 – 6].

Тому, використання програм комп'ютерної математики [2] при автоматизації розрахунку зони радіопокриття БС дозволяє значно спростити і підвищити точність планування мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В стільникових системах з частотним або комбінованим частотно/часовим розподілом каналів при множинному доступі, наданий оператору за ліцензією частотний діапазон розподіляють між групою сусідніх стільників, що утворюють регіон, званий кластером [1, 3, 4 – 6]. Отже, всі БС стільників кластера працюють на різних частотах й не заважають одна одній. Кластер можна представити правильним (“великим”) шестикутником, що містить у собі шестикутники його стільників.

Робочі частоти БС стільників кластерів повторюються, але стільники з однаковими частотними каналами сусідніх кластерів розташовують так, щоб вони були максимально рознесені територіально. Повторне використання частот – це основний прин-

цип побудови системи стільникового зв'язку, який дозволяє суттєво (теоретично – до нескінченності) збільшувати ємність системи, тобто кількість каналів зв'язку, й охопити нею яку завгодно за розмірами територію.

Двомірна структура розташування стільникової мережі, що циклічно повторюється, можлива тільки при певній кількості стільників у кластері [3 – 6]:

$$C = i^2 + j^2 + ij, \quad (1)$$

де  $i, j$  – цілі позитивні числа, у тому числі 0. Отже, можливо 1, 3, 4, 7, 9, 12 і т.д. стільників у кластері.

Величину  $C$  визначає відношення [3]

$$D/R = q = \sqrt{3C}, \quad (2)$$

Її називають коефіцієнтом послаблення співканальних завад  $q$ , що взаємно створюють стільники сусідніх кластерів, які працюють на однакових частотах. При  $C = 7$  коефіцієнт  $q = 6$ , при  $C = 12$  коефіцієнт  $q = 6$ . Хоч кількість стільників у кластері не обмежена, обирати  $C$  дуже великим недоцільно. По-перше,  $q$  зростає пропорційно  $C$ . По-друге, із збільшенням  $C$  зменшується кількість частотних каналів в стільнику, збільшується обсяг обладнання системи, в тому числі й кількість БС. Тому кількість стільників в кластері треба обирати мінімально можливим, яке забезпечує допустиме відношення сигнал/завада [1].

**Мета даної статті** полягає в розробці програми автоматизації розрахунку зони радіопокриття базової станції при попередньому плануванні мережі в MathCad.

### Основний матеріал

Система стільникового зв'язку – це система масового обслуговування, особливістю якої є те, що тільки мала частина користувачів при великій їх загальній чисельності одночасно має потребу в послугах. Тому певною кількістю каналів зв'язку можна обслужити набагато більшу кількість користувачів. Потік заявок на послугу зв'язку (трафік) є випадковою величиною, що вимірюється в Ерлангах, причому його максималь-

не значення виявляється у час найбільшого навантаження доби. Якщо середня інтенсивність трафіка одного користувача складає  $A_1$  Ерланг, то це означає середньостатистичний користувач за час  $t$  використовує канал протягом  $A_1 t$ . Через те, що загальна кількість користувачів набагато перевищує число частотних каналів зв'язку, є вірогідність того, що користувач не зможе встановити з'єднання через тимчасову відсутність вільних каналів. Якщо у цьому випадку система працює за принципом: для організації з'єднання треба повторити виклик, то вона зветься системою з втратами. З точки зору користувача, що не може встановити з'єднання, система заблокована. Вірогідність блокування в системах з втратами виражається [3, 6] формулою Ерланга В

$$p_B = A^N / N! \sum_{k=0}^N (A^k / k!). \quad (3)$$

Вірогідність того, що всі канали вільні,

$$p_{B0} = 1 / \sum_{k=0}^N (A^k / k!), \quad (4)$$

вірогідність того, що зайнято  $D$  каналів

$$p_{Bk} = p_{B0} \frac{A^D}{D!}. \quad (5)$$

Середнє число зайнятих каналів

$$K_c = p_{B0} \sum_{k=1}^N \frac{A^k}{(k-1)!} \quad (6)$$

Якщо при тимчасовій відсутності вільних каналів система ставить користувача в чергу і задовольняє його вимогу по мірі звільнення каналів або видаляє з черги за певний термін очікування, то вона зветься системою з очікуванням. В системі з очікуванням вірогідність затримки (вірогідність того, що виклик, який надійшов, не обслуговується миттєво, а ставиться в чергу без обмеження часу перебування в ній) описується формулою Ерланга С

$$p_C = p_{C0} \frac{A^N N}{N!(N-A)}, \quad (7)$$

де  $p_{C0} = 1 / \left( \sum_{k=0}^{N-1} \frac{A^k}{k!} + \frac{A^N N}{N!(N-A)} \right)$  (8) вірогідність того, що в цій системі всі канали вільні.

В системі з обмеженням часу очікування та часу обслуговування після очікування, виклик, що надійшов у мить зайнятості всіх каналів, ставиться в чергу, однак час очікування не перевищує середнього терміну обслуговування (середньої тривалості розмови). Якщо за цей час хоча б один канал звільнюється, виклик займає його на частину середнього часу обслуговування, що лишилася, після чого скидається. В такій системі вірогідність відмовлення описується формулою Ерланга А

$$p_A = \sum_{k=N}^{\infty} \frac{A^k}{k!} e^{-A}. \quad (9)$$

При оцінках ємності систем стільникового зв'язку звичайно використовується модель Ерланга В (модель системи з відмовленнями). Обґрунтуванням цьому є те, що при малих вірогідностях відмовлення моделі Ерланга В та С дають достатньо близькі результати. У формулу (3) входять три параметри: число каналів  $N$ , трафік  $A$  та вірогідність відмовлення  $p_B$ . Якщо відомі любі два параметри, можна однозначно знайти третій. Найбільш доцільно застосувати автоматизований розрахунок у програмованому середовищі – у пакеті MathCad. При ньому вираз (3) записується у вигляді функції

$$f(x) = p_B \sum_{k=0}^N (A^k / k!) - A^N / N!, \quad (10)$$

де  $x$  – один з компонентів ( $p_B$ ,  $A$  або  $N$ ), що є невідомим.

**Розробка алгоритму розрахунку зони радіо покриття.** Алгоритм розрахунку зони радіопокриття при попередньому плануванні радіомережі [3, 5, 6] полягає у наступному.

Для складання повного частотного плану мережі персонального радіо виклику (МПР), тобто плану впровадження конкретних номіналів частот для кожної з БС, установлених на території міста, необхідно попередньо визначити основні параметри цього плану — розмірність кластера  $N$ ; число  $M$  секторів обслуговування в одному стільнику ( $M = 1$  при  $\Theta = 360^\circ$ ;  $M = 3$  при  $\Theta = 120^\circ$  і  $M = 6$  при  $\Theta = 60^\circ$ , де  $\Theta$  – ширина діаграм спрямованості антен БС); число  $k$  БС, які необхідно установити на території міста; радіус одного стільника  $R_0$ , км; потужність передавача БС  $P_{bs}$ , дБВт; висота підвісу  $h_{bs}$ , м, антени БС (висота антени мобільної станції (МС) приймається рівною  $h_{ns} = 1,5$  м). Перераховані параметри можна визначити, якщо відомі наступні дані:

$F$  – смуга частот у МГц, виділена для передачі сигналів БС МПР у даному місті;

$F_k$  – смуга частот у МГц, займана одним частотним каналом системи МПР;

$n_a$  – число абонентів, що одночасно можуть використовувати один частотний канал (для системи VMT  $n_a = 1$ , для LTE  $n_a = 8$ );

$N_a$  – число абонентів, що повинні обслуговувати стільникова МПР у даному місті;

$\beta$  – активність одного абонента в годину найбільшого навантаження в Ерлангах);

$p_a$  – припустима імовірність блокування виклику в стільниковій МПР;

$\rho_{об}$  – необхідне захисне відношення для приймачів МПР;

$\rho_t$  – відсоток часу, протягом якого допускається, щоб відношення сигнал/перешкода на вході приймача в МПР було менше захисного відношення  $\rho_0$ ;

$S$  – площа міста в км<sup>2</sup>, у якому розгорнута стільникова МПР;

$\alpha$  – параметр (дБ), що визначає діапазон випадкових флуктуацій рівня прийнятого сигналу в місці прийому (для систем МПР  $\alpha = 10$  дБ);

$P_{ms}$  – чутливість у дБ·Вт приймача МС;

$G_{bs}$  – коефіцієнт, дБ, підсилення антени БС.

Алгоритм визначення основних параметрів частотного плану для стільникової МПР у складається з восьми етапів [3, 6].

1. Визначається загальне число частотних каналів, виділених для розгортання стільникової МПР у даному місті

$$n_k = \text{int}(F/F_k), \quad (11)$$

де  $\text{int}(x)$  – ціла частина числа  $x$ . Обчислюється необхідна розмірність кластера при заданих  $\rho_0$  і  $\rho_t$  для чого використовується співвідношення

$$p(N) = 100 \int_{x_1}^{\infty} \exp(-t^2/2) dt, \quad (12)$$

де  $x_1 = |10 \log(1/\beta_e) - \rho_0|/\alpha_p$ ,  $\beta_e = \sum_{i=1}^l \beta_i 10^{0.1(x_i - x_e)}$ .

Коефіцієнти  $\beta_i$  визначають медіанне значення загасання радіохвиль на  $i$ -й трасі поширення перешкоди. Ці коефіцієнти зворотно пропорційні четвертому ступеню довжини траси поширення радіохвиль. Випадкові флуктуації загасання розподілені по логнормальному закону і визначаються величинами  $x_e$  і  $x_i$ :

$$p(x) = \exp(-x^2/2a^2)/(\alpha\sqrt{2\pi}). \quad (13)$$

В умовах міста  $\alpha = 4 \dots 10$  дБ. Значення  $l$  і  $\beta_i$  залежать від того, чи використовуються на БС ненаправлені або секторні антени:

$$\begin{cases} \text{якщо } M = 1, \text{ то } l = 6 \text{ і } \beta_1 = \beta_2 = (q-1)^{-4}; \\ \beta_3 = \beta_4 = q^{-4}; \beta_5 = \beta_6 = (q+1)^{-4}; \\ \text{якщо } M = 3, \text{ то } l = 2 \text{ і } \beta_1 = (q+1)^{-4}; \beta_2 = q^{-4}; \\ \text{якщо } M = 6, \text{ то } l = 1 \text{ і } \beta_1 = (q+1)^{-4}. \end{cases} \quad (14)$$

де  $q = D/R_0 = \sqrt{3}N$ .

Параметр  $x_e$  розподілений у нормальному законі ( $x_e = 0$ ).

$$\alpha_e^2 = \bar{x}_e^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left\{ \frac{1 + [\exp(\gamma^2 \alpha^2) - 1] \times}{\sum_{i=1}^l \left( \beta_i^2 / \left( \sum_{i=1}^l \beta_i \right)^2 \right)} \right\}, \quad (15)$$

де  $\beta_e = \left( \sum_{i=1}^l \beta_i \right) \exp \left[ \frac{\gamma^2}{2} (\alpha^2 - \alpha_e^2) \right]$ ,  $\gamma = 0.1 \ln 10$ .

Відношення сигнал/перешкода  $\rho = 10 \lg(p_s/p_i)$  на вході приймача визначається виразом

$$\rho = x_c - x_e - 10 \lg(\beta_e) \quad (16)$$

і розподілено по нормальному закону, причому

$$\bar{\rho} = 10 \lg(\beta_e); \quad (17)$$

$$\alpha_p^2 = \alpha^2 + \alpha_e. \quad (18)$$

Формула (12) визначає відсоток часу  $p(N)$ , протягом якого відношення сигнал/перешкода на вході

приймача МС нижче захисного відношення  $\rho_0$ . Величини  $\beta_e$ , і  $\alpha_p$  залежать від параметрів  $q = D/R_0 = \sqrt{3}N$ ,  $\alpha$ , а також  $M$ . Відсоток часу  $p(N)$  убуває з ростом  $N$ . При заданих  $\rho_0$ ,  $\alpha$  і  $M = 1; 3; 6$  виконується розрахунок значень  $p(N)$  для декількох величин  $N$  (тобто  $q$ ). Значення  $N$ , при якому виконується умова  $p(N) \leq p_t$  приймається за розмірність кластера МПР.

2. Знаходиться число частотних каналів, що використовуються для обслуговування абонентів в одному секторі одного стільника:

$$n_s = \text{int} \left( \frac{n_k}{MN} \right). \quad (19)$$

Визначається припустиме телефонне навантаження в одному секторі одного стільника (Ерланг):

$$A = \begin{cases} n_0 \left[ 1 - \sqrt{1 - (p_a \sqrt{\pi n_0 / 2})^{1/n_0}} \right], \\ \text{при } p_a \leq 2/(\pi n_0), \\ n_0 + \sqrt{\pi/2 + 2n_0 \ln(p_a \sqrt{\pi n_0 / 2} - \sqrt{\pi/2})}, \\ \text{при } p_a > 2/(\pi n_0), \end{cases} \quad (20)$$

де  $n_0 = n \cdot n_a$ .

3. Розраховується число абонентів, що обслуговуються однією БС при заданій імовірності блокування

$$N_{bs} = \text{Mint}(A/\beta). \quad (21)$$

4. Визначається число БС у стільниковій мережі

$$K = \text{int}(N_a/N_{bs}). \quad (22)$$

5. Знаходиться радіус одного стільника

$$R_0 = \sqrt{S/(\pi K)}. \quad (23)$$

6. Обчислюється  $P_{bs}$  при  $h_{bs} = \text{const}$ , або  $h_{bs}$  при  $P_{bs} = \text{const}$ , для чого застосовують рівняння

$$P_{ms} = P_{bs} + G_{bs} - 70 - 26,16 \lg(f_{MHz}) + 13,82 \lg h_{bs} - (45 - 6,55 \lg h_{bs}) \lg 0. \quad (24)$$

Приведений алгоритм дозволяє знайти всі необхідні параметри частотного плану стільникової МПР. При складанні повного частотного плану необхідно, знаючи число частотних каналів, що приходяться на кожну БС, і конфігурацію кластера, використовувати для побудови стільникової мережі, визначити конкретні номінали частот, що виділяються для роботи всіх БС одного кластера. Причому повинні бути зведені до мінімуму перешкоди між стільниками, у яких застосовуються сусідні частотні канали, а також інтермодуляційні перешкоди між частотними каналами, задіяними в одному секторі стільника.

Представлена процедура розрахунку основних параметрів частотного плану стільникової мережі рухомого радіозв'язку, розгорнутої в місті, дозволяє знайти число базових станцій, які необхідно встановити для обслуговування з необхідною якістю заданої кількості абонентів; визначити доцільність застосування секторних антен для зменшення взаємних перешкод між станціями, що працюють у тому

самому частотному каналі і розташовані в різних стільниках; знайти параметри, що визначають необхідну енергетику базових станцій [7, 8].

За визначеним вище алгоритмом розрахунку зони радіопокриття в інтегрованому середовищі MathCad розроблена програма [7 – 10].

Після присвоєння поточним змінним  $a_1$ ,  $p$ ,  $g$  значення 1 виконується перший локальний фрагмент – елементам матриці від  $a_1=1$  до  $a_{N_s}$ , де  $N_s$  – кількість частотних каналів у смузі частот, що виділена під мережу зв'язку, послідовно присвоюються числа натурального ряду. За другим локальним фрагментом в клітинах матриці, що залишаються після номеру  $N_s$  ставиться знак “-”. Третій локальний фрагмент записує саму матрицю. Результатом розрахунку є матриця розподілу частотного ресурсу між стільниками кластеру показана на рис. 2.

Matrix( $N_s, C_c, N_k$ ) =

"1А"	"2А"	"3А"	"1В"	"2В"	"3В"	"1С"	"2С"	"3С"
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81
82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	...

Рис. 2. Отримана матриця розподілу частотного ресурсу між стільниками кластеру

## Висновки

1. Програмне дослідження алгоритму попереднього розрахунку зон радіопокриття мережі стільникового зв'язку з частотно-часовим багатостанційним доступом до ресурсів зв'язку, викладеного, виявило його коректність, щодо визначення параметрів мережі.

## ПРОГРАММА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА ЗОНЫ РАДИОПОКРЫТИЯ СЕТИ СОТОВОЙ СВЯЗИ В СРЕДЕ MATHCAD

А.А. Макаренко, А.А. Гринкевич

Разработанная программа автоматизации расчета зоны радиопокрытия базовой станции при предварительном планировании сети в MathCad позволяет найти число базовых станций, которые необходимо установить для обслуживания с необходимым качеством заданного количества абонентов; определить целесообразность применения секторных антенн для уменьшения взаимных препятствий между станциями, которые работают в том же частотном канале и расположены в разных сотах; найти параметры, которые определяют необходимую энергетику базовых станций.

**Ключевые слова:** системы связи с подвижными объектами, сота, зона радиопокрытия, нагрузки, программа.

## THE PROGRAM OF PRELIMINARY CALCULATION OF ZONE OF RADIOCOVERAGE OF CELLULAR COMMUNICATION NETWORK IS IN THE ENVIRONMENT OF MATHCAD

A.A. Makarenko, G.A. Grynkevych

The worked out program of automation of calculation of zone of radiocoverage of the base station at the preliminary planning of network in MathCad allows to find the number of the base stations which must be set for service with necessary quality of the set amount of subscribers; to define expediency of application of sectoral aeriels for diminishing of mutual obstacles between the stations which work in the same frequency channel and located in different cellular; to find parameters which determine necessary energy of the base stations.

**Keywords:** communication networks with movable objects, cellular, zone of radiocoverage, loading, program.

2. Программований розрахунок зон радіопокриття дозволяє визначити альтернативні варіанти організації мережі за якими її розробник може виконати оптимізаційне дослідження по відповідному критерію, зокрема мінімуму витрат на обладнання мережі.

3. Потрібне удосконалення програм для автоматизації отримання плану територіального розподілу кластерів в регіоні.

## Список літератури

1. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособ. для вузов / В.А. Галкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 432 с.

2. Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.

3. Попов В. И. Основы сотовой связи стандарта GSM / В.И. Попов. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.

4. Ледовской А.И. Зачем нужны расчеты зон радиопокрытия / А.И. Ледовской, Е.О. Слабуха, А.И. Крикун // Мобильные системы. – 2004. – № 2. – С. 22-25.

5. Величко В.В. Передача данных в сетях мобильной связи третьего поколения / В.В. Величко; под ред. чл.-кор. РАН Ю.Б. Зубарева. – М.: Радио и Связь, Горячая линия - Телеком, 2005. – 332с., ил.

6. Веселовский Кишиштоф. Системы подвижной радиосвязи / Кишиштоф Веселовский. – М.: Горячая линия - Телеком, 2006. – 536 с.

7. Лунтовский А.О. Основы проектирования и оптимизации беспроводных сетей: моногр. / А.О. Лунтовский. – К.: ДУИКТ, 2010. – 202 с.

8. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: навчальний посібник / Є.М. Чернихівський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 272 с.

9. Гринкевич Г.О. Розробка імітаційної моделі та алгоритмів функціонування МІМО-системи / Г.О. Гринкевич, А.О. Макаренко // Зв'язок. – 2012. – № 2. – С.22-24.

10. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман, С.В. Кільчицький. – К.: Техніка, 2004. – 576 с.

Надійшла до редколегії 8.12.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. С.В. Толюпа, Державний університет телекомунікацій, Київ.