

ТЕРИТОРІАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ СОТОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ З ОЦІНКОЮ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ

Одним із шляхів підвищення частотної ефективності сотових мереж зв'язку (СМЗ) є, як відомо, повторне використання частотних каналів на просторово-рознесених базових станціях (БС). Питанню побудови площинних структур багаторазового використання частот на однакових за розмірами зонах БС присвячено велику кількість робіт [1;2]. Найбільш вживаною моделлю повторного використання частот є двовимірна модель періодичного повторення груп частот у зонах, які мають форму правильного шестикутника (див. рисунок). Відношення відстані D між БС, які використовують одну й ту ж саму групу частотних каналів, до радіусу R кола, яке описує зону однієї БС: $\frac{D}{R} = \sqrt{3C}$, де C — число усіх груп частотних каналів у системі, є оптимальним для цієї моделі, щоб забезпечити компроміс між частотною ефективністю системи та рівнем внутрішньоканальних накладень сигналів.

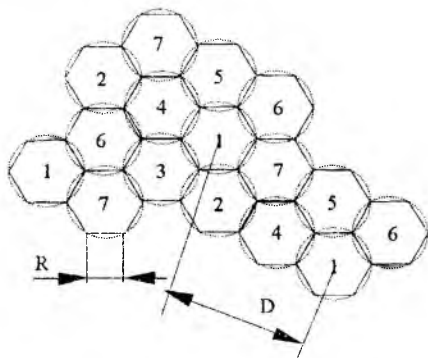
На етапі проектування СМЗ реальний рівень внутрішньоканальних накладень заводових сигналів від БС з однаковими активними частотами радіоканалів (РК) в основному каналі прийому АС, яка працює на частотах того ж РК і належить до відмінного від цих станцій кластеру, залишається невизначеним. Вирішення задачі прогнозування рівня внутрішньоканальних накладень заводових сигналів вимагає розробки адекватних моделей сигналів і завод та методики оцінки здатності радіоелектронних засобів зв'язку до сумісної роботи у рамках установленого критерію якості функціонування плануємої СМЗ.

З метою найбільш повної оцінки якості функціонування СМЗ були розроблені оригінальні статистичні моделі сигналів і завод, діючих у СМЗ високої пропускної здатності, і встановлений критерій якості функціонування СМЗ, який враховує можливі процедури взаємодії АС і БС у РК. Передбачається використання даних моделей і критерію на етапі проектування СМЗ для складання частотно-територіального плану мережі і попередньої оцінки її якості функціонування.

Модель флуктуації потужності результуючого заводового сигналу

На рисунку представлена типова схема утворення чарунок шестикутної форми при розміщенні БС СМЗ на території. Як впливає із

рисунка, на відстані D від центральної БС можуть розташовуватися шість БС, які мають співпадаючі із нею частотні канали. Ці шість БС утворюють так звану групу першого “завадового кільця”. Із дванадцяти БС другого “завадового кільця” частина розташовується на відстані $2D$ від центральної БС, а інша частина — на відстані $\sqrt{3}D$. Для спрощення аналізу умов функціонування лінії зв'язку БС—АС покладемо далі, що відстані від АС до суміжних БС однакові і дорівнюють максимальному значенню R , а до впливаючих БС першого та другого “завадових кілець” відповідно D та $2D$: АС у цьому випадку необхідно розміщується у центрі зони БС.



Накладення сигналів від БС першого “завадового кільця” на вході приймача АС визначимо як суму випадкових величин — миттєвих потужностей відповідних сигналів

$$P_n = P_{n_1} + \dots + P_{n_6}, \quad (1)$$

де P_{n_i} — миттєва потужність завади від i -ї БС на вході приймача АС.

Використовуючи загальнозживану модель релеевських завмирань обвідної приймаемого сигналу, закон розподілу миттєвої потужності i -ї завади подамо у вигляді

$$\omega_{\xi_i}(P_{n_i}) = \frac{1}{P_{n_i}} \cdot \exp\left(-\frac{P_{n_i}}{P_{n_i}}\right). \quad (2)$$

Покладемо далі, що середні значення потужностей завад від першого “завадового кільця” співпадають: $\overline{P_{n_1}} = \overline{P_{n_2}} = \dots = \overline{P_{n_6}} = a$. За результатами вимірювань, які проводились на лініях сотового рухомого зв'язку [1], було встановлено, що середні потужності сигналів

підпорядковуються повільним флуктуаціям, які можуть бути передбачені логнормальним законом розподілу ймовірностей

$$\omega(a) = \frac{4,34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_a \cdot a} \cdot \exp\left(\frac{-(10 \cdot \lg(a) - m_a)^2}{2 \cdot \sigma_a^2}\right) \quad (3)$$

Інтерес викликають залежності параметрів закону (3) від морфології утворення територіального плану СМЗ й, насамперед, від відстані, яка розділяє впливаючу БС та АС, яка зазнає її впливу. Обробка результатів багатьох вимірювань методом регресійного аналізу дає наближену залежність m_a від відстані у формі $\approx -10 \cdot n \cdot \lg(D)$, де $n = 4,5$ для густонаселених районів і $n = 2$ для вільного простору. Параметр σ_a визначає розкид рівня $10 \cdot \lg(a)$ [1].

Характеристична функція суми завад (1) за припущення їх випадкової кількості має вигляд

$$\theta_{\xi_v}(s) = \sum_{r=1}^6 p_r \cdot \theta_{\xi_i}^r(s), \quad (4)$$

де r — випадкова величина, яка має біноміальний закон розподілу

$$p_r = C_r^6 \cdot v^r \cdot (1-v)^{6-r}, \quad (5)$$

C_r^6 — число усіх комбінацій із шести елементів по r ; v — ймовірність блокування i -го частотного каналу на БС;

$$\theta_{\xi_i}^r(s) = \left(\int_0^{\infty} \frac{1}{(1+a \cdot s)} \cdot \frac{4,34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_a \cdot a} \cdot \exp\left(\frac{-(10 \cdot \lg(a) - m_a)^2}{2 \cdot \sigma_a^2}\right) da \right)^r \quad (6)$$

Запис виразу для $\theta_{\xi_v}(s)$ враховує ймовірність p_r наявності r -го числа БС, які впливають по основному каналу прийому АС. Припускалось також, що кожна БС обслуговує телефонне навантаження у ρ ерлангів із використанням N розмовних каналів. Ймовірність блокування абонентських викликів складає у цьому випадку величину v^N .

Аналізуючи випадок приходу у точку прийому завад від другого “завадового кільця”, домовимося, що усі БС із першого “завадового кільця” є одночасно активними. Характеристична функція суми потужностей завад у цьому разі набуває вигляду

$$\bar{\omega}_{\zeta_v}(s) = \left(\frac{4.34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_a} \cdot \int_0^{\infty} \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{1+a \cdot s} \cdot \exp\left(\frac{-(10 \cdot \lg(a) - m_a)^2}{2 \cdot \sigma_a^2} \right) da \right)^6 \cdot \sum_{r=1}^{12} p_r \cdot \bar{\omega}_{\xi_i}^r(s), \quad (7)$$

$$\text{де } \bar{\omega}_{\xi_i}^r(s) = \left(\int_0^{\infty} \frac{1}{(1+b \cdot s)} \cdot \frac{4.34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_b \cdot b} \cdot \exp\left(\frac{-(10 \cdot \lg(b) - m_b)^2}{2 \cdot \sigma_b^2} \right) db \right)^r. \quad (8)$$

Припущення щодо характеру флуктуацій середньої потужності b сигналу завади, яке було висловлене вище, залишається справедливим й у цьому випадку. Обчислення зворотнього перетворення Лапласа від (4) і (7) дасть густини розподілу ймовірностей (ГРЙ) миттєвих потужностей результуючих завод від одного й двох кілець відповідно $\omega_{\zeta_v}(P_n)$ і $\bar{\omega}_{\zeta_v}(\bar{P}_n)$.

Модель корисного сигналу

Як відомо, модель релеевських завмирань сигналів враховує випадок наявності однієї із найгірших умов прийому сигналів у СМЗ. Використання цієї моделі для формування моделі корисного сигналу дозволить віднести розраховану нижче ефективність роботи РК до нижньої межі якості функціонування устанавленого РК. Окрім релеевської моделі завмирань корисного сигналу, для якої флуктуації миттєвої потужності сигналу враховуються формулою

$$\omega_c(P_c) = \frac{1}{P_c} \cdot \exp\left(\frac{-P_c}{P_c} \right), \quad (9)$$

модель сигналу може враховувати і системні рішення, які торкаються, наприклад, питань організації методів рознесенного прийому та протоколів підтримування безперервного зв'язку у СМЗ. Так, якщо контроль рівня сигналу від АС проводять дві БС, передача управління АС повинна здійснюватися до тієї БС, яка фіксує більший рівень сигналу.

Назвемо повільною передачею управління процедуру передачі, згідно з якою призначення нової БС для супроводу АС здійснюється за результатами контролю середньої потужності корисного сигналу. У цьому випадку ГРЙ середньої потужності корисного сигналу при розміщенні АС на межі зон двох суміжних БС буде мати вигляд

$$\omega_{(2)}(c) = \frac{4.34^2}{\pi \cdot \sigma_c^2 \cdot c} \cdot \exp\left(\frac{(\ln(c) - \ln(c_m))^2}{-0.106 \cdot \sigma_c^2}\right) \cdot \int_0^c \frac{1}{z} \cdot \exp\left(\frac{(\ln(z) - \ln(c_m))^2}{-0.106 \cdot \sigma_c^2}\right) dz, \quad (10)$$

де $c \equiv \bar{P}_c$; c_m — медіанне значення P_c .

Безумовна ГРІ миттєвої потужності сигналу $\omega_{c(2)}(P_c)$ знаходиться шляхом усереднювання (9) по флуктуаціям P_c .

Критерій відмови РК

На рисунку можна помітити, що АС буде вимагати виконання процедури передачі радіоуправління на межі двох або трьох зон суміжних БС. В усіх двох випадках розташування АС відмова встановленого РК настає тоді, коли миттєве відношення сигнал\(\{взаємна завада + шум\}) на вході приймача АС стає нижчим від допустимого рівня, який визначається параметрами системи і вимогами до якості обслуговування абонентів. Таким чином, у точці розташування АС необхідно, щоб виконувалась умова

$$P(h^2 \leq h_0^2) \leq P_0, \quad (11)$$

де $h^2 = \frac{P_c}{(P_n + P_u)}$ — миттєве відношення сигнал\(\{взаємна завада + шум\}) на вході приймача АС; P_u — потужність теплового шуму приймача АС (тепловий шум приймача АС у більшості випадків можна охарактеризувати як білий шум [3]); h_0^2 — допустиме мінімальне відношення сигнал\(\{взаємна завада + шум\}) при якому якість передачі інформації ще відповідає нормам; P_0 — допустима максимальна ймовірність відмови РК.

Енергетичний критерій відмови РК, коли (11) перетворюється на нерівність $P(h^2 \leq h_0^2) > P_0$, записується відносно миттєвих значень потужностей корисного та завадового сигналів. Розгляд критеріїв відмовостійкості встановленого РК, які містять миттєві значення потужності корисного сигналу, має особливе значення для цифрових сотових систем зв'язку, де пороговий ефект, пов'язаний із зменшенням миттєвого значення потужності корисного сигналу до величини меншої за допустиму, швидко встановлюється шляхом аналізу статистики помилок у цифровому каналі.

Запишемо ймовірність $P_j(h^2 \leq h_0^2)$ для чотирьох визначених

нижче випадків:

1 — АС знаходиться на межі зон 2-х суміжних БС, присутні завади від БС лише першого “завадового кільця”: $j=1$;

2 — АС знаходиться на межі зон 2-х суміжних БС, одночасно діють завади від БС двох “кілець завод”: $j=2$;

3 — АС контролюється однією БС, присутні завади від БС лише першого “завадового кільця”: $j=3$;

4 — АС контролюється однією БС, одночасно діють завади від БС двох “кілець завод”: $j=4$.

Відповідні значення $P_j(\cdot)$ мають вигляд:

$$P_1 = 1 - \int_0^{\infty} \theta_{\zeta_v} \left(\frac{h_0^2}{c} \right) \cdot \exp \left(-\frac{h_0^2}{c} P_{ш} \right) \cdot \omega_{(2)}(c) dc, \quad (12)$$

$$P_2 = 1 - \int_0^{\infty} \tilde{\theta}_{\zeta_v} \left(\frac{h_0^2}{c} \right) \cdot \exp \left(-\frac{h_0^2}{c} P_{ш} \right) \cdot \omega_{(2)}(c) dc, \quad (13)$$

$$P_3 = 1 - \int_0^{\infty} \theta_{\zeta_v} \left(\frac{h_0^2}{c} \right) \cdot \exp \left(-\frac{h_0^2}{c} P_{ш} \right) \cdot \omega(c) dc, \quad (14)$$

$$P_4 = 1 - \int_0^{\infty} \tilde{\theta}_{\zeta_v} \left(\frac{h_0^2}{c} \right) \cdot \exp \left(-\frac{h_0^2}{c} P_{ш} \right) \cdot \omega(c) dc. \quad (15)$$

Вирази (12—15) дійсні для випадку реалізації повільної процедури передачі управління АС за результатами вимірювання середнього значення потужності корисного сигналу. Функція $\omega(c)$, яка входить до (14) і (15), має вигляд

$$\omega(c) = \frac{4.34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_c \cdot c} \exp \left(\frac{-(\ln(c) - \ln(c_m))^2}{0.106 \cdot \sigma_c^2} \right). \quad (16)$$

Крім зазначеного контролю, контроль у сотових системах зв'язку можна здійснювати і на основі інших методів [1; 2]. Наприклад, якщо передача управління АС відбувається згідно з результатами вимірювання миттєвого відношення сигнал / (взаємна завада + шум), відповідні значення P_j будуть мати де-що інший вигляд. Так флуктуації середнього значення потужності корисного сигналу будуть визначатися законом (16). Використовуючи відоме інтегральне перетворен-

ня [3], визначимо ГРЙ миттєвого відношення сигнал / (взаємна завада + шум) на вході приймача АС у випадку взаємодії АС із двома суміжними БС

$$\omega(h^2) = 2 \int_0^{\infty} z \cdot \omega_c(h^2 \cdot z) \cdot \omega_{\zeta_v}(z - P_{us}) dz \left(\int_0^{h^2 \cdot \infty} \int_0^{\infty} z \cdot \omega_c(l^2 \cdot z) \cdot \omega_{\zeta_v}(z - P_{us}) dz dl^2 \right). \quad (17)$$

Функція $\omega_c(h^2 \cdot z)$ тут має вигляд

$$\omega_c(h^2 \cdot z) = \int_0^{\infty} \frac{4.34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_c \cdot c^2} \cdot \exp\left(-\frac{h^2 \cdot z}{c} - \frac{(\ln(c) - \ln(c_m))^2}{0.106 \cdot \sigma_c^2}\right) dc. \quad (18)$$

Вираз (17) враховує лише факт присутності заводових сигналів від БС першого “заводового кільця”. Вирази однакової структури можна записати і для випадку наявності у точці прийому завод від другого “заводового кільця”.

Оцінки верхньої границі ймовірності відмови РК для зазначених випадків мають вигляд

$$P_5 \cong \sqrt{2} \cdot P_1, \quad (19)$$

у випадку взаємодії АС із двома суміжними БС, присутні завади від БС лише першого “заводового кільця”;

$$P_6 \cong \sqrt{2} \cdot P_2, \quad (20)$$

у випадку взаємодії АС із двома суміжними БС, одночасно діють завади від БС двох “кілець завод”.

Оцінки (19—20) були отримані за допомогою використання

нерівності Коші—Шварца до інтеграла $\int_0^{h_0^2} \omega(h^2) dh^2$.

Розглянуті вище процедури передачі управління АС можна віднести до методів рознесенного прийому, коли забезпечується компенсація крупномасштабних змін рівня сигналу (-ів). На відміну від них, існуючі методи мікрорознесення на прийомі: автовибір, складання з рівними вагами тощо, можуть бути використані у кожному із розглянутих випадків. Так для випадку організації методу автовибору із М гілками рознесення, критерій відмови устанавленого РК із АС перепишемо у вигляді

$$\left(P(h^2 < h_0^2) \right)^M \geq P_0. \quad (21)$$

Таблиця містить розраховані ймовірності відмови встановленого РК для широкого кола умов, які можуть існувати у діючих СМЗ. Розрахунки¹ проводилися за встановленими вище формулами для обмежених інтервалів зміни середніх потужностей сигналів і завод, характерних для СМЗ, розміщених у великих містах [1,2]. При цьому для коректного обчислення P_j у разі зміни попередніх інтервалів інтегрування були введені нормуючі множники

$$A_1 = \left(\left(\sum_{r=1}^6 P_r \cdot \left(\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{4.34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_a \cdot a} \cdot \exp \left(\frac{-\left(10 \cdot \lg(a) - m_a\right)^2}{2 \cdot \sigma_a^2} \right) da \right)^r \right)^{c_{\max}} \cdot \int_{c_{\min}}^{c_{\max}} \omega_{(i)}(c) dc \right)^{-1} \quad (22)$$

для P_1 і P_3 , де інтервали від 0 до ∞ замінені на відповідні для змін c та a ;

$$A_2 = \left(\left(\sum_{r=1}^{12} P_r \cdot \left(\int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{4.34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_b \cdot b} \cdot \exp \left(\frac{-\left(10 \cdot \lg(b) - m_b\right)^2}{2 \cdot \sigma_b^2} \right) db \right)^r \right) \cdot \left(\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{4.34}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_a \cdot a} \cdot \exp \left(\frac{-\left(10 \cdot \lg(a) - m_a\right)^2}{2 \cdot \sigma_a^2} \right) da \right)^6 \right)^{c_{\max}} \cdot \int_{c_{\min}}^{c_{\max}} \omega_{(i)}(c) dc \right)^{-1}, \quad (23)$$

для P_2 і P_4 .

Через аналіз даних таблиці можна формулювати вимоги до порядку призначення однакових частот БС СМЗ, виходячи із вимог щодо надійності встановленого РК, технічних характеристик системи зв'язку й усереднених статистичних характеристик поширення сигналів на території, яку покриватиме СМЗ. Як показують результати аналізу, досить проблематично забезпечити ймовірність відмови встановленого РК за привалюючих дій соканальних завод меншу за 10^{-2} , навіть для $h_0^2=10$, без застосування спеціальних мір по штучному підвищенню відмовостійкості РК: розробки заводостійких демодуляторів і кодеків, які знижують величину h_0^2 , використання методів рознесеного прийому сигналів на АС та спеціальних алгоритмів передачі управління АС із числом задіяних БС більшим за дві. Побудова СМЗ

¹ У всіх випадках ν^N дорівнює 10%

Максимальне число завод	6	6	6	12	12	6	12
$[a_{\min}, a_{\max}]$, Вт	$10^{-15,6}$ $10^{-11,4}$	10^{-16} 10^{-13}	10^{-16} 10^{-13}	10^{-15} 10^{-12}	10^{-16} 10^{-13}	$10^{-15,6}$ $10^{-11,4}$	10^{-15} 10^{-12}
m_a , дБВт	-137	-145	-145	-137	-145	-137	-137
σ_a , дБ	6	7	7	7	7	6	7
m_a/m_b , дБ	—	—	—	8	10	—	8
$[b_{\min}, b_{\max}]$, Вт	—	—	—	10^{-15} 10^{-14}	10^{-16} 10^{-15}	—	10^{-15} 10^{-14}
σ_b , дБ	—	—	—	7	7	—	7
D/R ш	7	18	18	7	18	7	7
$[c_{\min}, c_{\max}]$, Вт	10^{-13} $10^{-10,5}$	10^{-13} $10^{-10,5}$	10^{-13} $10^{-10,5}$	10^{-13} $10^{-10,5}$	10^{-13} $10^{-10,5}$	10^{-13} $10^{-10,5}$	10^{-13} $10^{-10,5}$
c_m , пВт	1	1	1	1	1	1	1
σ_c , дБ	6	6	6	6	6	6	6
h_0^2	10	10	10	10	10	10	10
Ймовірність відмови	0,3	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	0,75	0,25	<0,4	<0,9
Контроль переклю-чення каналів	*	*	*	*	*	**	**
Контроль АС	1БС	1БС	2БС	1БС	2БС	2БС	2БС
Ймовірність відмови для $M = 2$	$9 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	0,6	$6 \cdot 10^{-2}$	<0,16	<0,8

високої пропускної здатності без застосування цих мір у комплексі практично неможлива: відношення медіанних значень потужностей корисного сигналу і завади для коефіцієнта повторення частот рівного 6, яке необхідне для забезпечення ймовірності відмови встановленого РК меншої за $4 \cdot 10^{-3}$ (4-й стовпчик таблиці), становить у цьому випадку близько 40 дБ, що не дозволяє розмістити БС із однаковими наборами частот на обмеженій території міста, адже період повторення "однакових" БС буде становити у цьому випадку близько 50 БС (для інтервалів зміни середніх потужностей сигналів і завод із таблиці). Дані із таблиці наведені для випадку, коли $P_{ш} \cong 0,2$ фВт і коли контроль АС може проводити одна БС—1БС та дві БС—2БС. Усі ймовірності представляють тут нижню межу якості роботи встановле-

II * — контроль здійснюється за середнім рівнем сигналу; ** — контроль здійснюється за миттєвим відношенням сигнал / (взаємна завада + шум).

III Для $n = 2 - 3$.

ного РК. Передбачається, що наявність регулярної складової корисного сигналу на прийомі призведе до більш оптимістичного результату у цьому відношенні.

Список літератури: 1. *Варакін Л.Е.* Сотовые системы подвижной связи // Зарубежная радиоэлектроника, 1986, № 2. 2. *Варакін Л.Е., Луцянова О.Л., Трубін В.Н.* Состояние и перспективы развития систем подвижной связи // Электросвязь, 1986, № 12. 3. *Левін Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

*Харківський державний технічний
університет радіоелектроніки*

Надійшла до редколегії 03.09.98