

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОЛІНІЙ ТРАНКІНГОВОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ В СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ УМОВАХ

У статті розглянута математична модель функціонування підсистеми базових станцій транкінгової системи зв'язку в конфліктних умовах завадого впливу.

Ключові слова: радіозасоби, радіозавада, система масового обслуговування, поширення радіохвиль, математична модель

На сьогоднішній день технології транкінгового зв'язку залишаються актуальними для їх використання у цілях спеціальних служб. Основним призначенням транкінгових систем зв'язку (ТСЗ) є забезпечення ретрансляції повідомлень радіоабонентів, що перебувають в межах зони радіопокриття ТСЗ, і їх доступу до інформаційного простору транспортної телекомунікаційної мережі. Особливістю функціонування будь-яких спеціальних служб є необхідність в оперативному та надійному рухомому зв'язку, і будь яка радіозавада, як не навмисна, так і навмисна може привести до важких наслідків втрати управління, як то: зрив спецоперації органів внутрішніх справ, ненадання допомоги хворому, некерування діям по ліквідації наслідків стихійного лиха або невдачі у військовій операції.

Звичайні ТСЗ не використовують спеціальних технологій адаптації радіоліній до завад, тому, при впровадженні і застосуванні цих систем необхідне прогнозування імовірних втрат зв'язку в наслідок можливих дій завад різного типу. Основою для створення стійкого радіопокриття в цих умовах є частотно-територіальне планування підсистеми базових станцій (ПБС). Задача зменшення впливу завад на елементи ТСЗ вимагає оцінки того чи іншого варіанта її застосування до початку функціонування.

Прогнозування стану ТСЗ пов'язано з необхідністю розробки математичної моделі процесу конфліктного функціонування радіозасобів (РЗ) ТСЗ та імовірних джерел завад. Модель повинна враховувати технічні характеристики РЗ ТСЗ та джерел завад, їх взаємного просторового розташування та заданого рельєфу місцевості, і визначати потенційну здатність ПБС здійснювати зв'язок із РС, що знаходяться в її зоні обслуговування.

В умовах складної радіоелектронної обстановки *критерієм ефективності* функціонування ПБС доцільно прийняти імовірність своєчасної доставки повідомлення між рухомими і базовими станціями [1]. Отримання кількісних характеристик конфліктної протидії радіоліній ПБС та джерел завад за показником імовірності своєчасної передачі повідомлення вимагає розгляду процесу передачі інформації по радіолінії в умовах дії завад. Формалізована модель функціонування радіолінії, що діє в умовах можливих радіозавад, наведена на рис. 1.

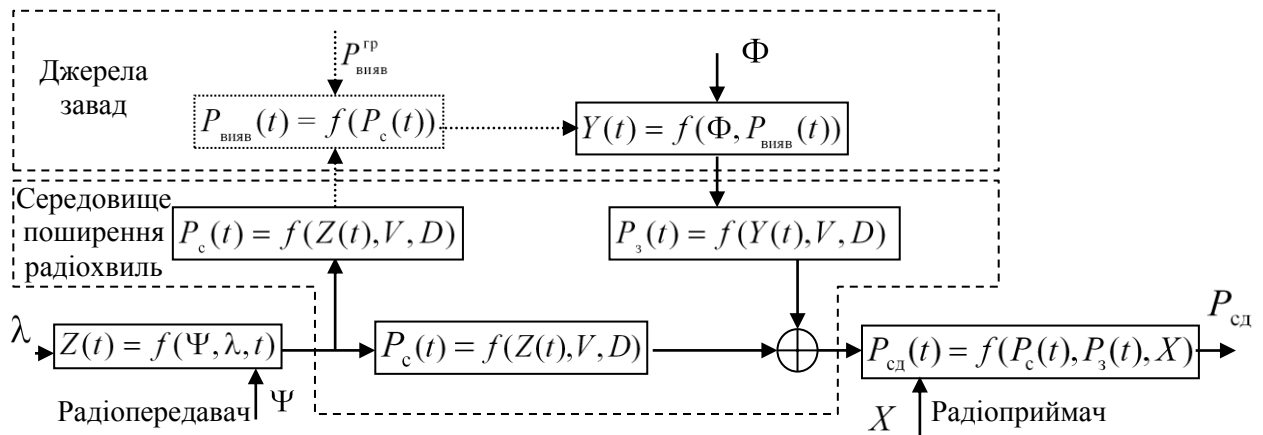


Рис. 1. Формалізована модель функціонування радіолінії, що діє в умовах завад

У даній моделі вихідними даними для розрахунків є технічні та просторово-географічні характеристики РЗ (Ψ – радіопередавач, X – радіоприймач) та джерел завад – Φ , склад яких розглядається

у виразах (1, 9, 10, 12, 15, 16, 20). Інформаційними характеристиками є вхідний потік повідомлень λ , який поряд із характеристиками Ψ формують характеристики випромінювання радіопередавача $Z(t)$ на момент часу t . Пунктиром позначений радіоелектронний комплекс зломисника, призначення якого є виявлення корисного сигналу і навмисної постановки прицільної за спектром завади. Завади характеризуються етапом веденням розвідки (у випадку постановки навмисних завад), та безпосередньо характеристиками передавача радіозавад. Виявлення РЗ здійснюється на основі виявлення сигналу радіопередавача $P_c(t) = f(Z(t), V, D)$, який є функцією від характеристик випромінювання $Z(t)$, згашання сигналу на трасі поширення V та дальності D . Характеристики випромінювання передавача радіозавад визначаються функцією $Y(t)$, аргументами якої є характеристики передавача завад – Φ , та ймовірність виявлення радіопередавача $P_{\text{вияв}}(t)$. Результатом впливу завад є наявність на вході радіоприймача суміші корисного сигналу P_c та завади P_z . Здатність радіоприймача виділяти корисний сигнал на фоні завади визначає ймовірність своєчасної доставки повідомлень $P_{\text{сд}}(t)$.

Для кількісної оцінки здатності функціонування радіоліній ПБС в складних радіоелектронних умовах здійснено математичний опис процесу передачі повідомлень. Процес функціонування більшості радіосистем із множинним доступом (РСМД) можна описати моделями багатоканальних систем масового обслуговування (СМО) з очікуванням [2]. До РСМД можна віднести цифрові системи рухомого стільникового зв'язку стандарту GSM, транкінгові системи, системи радіозв'язку з пакетною комутацією, мережі стандарту 3G. Для спрощення моделювання процесу функціонування ПБС доцільно зведення двополосних мереж передачі дискретних повідомлень (радіоліній) ПБС до багатополосної мережі радіального типу.

Для уточнення характеру функціонування радіоліній ПБС ТСЗ зробимо наступні припущення, що основані на [3 – 6]:

- закони розподілення випадкової величини інтенсивності вхідного потоку, інтенсивності старіння повідомлення приймаються експоненціальними (M), закон розподілення часу обслуговування приймається регулярним (D);
- вважається, що придушення радіоліній ПБС здійснюється широкосмуговою завадою із шириною спектру (найгірший варіант), який дорівнює ширині смуги частот усіх радіоканалів базової станції, тобто спектральна щільність завади в усіх радіоканалах, що можуть надаватися РС, однакова;
- приймаємо, що РС мають рівномірне розташування у просторі. У подальшому переміщення рухомих станцій не враховуються, так як це призведе до значного ускладнення моделі та не є принципово важливим при оцінці втрати зон обслуговування БС при здійсненні радіопридушення;
- технічна надійність засобів, що входять у ПБС, приймається ідеальною.

Згідно із класифікацією СМО, запропонованою Кендаллом [6], радіолінії ПБС можна представити стохастичною моделлю СМО виду $M/1/r_0^n/d_1$ – одноканальну неперіоритетну СМО з пуасонівським вхідним потоком повідомлень, з ідеальною надійністю, з відмовами та з урахуванням повторних викликів і прямим порядком обслуговування (рис. 2).

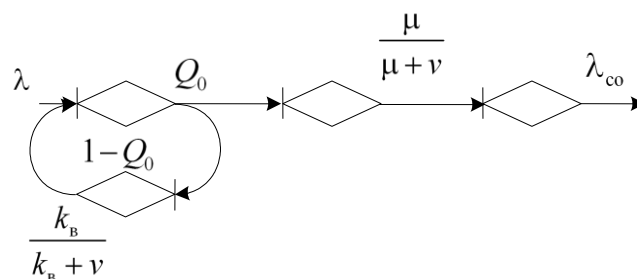


Рис. 2. Стохастична модель каналу $M/1/r_0^n/d_1$

Згідно із [6], ймовірність своєчасної доставки повідомлення моделі $M/1/r_0^n/d_1$ становить

$$P_{\text{сд}} = \frac{Q_0}{1 - (1 - Q_0) \frac{k_B}{k_B + v}} \frac{\mu}{\mu + v}, \quad (1)$$

де Q_0 – імовірність обслуговування по Ерлангу, $Q_0 = \frac{1}{1 + \lambda/\mu}$; μ – інтенсивність обслуговування повідомлень; λ – інтенсивність вхідного потоку повідомлень; $\mu/(\mu + \nu)$ – імовірність своєчасного обслуговування повідомлення; $\nu = 1/T_d$ – інтенсивність старіння інформації, T_d – допустимий середній час старіння інформації; k_b – інтенсивність повторних викликів.

Особливістю функціонування базових станцій є те, що процедура обслуговування здійснюється шляхом динамічного розподілу обмеженої кількості радіоканалів між великою кількістю абонентів. Протоколи множинного доступу стандартів транкінгового зв'язку визначають наступний порядок обслуговування: зв'язок між РС і БС здійснюється при отриманні виклику по службовому каналу від РС і наявності вільного радіоканалу БС; РС отримує відмову в обслуговуванні при відсутності вільного каналу, повторний виклик на БС здійснюється через випадковий час t_b [7]. Вибір часу повторного виклику РС здійснюється генератором рівномірно розподілених випадкових чисел у деяких межах часу $t_b^{\min} \leq t_b \leq t_b^{\max}$. Для визначення інтенсивності надходження повторних викликів визначимо середній час надходження повторного виклику

$$\bar{t}_b = \frac{t_b^{\max} - t_b^{\min}}{2}. \quad (2)$$

Звідси інтенсивність надходження повторних викликів від РС становитиме

$$k_b = 1/\bar{t}_b. \quad (3)$$

Здійснимо зведення моделей радіоканалів типу $M/1/r_0^n/d_1$ (вираз (1)) до моделі багатополусної радіальної мережі передачі дискретних повідомлень типу $M/S/r_0^n/d_1$ (рис. 3).

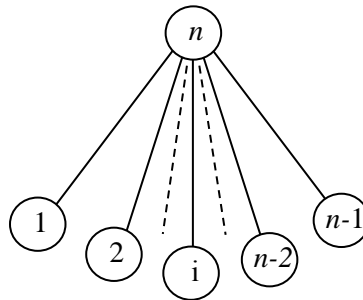


Рис. 3. Модель багатополусної радіальної СМО типу $M/S/r_0^n/d_1$

Багатополусна радіальна мережа передачі дискретних повідомлень (рис. 3) представлена у вигляді $n-1$ двополусних мереж, що замикаються на БС – n . Загальна кількість каналів БС становить $n-1$. Визначимо імовірність своєчасної доставки повідомлення у i -му радіоканалі багатополусної радіальної мережі. Згідно з [8], імовірність того, що заявка буде прийнята до обслуговування багатоканальною СМО (імовірність збереження незайнятого стану багатоканальної СМО) становитиме

$$Q_0 = 1 - Q_{\text{відм}}, \quad (4)$$

де $Q_{\text{відм}}$ – імовірність відмови заявці в обслуговуванні, яка відповідно до [8] визначається виразом

$$Q_{\text{відм}} = \frac{\rho^n}{\sum_{k=0}^n \rho^k / k!}, \quad (5)$$

де n – кількість каналів СМО; ρ – приведена інтенсивність навантаження, $\rho = \Lambda / \mu$; μ – інтенсивність обслуговування; $\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$ – інтенсивність вхідного потоку повідомлень багатоканальної СМО (БС), де N – кількість РС в зоні обслуговування БС, λ_i – інтенсивність вхідного потоку від i -ої РС.

Вважаючи, що інтенсивність обслуговування μ БС буде визначатися різними інтенсивностями обслуговування каналів РС – БС – μ_i , для визначення μ доцільно скористатися властивістю адитивності інтенсивності обслуговування [6]

$$\mu_y = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i}{N}, \quad (6)$$

де μ_i – інтенсивність обслуговування i -го каналу.

Це дозволяє ввести умовний канал в багатоканальній СМО, який характеризує деякий канал з усередненими внутрішніми параметрами. Таким чином, з урахуванням виразів (3) – (6), імовірність своєчасної доставки повідомлення у i -му радіоканалі ПБС, яка представлена багатоканальною СМО, становитиме

$$P_{сдi} = \frac{1 - \left(\frac{(\Lambda / \mu_y)^n}{n!} \right) / \left(\sum_{k=0}^n \frac{(\Lambda / \mu_y)^k}{k!} \right)}{1 - \left[\left(\frac{(\Lambda / \mu_y)^n}{n!} \right) / \left(\sum_{k=0}^n \frac{(\Lambda / \mu_y)^k}{k!} \right) \right] \frac{k_B}{k_B + \nu}} \cdot \frac{\mu_i}{\mu_i + \nu}. \quad (7)$$

Імовірність забезпечення БС своєчасної доставки повідомлень у багатополосній радіальній мережі передачі дискретних повідомлень для РС, що знаходяться у зоні обслуговування БС, може бути визначена за наступним виразом [6]

$$P_{сд\Lambda} = \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i P_{сдi}, \quad (8)$$

де n – загальна кількість полюсів мережі; λ_i – інтенсивність вхідного потоку повідомлень i -го радіоканалу; Λ – сумарна інтенсивність вхідного потоку повідомлень БС; $P_{сдi}$ – імовірність своєчасної доставки повідомлення у i -му радіоканалі.

Визначення показників виразів (7 – 8) для оцінки функціонування ПБС в умовах радіозавад потребує розгляду внутрішніх характеристик радіоканалів з урахуванням специфіки радіозв'язку та конфліктної протидії джерел радіозавад. До основного внутрішнього параметра радіоканалів ПБС відноситься інтенсивність обслуговування μ . При експоненціальному розподіленні часу обслуговування, що було визначено в припущеннях, інтенсивність обслуговування становить [6]

$$\mu = 1 / T_c = C_e / V, \quad (9)$$

де T_c – середній час обслуговування повідомлень; C_e – експлуатаційна пропускна здатність; V – середній об'єм повідомлень.

Для радіоканалу, у трафіку якого можуть проходити не тільки мовні, але і документальні повідомлення, пропускна здатність часто визначається як середнє число пакетів в одиницю часу при заданій інформаційній швидкості джерела [9]:

$$C_e = \frac{1}{T_c} = \frac{V_i}{N}, \quad (10)$$

де T_c – тривалість доставки одиничного елемента повідомлення; V_i – інформаційна швидкість; \bar{N} – середнє число одиничних елементів (біт) на 1 повідомлення. Верхня границя інформаційної швидкості обмежена характеристиками радіоканалу i (за Шенноном) не може перевищувати його теоретичну пропускну здатність [10]. Згідно цього, теоретична пропускна здатність каналу зв'язку визначається як

$$C = V_i \left[1 + P_{\text{пом}} \log P_{\text{пом}} + 1 - P_{\text{пом}} \log 1 - P_{\text{пом}} \right], \quad (11)$$

де $P_{\text{пом}}$ – імовірність помилки при прийомі елементу сигналу; V_i – інформаційна швидкість.

Взаємозв'язок еквівалентної та теоретичної пропускної здатності при дослідженні мереж передачі дискретних повідомлень визначається як [6]

$$C_e = k_e k_{\text{пе}} C, \quad (12)$$

де k_e – коефіцієнт експлуатаційної ефективності, $k_e = m_i / M$, m_i – кількість інформаційних біт у повідомленні, M – загальна довжина повідомлення; $k_{\text{пе}}$ – коефіцієнт ефективності використання каналу при прийнятті мір по підвищенню завадозахищеності.

Таким чином, можна прийняти

$$C_e \approx C k_{\text{пе}} = V_i k_e k_{\text{пе}} \left[1 + P_{\text{пом}} \log P_{\text{пом}} + 1 - P_{\text{пом}} \log 1 - P_{\text{пом}} \right]. \quad (13)$$

Як відомо, ймовірність помилки при прийомі корисного сигналу залежить від відношення рівня сигналу до рівня заважаючих шумів. Згідно з [12], імовірність помилки прийому елементу дискретного сигналу для когерентного прийому становить

$$P_{\text{пом}} = \Phi \left\{ \sqrt{\frac{h^2}{2}} \right\}, \quad (14)$$

де Φ – функція Лапласа, $\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt$; h – відношення сигнал/(шум+завада) на вході демодулятора приймального пристрою.

Відношення сигнал/(шум+завада) визначається шляхом проведення енергетичного розрахунку радіолінії, що діє в умовах навмисних завад. Розрахунок потужностей корисного сигналу і завади здійснюється відповідно з виразами [13]

$$P_c = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}}(\theta) G_{\text{прм}}(\theta) \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{прм}} \lambda^2}{16\pi^2 D^2} |V|^2, \quad (15)$$

$$P_3 = \frac{P_{\text{прдз}} G_{\text{прдз}}(\theta_{\text{прм}}) G_{\text{прм}}(\theta_3) \eta_{\text{прз}} \eta_{\text{прм}} \lambda^2}{16\pi^2 D_3^2} |V|^2, \quad (16)$$

де $P_{\text{прд}}, P_{\text{прдз}}$ – відповідно потужності радіопередавача і передавача радіозавад, що підводиться до передавальної антени; λ – довжина хвилі; D, D_3 – відповідно відстань між радіопередавачем і радіоприймачем та передавачем радіозавад і радіоприймачем; $G_{\text{прд}}(\theta), G_{\text{прдз}}(\theta_{\text{прм}})$ – відповідно коефіцієнти підсилення антени радіопередавача і передавача радіозавад за напрямком на радіоприймач; $G_{\text{прм}}(\theta), G_{\text{прм}}(\theta_3)$ – коефіцієнти підсилення антени радіоприймача за напрямком на кореспондента та на передавач радіозавад; $\eta_{\text{прд}}, \eta_{\text{прм}}, \eta_{\text{прз}}$ – коефіцієнти загасання у фідерах антен радіопередавача, радіоприймача та передавача радіозавад; V – множник послаблення при роботі земними хвилями в УКХ діапазоні. Розрахунок множника послаблення V у виразах (15), (16) можна здійснити за однією з методик [13].

Складові виразів (15), (16) задаються відповідно технічними характеристикам РЗ та джерел завад. Розрахунок коефіцієнтів підсилення спрямованих антен здійснюється за вектором спрямованості на передавач радіозавад [13]

$$G_A^* = G_A F(\varphi), \quad (17)$$

де – $F(\varphi)$ функція, яка апроксимує діаграму спрямованості антени.

Стосовно до задач поширення радіохвиль характеристики спрямованості зручно апроксимувати квадратичними експонентами виду [13]

$$F(\varphi) = e^{-1,38 \left(\frac{\varphi}{\theta_{0,5}} \right)^2}, \quad (18)$$

де $\theta_{0,5}$ – ширина діаграми спрямованості антени по рівню половинної потужності; θ – кут між вектором спрямованості антени та спрямованістю на передавач радіозавад. Відповідно до (17) та (18) коефіцієнт підсилення приймальної антени у напрямку приходу завади $G_{\text{прм}}^*$ становитиме

$$G_{\text{прм}}^* = G_{\text{прм}} e^{-1,38 \left(\frac{\theta}{\theta_{0,5}} \right)^2}. \quad (19)$$

Визначення відношення сигнал/(завада+шум), на основі якого корелятором приймального пристрою приймається рішення про приймання того чи іншого елементу сигналу, у відповідності з [12], здійснюється згідно виразу

$$h^2 = \gamma_c \frac{P_c}{N_0 \Delta f_c + P_3} T_c \Delta f_c = \gamma_c \frac{P_c T_c}{N_0 + \frac{P_3}{\Delta f_c}}, \quad (20)$$

де γ_c – параметр модуляції; P_c – потужність сигналу; N_0 – спектральна щільність власних шумів радіоприймача; T_c – тривалість імпульсу сигналу; Δf_c – ширина спектру сигналу; P_3 – потужність завади.

Значення параметра модульованого сигналу γ_c вказані в табл. 1.

Таблиця 1

Значення параметра модульованого сигналу γ_c

Вид модуляції	γ_c
Амплітудна модуляція	$1/\sqrt{2}$
Частотна модуляція	1
Фазова модуляція	$\sqrt{2}$

При практичних розрахунках на ЕОМ за виразом (20) зручно використовувати фазову змінну ξ – імовірність прийняття рішення на здійснення радіопридушення (при постанові навмисної завади), яка характеризує наявність складової P_3 виразу (20), і визначається двома подіями, що складають повну групу подій: здійснюється придушення виявленої радіолінії та не здійснюється придушення. Введення ξ перетворить вираз (20) до вигляду

$$h^2 = \gamma_c \frac{P_c T_c}{N_0 + \xi \frac{P_3}{\Delta f_c}}. \quad (21)$$

Імовірність прийняття рішення визначається виразом

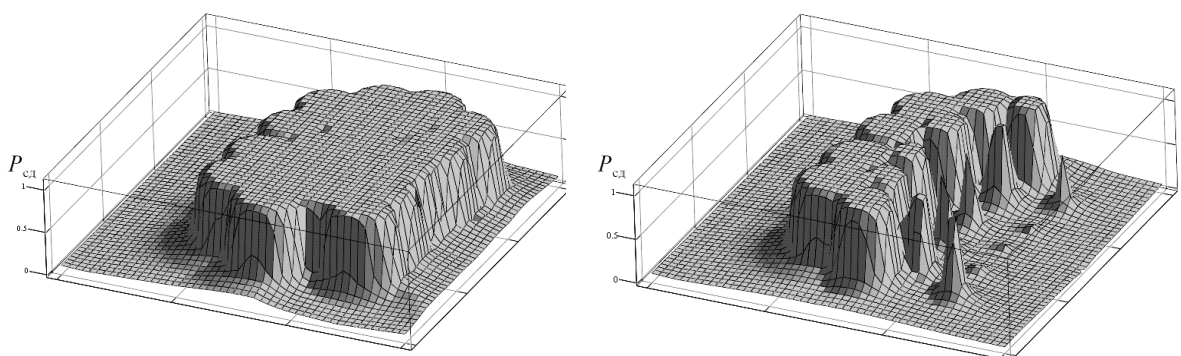
$$P_{\text{пр}} = \begin{cases} P_{\text{пр}}, & \text{якщо } P_{\text{вс}} \geq P_{\text{вс}}^0, \\ 0, & \text{якщо } P_{\text{вс}} < P_{\text{вс}}^0, \end{cases} \quad (22)$$

де $P_{\text{вс}}$ – імовірність виявлення РЗ; $P_{\text{вс}}^0$ – критерій прийняття рішення про виявлення РЗ. За оцінками фахівців, з практичною для розрахунків точністю можна вважати, що прийняття рішення про наявність РЗ здійснюється при імовірності виявлення його сигналу $P_{\text{в}} \geq 0,9$.

Таким чином, фазова змінна ξ становить

$$\xi = \begin{cases} 1, & \text{при } P_{\text{в}} \geq 0,9, \\ 0, & \text{при } P_{\text{в}} < 0,9. \end{cases} \quad (23)$$

На рис. 4 наведений приклад обчислення значення показника імовірності своєчасної передачі повідомлень для ТСЗ стандарту APCO-25 для варіантів відсутності радіопридушення та постановки навмисної завади.



а)

б)

Рис. 4. Поле значень імовірності своєчасної доставки повідомлень для радіопокриття ТСЗ в умовах відсутності радіопридушення (а) та при здійсненні радіопридушення (б)

Отриманні значення імовірності своєчасної доставки повідомлення у регулярних точках простору утворюють своєрідний рельєф (рис. 4), значення якого у будь-якій точці простору відповідають значення показника імовірності своєчасної доставки повідомлення для РС, що знаходяться у цій точці. Завадовий вплив на ПБС характеризується зменшенням показника $P_{сд}$ (рис. 4 б), що відображається як уражена частина радіопокриття.

Таким чином, отримана математична модель дозволяє визначати потенційну здатність функціонування радіоліній ПБС в умовах складної радіоелектронної обстановки за критерієм своєчасної доставки повідомлення. Модель враховує технічні характеристики РЗ ПБС та джерел радіозавод, їх просторове розташування, характеристики інформаційного навантаження. Реалізація розробленої моделі у програмних засобах дозволяє прогнозувати зони радіопокриття при розгортанні ТСЗ у зоні складної радіоелектронної обстановки і можливого заважаючого радіоелектронного впливу, що є основою для здійснення територіального планування ПБС і створення стійкого радіопокриття заданого району.

Використані джерела

1. Корнієнко І.В. Методика проектування раціональної топологічної структури транкінгової системи зв'язку в умовах РЕБ противника // Труды академії. – К.: НАОУ. – 2005. – №64. – С. 79 – 84.
2. Путилин А.Н. Радиосистемы с множественным доступом / Под ред. А.М.Чуднова – С–П.: ВАС, 1998.
3. Клейнорк Л. Коммутационные сети. – М.: Наука, 1970. – 432 с.
4. Антоненко В.О. Розробка алгоритму функціонування ААСР при управлінні швидкістю передачі повідомлень // Збірник наукових праць КВІУЗ. – К.: КВІУЗ, 2001. – С. 20 – 25.
5. Міночкін А.І., Романюк В.А. Аналітичне моделювання автоматизованих мереж радіозв'язку // Збірник наукових праць КВІУЗ. – К.: КВІУЗ, 2001. – С. 88 – 94.
6. Архипов М.Н., Захаров Г.П., Малиновский С.Т., Яновский Г.Г. Проектирование и эксплуатация сетей передачи дискретных сообщений. – М.: Радио и связь, – 1988. – 360 с.
7. Соколов А.В., Андрианов В.И. Альтернативы сотовой связи: транкинговые системы. – СПб.: БХВ – Петербург; Арлит, 2002 – 448 с.
8. Казачинский В.З., Левитский Г.Е. Математические методы решения военно-специальных задач. – ВА ВПВО, 1980. – 292 с.
9. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1997. – 239 с.
10. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи / Под ред. Д.Д.Кловского. – М.: Радио и связь, 1998. – 432 с.
11. Зюко А.Г. Элементы теории передачи информации – К.: Техніка, 1969. – 300 с.
12. Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений. Справочник. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
13. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиоліній. – М.: Связь, 1971. – 440 с.

Korniyenko I., Korniyenko S.

A MATHEMATICAL MODEL OF RADIO LINK FUNCTIONING OF TRANKING COMMUNICATION SYSTEM IN DIFFICULT OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

A mathematical model of subsystem functioning of base stations of tranking communication system in conflict conditions of radio interference is considered in this article.

Key words: *radio sets; radio interference; a mass service system; radio waves propagation; a mathematical model.*

Стаття надійшла до редакції 27.11.2010 р.