

УДК 621.396.93(045)

КАСКАДНА МОДЕЛЬ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ, ЩО ВРАХОВУЄ ЯВИЩЕ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ПРОМЕНІВ

О. Г. Голубничий, канд. техн. наук, М. В. Тронь

Національний авіаційний університет
tks@nau.edu.ua

Проведено дослідження, в результаті якого виявлені статистичні характеристики поширення сигналів по каналу зв'язку, які дають можливість оцінити ймовірність потрапляння променя в антену залежно від кількості перевідбивань від відбиваючих поверхонь у лінії радіозв'язку.

Ключові слова: багатопроменеве поширення, завмирання, канал зв'язку, антенна, моделювання.

Research which gives an opportunity to educe statistical descriptions of distribution of signals on a communication channel and gives an opportunity to estimate probability of hit of ray in aerial depending on the amount of re-reflection from the walls of communication channel is conducted.

Keywords: multipath propagation, fading, communication channel, antenna, modeling.

Постановка проблеми

Для вирішення проблеми оптимального синтезу систем радіозв'язку необхідно розв'язати науково-практичну задачу визначення багатовимірних статистичних характеристик просторово-часового сигналу. Ефективність систем обробки інформації також суттєво залежить від властивостей каналу зв'язку (КЗ), тому аналіз моделей і статистик КЗ є досить актуальною задачею в галузі телекомунікаційних систем.

Аналіз досліджень та публікацій

Дослідження просторово-часових статистичних характеристик радіосигналів у каналах зв'язку сучасних радіосистем передавання даних для різних механізмів та моделей поширення радіохвиль опубліковані в працях [1; 2; 4], а у праці [3], зокрема, досліджено енергетику каналу зв'язку при використанні моделі втрат Хата. Однак, з науково-практичного погляду, становлять інтерес оптимальні просторово-часові статистичні характеристики радіосигналів у каналах зв'язку з великою кількістю перевідбиттів та умови, за яких вони спостерігаються, які максимізують енергетику таких каналів зв'язку.

Постановка завдання

Мета статті — дослідження статистичних характеристик потрапляння променів (умовно сильних та слабких) в антену у каналі зв'язку з великою кількістю перевідбиттів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Основною особливістю реальних каналів зв'язку є «розмноження» променів. Тому для аналізу статистики КЗ доцільно залучити математичну теорію гіллястих процесів. Однак значно ефективнішими є математичні методи, які розглядають випадкове покриття деякого заданого просторового інтервалу (об'єму).

Ці методи пов'язані з визначенням просторових геометричних імовірностей, які істотно залежать від взаємного розташування і координат абонента зв'язку (АЗ) і навколишнього середовища.

На рис. 1 зображено як приклад модель КЗ у вигляді розгалуженого процесу (РП).

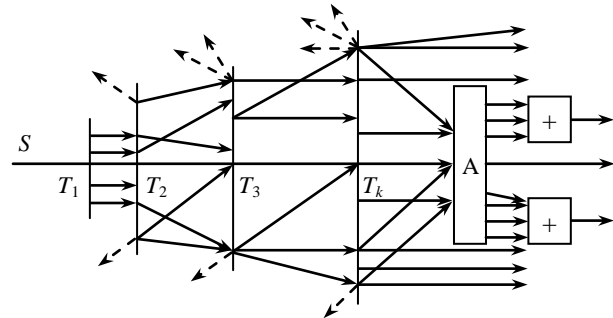


Рис. 1 Модель КЗ як розгалуженого процесу

Через S позначено сигнал, що входить до КЗ, T_k — затримки, умовно зображені у вигляді ліній, перпендикулярних до лінії візування SA -проекцій прямокутників, видимих з ребра, висота яких пропорційна T_k , а ширина (не показано) враховує кінцеву роздільну здатність апаратури оцінки T_k . Через A позначено приймальну антену, що є перетворювачем полів в електричні сигнали. Якщо антенна є безперервною (суцільне полотно, щільна тощо), то промені підсумовуються, що показано стрілкою. Якщо ж антенна є дискретною (ФАР, АФАР), то діаграма спрямованості є багатопелюстковою і підсумовуються виділені в просторі групи променів, що умовно зображено у вигляді квадратів зі знаком «+».

Наведена модель РП чітко показує, що незважаючи на розгалуження і численні перевідбиття, як сильні, так і слабкі промені є сильно корельованими (при компенсації просторових затримок і фаз), оскільки породжені одним і тим же вихідним сигналом, і факт позитивної або негативної

кореляції променів може мати суттєві наслідки в системі обробки, які визначають рівень сигналу, завмирань, на вході приймальної апаратури.

Під кластером при кластеризації променів мається на увазі довільна група з K сильних і Q слабких променів, які залежать не тільки від властивостей приймальної антени, але й від параметрів КЗ та призначення системи в цілому. Наприклад, кластер системи персонального радіозв'язку характеризується більшою «рівномірністю» числа і потужності сильних і слабких променів, тоді як кластер поза приміщенням у міських умовах відрізняється більш чітким розподілом сильних і слабких променів. На основі статистичних характеристик формалізуємо каскадну модель каналу зв'язку з кластеризацією променів.

Нехай генеральна сукупність всіх променів складається з N кластерів, у кожному з яких по K_n сильних і Q_n слабких променів. Загальна кількість променів L (сильних і слабких Q) у генеральній сукупності становить відповідно:

$$L = \sum_{n=1}^N L_n; \quad K = \sum_{n=1}^N K_n; \quad (1)$$

$$Q = L - K = \sum_{n=1}^N (L_n - K_n); \quad L_n \geq K_n; \quad L_n \geq Q_n.$$

Ймовірність того, що в n -му кластері міститься K_n сильних і $L_n - K_n$ слабких променів,

$$P_{K_n} = \frac{C_K^{K_n} C_{L-K}^{L_n-K_n}}{C_L^{L_n}}; \quad \sum_{n=1}^N P_{K_n} = 1 \quad (2)$$

і утворює повну групу подій (кожен кластер відповідає затримці T_n).

Ймовірності (2) є апіорними, але по суті сумісними з урахуванням невідомого на першому етапі аналізу статистичного зв'язку між усіма променями з наявністю найпростіших лінійних функціональних зв'язків (1) типу $Q_n = L_n - K_n$ у кожному n -му кластері ($Q = L - K$ для всієї генеральної сукупності).

У формулі (2) враховуються всі промені, у тому числі й загасаючі, наприклад в іоносфері, зображені пунктирними стрілками на рис. 1. Відкидання цих променів позбавляє відповідну групу подій повноти, оскільки генеральна сукупність буде складатися з $L' < L$ променів. Однак часто ця обставина не відіграє вирішальну роль і, крім того, формально легко забезпечити повноту, замінюючи всі символічні позначення (2) на такі ж зі штрихами.

Фактично кластери є моделлю профілів КЗ і змінюються в часі і просторі під час руху АЗ у силу чинності зміни навколишньої місцевості,

середовища поширення, ракурсів переміщення тощо.

Проте навіть при швидкості руху 108 км/год і кадри зв'язку в 3 мс зсув АЗ становить менше 0,1 м, і його часто можна не враховувати. Тому протягом декількох кадрів зв'язку ймовірності (2) залишаються постійними, що дозволяє знайти ймовірність P потрапляння променів в антену А.

Розглянемо подію А, яка полягає в тому, що з n -го профілю в антену потрапляє k_n сильних і $q_n = l_n - k_n$ слабких променів. Подія А реалізується тоді і тільки тоді, коли здійснюється сукупність складних подій AC_n , $n = \overline{1, N}$, де C_n відбуваються з ймовірністю (2). Тоді за формулою повної ймовірності отримуємо:

$$P(A) = \sum_{n=1}^N P(A|C_n)P(C_n); \quad (3)$$

$$P(A|C_n) = \frac{C_{K_n}^{k_n} C_{L_n-K_n}^{l_n-k_n}}{C_{L_n}^{l_n}}, \quad k_n \leq K_n, \quad l_n \leq L_n,$$

причому умовні ймовірності $P(A|C_n)$ визначаються за тією ж комбінаторною схемою, що і апіорні ймовірності $P(C_n)$ у формулі (2).

Отримана ймовірність $P(A)$ може бути оцінена експериментально таким чином: при відстані R по лінії візування між АЗ і БС загальне випромінювання передавача через концентричну сферу радіуса R не залежить від R тоді, коли густина потоку енергії обернено пропорційна R^2 , а напруженість поля пропорційна R (у протилежному випадку порушується закон збереження енергії). Ефективна площа приймальної антени пропорційна $\alpha \lambda^2$, де λ — довжина хвилі, а коефіцієнт α змінюється в широких межах від 10^{-2} для простих антен до 10^2 і більш складних антенних систем. Тому з точністю до коефіцієнта α ймовірність (3) пропорційна $\alpha (\lambda/R)^2$ при вимірюванні потужностей (або «амплітуд» $\sqrt{\alpha} (\lambda/R)$ при оцінюванні напруженості поля), причому порівняння останніх величин дає змогу визначити невідомі коефіцієнти пропорційності.

Відповідно до ступеня розгортки профілів затримок і послідовного надходження променів в антену ймовірність (3) зростає, оскільки визначається спочатку тільки першою складовою (3), при надходженні променів з другого профілю — сумою першого і другого доданків у (3) тощо до встановленого стану при врахуванні променів з останнього профілю. При підстановці в ліву частину (3) експериментальних оцінок $P(A)$ з'являється можливість покрокового вимірювання кількості променів.

При виведенні формул (2) і (3) неявно передбачалося, що при відбитті променів від перешкод імовірнісна міра зберігається, але тільки для дзеркальних відбиттів. Для явного обліку відбиттів доводиться ускладнювати ймовірнісну модель КЗ, причому зробити це можна по-різному. Одним з варіантів є спосіб «випадкових блукань» променів за рахунок перевідбиттів. Проаналізуємо його докладніше в межах формалізації моделі, яка пропонується. Нехай кількість блукаючих променів дорівнює n , яка змінюється дискретно по осі абсцис як натуральний ряд чисел (нуль означає відсутність відбиттів, тобто прямий промінь по лінії візування). Введемо в розгляд індикаторну змінну $\varepsilon_i = \pm 1$ і по осі ординат будемо

відкладати суму $Y_k = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i$. Поєднуючи сусідні

Y_k лінією, отримаємо в підсумку шлях блукання променя (рис. 2) у вигляді ламаної лінії, k -та вершина якого дорівнює Y_k , а k -й відрізок дорівнює $Y_k - Y_{k-1} = \varepsilon_k$ з нахилом ± 1 .

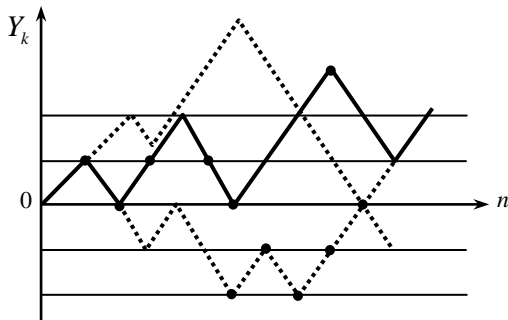


Рис. 2. Модель випадкового блукання променя

Ордината дорівнює нулю мінімум у $n = 2$ кроках з різними нахилами, тому $Y_k = 0$ тільки при парному числі кроків $K = 2n$. Подію $Y_{2n} = 0$ будемо інтерпретувати як потрапляння променя в антену. Число шляхів від джерела в точку $Y = 2n$ таке, що $2k$ відрізків вище, а $2n - 2k$ нижче осі X , дорівнює $L = \frac{C_{2n}^n}{n+1}$ незалежно від $k = 0, 1, \dots, n$.

Імовірність першого потрапляння променя в антену:

$$P_1(2n) = P(Y_{2n} = 0 | Y_1 \neq 0, Y_2 \neq 0, \dots, Y_{2n-1} \neq 0) = \frac{C_{2n}^n}{2^{2n}};$$

$$\sum_{k=0}^n P_1(2n) P_1(2n - 2k) = 1, \quad (4)$$

а ймовірність k -го потрапляння в $2n$ має вигляд:

$$P_k(2n) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{2k}{(2n-2k)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{2k^2}{2n-2k}\right). \quad (5)$$

Залежності ймовірності потрапляння променя в антену від коефіцієнта k (кількості умовно «сильних» променів у КЗ) показано на рис. 3.

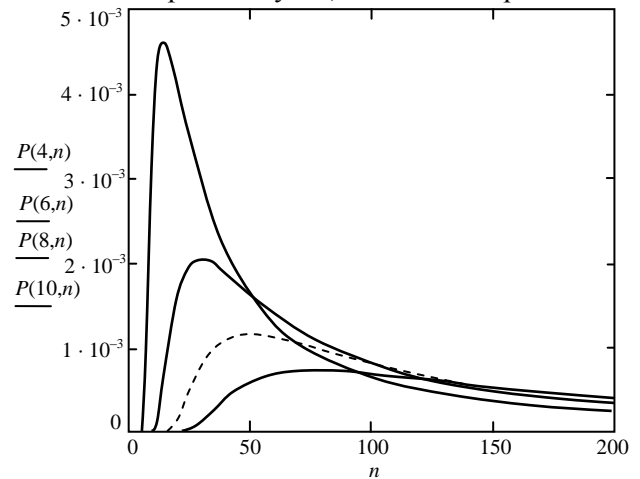


Рис. 3 Залежності ймовірності потрапляння променя від k

За графіком на рис. 3 можна зробити висновок про те, що ймовірність потрапляння променя в антену зменшується при збільшенні k після досягнення ними деякого екстремального значення. З метою знаходження найбільш імовірного значення n при заданому значенні k розв'яжемо класичну задачу оптимізації:

$$\frac{\partial P(k,n)}{\partial n} = 0;$$

$$\frac{\partial P(k,n)}{\partial n} = \frac{8\sqrt{2}k^3 e^{\frac{2k^2}{2k-2n}}}{\pi^2 (2n-2k)^{\frac{7}{2}}} - \frac{8\sqrt{2}k e^{\frac{2k^2}{2k-2n}}}{\pi^2 (2n-2k)^{\frac{5}{2}}}; \quad (6)$$

$$\frac{8\sqrt{2}k^3 e^{\frac{2k^2}{2k-2n}}}{\pi^2 (2n-2k)^{\frac{7}{2}}} - \frac{8\sqrt{2}k e^{\frac{2k^2}{2k-2n}}}{\pi^2 (2n-2k)^{\frac{5}{2}}} = 0. \quad (7)$$

Розв'язавши рівняння (7) відносно n , отримаємо:

$$n_{\text{opt}}(k) = \frac{\sqrt{2}(2\sqrt{2}k^2 + 3\sqrt{2}k)}{6}. \quad (8)$$

Залежність $n_{\text{opt}}(k)$ при якій досягається максимум імовірності $P_k(2n)$ показана на рис. 4.

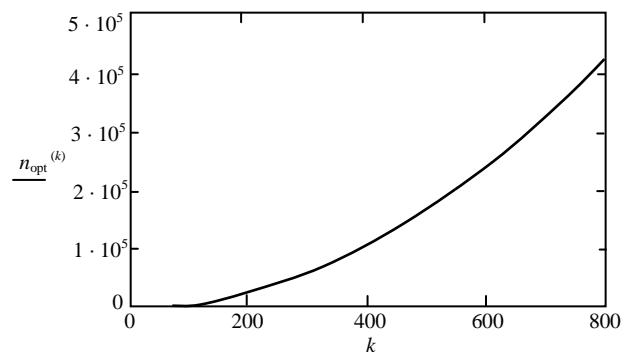


Рис. 4. Залежність $n_{\text{opt}}(k)$

Аналіз залежності (8) та графіка на рис. 4 показує, що $n_{\text{від}}$ зростає при збільшенні поточного значення k .

Визначимо максимальне значення ймовірності потрапляння променя в антену від k . Для цього підставимо формулу (8) в формулу (5), в результаті чого отримаємо:

$$P_k(2n) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{2k}{\left(2 \frac{\sqrt{2}(2\sqrt{2}k^2 + 3\sqrt{2}k)}{6} - 2k\right)^{\frac{3}{2}}} \times \exp\left(-\frac{2k^2}{2 \frac{\sqrt{2}(2\sqrt{2}k^2 + 3\sqrt{2}k)}{6} - 2k}\right). \quad (9)$$

Залежності максимального значення ймовірності потрапляння променя в антену від k показано на рис. 5.

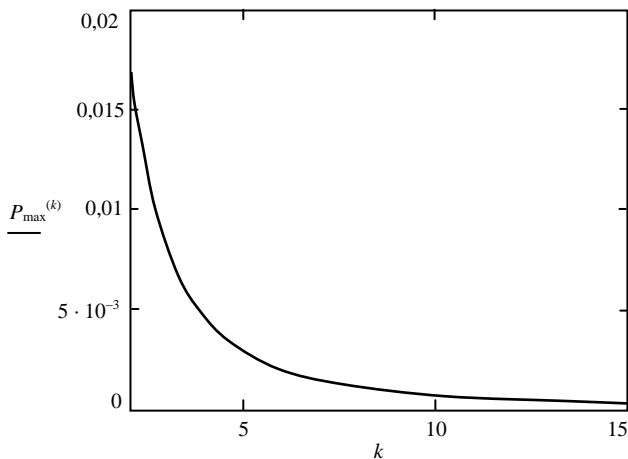


Рис. 5. Залежності максимальної ймовірності потрапляння променя в антену від k

Аналіз цієї залежності зокрема пояснює той факт, що при збільшенні кількості променів у каналі зв'язку та кількості перевідбиттів у ньому, що призводить до інтенсивного багатопроменевого поширення радіохвиль та виникнення внаслідок цього інтерференційних завмирань, погіршується енергетика такого каналу зв'язку.

Така узгодженість між формалізованою у статті моделлю та відомими підтвердженими на практиці явищами свідчить про адекватність та достовірність проаналізованого у статті підходу до розгляду механізму поширення радіосигналів у каналі зв'язку на основі кластеризації променів, умовного поділу їх на «сильні» та «слабкі» та статистичного підходу до їх поширення при існуванні відбиттів. Також з графіка на рис. 5 видно, що ймовірність потрапляння променя в антену найбільша при мінімальному значенні k , тобто найбільша ймовірність потрапляння в антену перших «сильних» променів ($k = 0; 1$).

Висновки

Досліджена модель каналу зв'язку на основі явища кластеризації променів, яка ґрунтується на стохастичному характері потрапляння променів до приймальної антени при великій кількості відбиттів у каналі зв'язку, а також залежності статистичних характеристик потрапляння променів (умовно сильних та слабких) в антену у каналі зв'язку з великою кількістю перевідбиттів. Визначені ймовірнісні характеристики (див. рис. 3) характеризуються наявністю одного максимуму, тобто ймовірність потрапляння променя в антену найбільша для перших сильних променів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Голяницький І. А. Математические модели и методы в радиосвязи / И. А. Голяницький; под ред. Ю. А. Громакова. — М. : Эко-трендз, 2005. — 440 с.
2. Голяницький І. А. Анализ и оптимизация нелинейных информационных систем / И. А. Голяницький. — М. : МАИ, 1996. — 178 с.
3. Конахович Г. Ф. Методика модернізації моделі Хата та моделі COST 231 / Г. Ф. Конахович, В. М. Бабенко, А. В. Карпов, В. І. Корчук // Защита информации: сб. науч. трудов НАУ. — 2010. — Вып. 17. — С. 100–104.
4. Голяницький І. А. Оптимальная пространственно-временная обработка негауссовых полей и процессов / И. А. Голяницький. — М. : МАИ, 1994. — 208 с.