

Запропонований первинний перетворювач вологості являє собою по суті двохзатворний МДН-транзистор, у якого реактивна складова повного опору (і, як наслідок, частотні характеристики) залежать від рівня вологості оточуючого середовища. Так, волога, адсорбована шаром підзатворного діелектрика з пористого окису кремнію, змінює коефіцієнт діелектричної проникності всього шару підзатворного діелектрика, а, отже, його ємність.

Перевагою такої конструкції сенсора вологості є висока точність (чутливий елемент сенсора вологості і активний елемент самої виміральної схеми знаходяться в рамках одного пристрою, чим зменшується вплив на вимірювання розподілених паразитних параметрів схеми), а також висока фізична і хімічна стійкість, зумовлена використанням в якості конструктивного матеріалу кремнію і його окису, що дозволяє використовувати даний сенсор і в атмосфері агресивних технологічних газів (наприклад, хлорвмісних).

Висновки

Розглянута класифікацію методів вимірювання вологості газів атмосферного пониженого тиску, а також розглянуті конструкції сенсорів вологості, які реалізують дані методи вимірювання вологості. Запропоновано конструкцію первинного перетворювача вологості на основі двохзатворної МДН-структури, в якій вологочутливим матеріалом є підзатворний шар пористого окису кремнію.

Література

1. Сазонов А.А. Автоматизация технологического оборудования микроэлектроники. / Сазонов А.А. Корнилов Р.В., Кохан Н.П., Лукичев А.Ю., Осокин В.И., Таран В.А., Федукін В.А. / – М.: Высш. шк., 1991. – С. 331.
2. Виглеб Г. Датчики: Пер. с нем. / Виглеб Г. – М.: Мир, 1989. – С. 196.
3. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности. / Мухитдинов М. Н., Мусаев Э.С. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 96.
4. Патент України № 40956, кл. G01N 21/53. Конденсаційний гігрометр / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, А.Ю. Савицький, – 27.04.09. – бюл. № 8.
5. Пинхусович Р. Л. Методы и приборы для измерения относительной влажности. / Пинхусович Р. Л., Коломыйцев В. П. / – М.: Энергоатомиздат, 1977. – С. 413.
6. А.с. 1288557 СССР, МКИ G 01 N 19/12 Датчик влажности / М.Д. Мгалоблишвили, Т.И. Берелашвили, К.С. Сибашвили, Г.А. Варганов. – 07.02.87. Бюл. № 41.
7. Патент № 59-23598 Японії, кл. G01N27/02, Напівпровідниковий сенсор вологості / Такаси Нуэ, опубл. 13.03.92.
8. Тугов Е.А. Гетерофазные процессы при взаимодействии пористого кремния с водой / Тугов Е.А // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т.9. – Вып. 1. – С. 131-136.
9. Патент України № 40955, кл. G01N 21/53. Гігрометричний сенсор на польовому транзисторі / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, А.Ю. Савицький, – 27.04.09. – бюл. № 8.

Надійшла 23.4.2011 р.

УДК 621.396

А.А. ТАРАНЧУК, А. В. ДОБРОВОЛЬСКИЙ
Хмельницький національний університет

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЗАТУХАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ПРИ ЇХ ПОШИРЕННІ НА ТРАСАХ РУХОМОГО ЗВ'ЯЗКУ

В роботі зроблений огляд існуючих методів обчислення медіанного значення енергетичних втрат, що виникають при розповсюдженні радіохвиль на трасах рухомого зв'язку та надані рекомендації по їх ефективному використанню при розрахунках та розгортанні радіомереж.

The review of existing methods of calculation median value of the power losses arising at diffusion of radio waves on line of mobile communication is made, references on their effective utilization are made at calculations and expansion of radio networks.

Ключові слова: радіозв'язок, затухання, електромагнітні хвилі; інтерференція, дифракція

Вступ

У зв'язку з активним впровадженням нових перспективних радіосистем рухомого зв'язку проблема адекватного моделювання поширення радіохвиль у середовищі є досить актуальним завданням. На теперішній час розгорнуто і продовжує впроваджуватися велика кількість різноманітних засобів рухомого зв'язку: D-AMPS, GSM, IS-95 (CDMA), SmartTrunk, TETRA, EDACS, 3G/UMTS і т.п. Інформація про затухання електромагнітних хвиль при їх поширенні на трасах рухомого зв'язку необхідна для забезпечення якісного функціонування радіоелектронних засобів, для рішення питань електромагнітної сумісності, оцінки

електромагнітної обстановки, що вимагається для правильного розташування засобів радіозв'язку та визначення їхнього взаємного впливу.

Постановка задачі

Основною проблемою, яка виникає при визначенні значень затухань є швидка зміна трас поширення сигналу, яка пов'язана із змінами місця розташування абонента, відбивання сигналу від навколишніх будівель, процеси інтерференції і дифракції і т. п. Моделювання впливу перерахованих об'єктів на поширення радіохвиль та розрахунок зон покриття при розгортанні радіомереж можна здійснювати різними способами: детермінованими, статистичними і квазидетермінованими [1].

Детерміновані методи розрахунку зон покриття засновані на використанні фізичних моделей поширення радіохвиль. У них враховуються ослаблення у вільному просторі, відбиття від місцевих об'єктів, дифракція на перешкодах, поглинання, переломлення електромагнітних хвиль. Розрахунок заснований на багатопроблемній моделі поширення радіохвиль. У основі статистичних методів лежать узагальнені статистичні формули загасання радіосигналу у різних типах забудови (міська, приміська, сільська). Квазидетерміновані методи відрізняються наступними особливостями: застосовується багатопроблемна модель поширення радіохвиль, переломлення замінюється ослабленням; використовуються середньостатистичні коефіцієнти відбиття для кожного діапазону частот; поглинання розраховується з урахуванням довжини проміння в будівлі/лісі/парку; використовується адаптивний алгоритм розрахунку, що враховує різні напрямки приходу прямої і відбитої хвилі; існує можливість обліку діаграм спрямованості кожної антени. При частотно-територіальному плануванні та розгортанні радіомереж рухомого зв'язку постають питання вибору того або іншого методу розрахунку значень енергетичних втрат сигналу, які слід враховувати для оптимального проектування радіомереж, тому ці питання потребують подальшого вивчення.

Метою даної роботи є огляд існуючих методів обчислення медіанного значення енергетичних втрат, що виникають при розповсюдженні радіохвиль на трасах рухомого зв'язку та надання рекомендацій по їх ефективному використанню при розрахунках та розгортанні радіомереж.

Рішення проблеми

Залежно від типу системи рухомого зв'язку (СРЗ) і місцевості, на якій планується розгорнути рухому радіосистему, розрізняють наступні методи обчислення медіанного значення енергетичних втрат, що виникають при розповсюдженні радіохвиль: Лі (W.C.Y. Lee) [2]; Окамури (Okumura) [3]; Хата (Hata) [4]; Девідсона (Davidson) [5]; COST231-Уолфіша – Ікегами (Walfish – Ikegami) [6, 7]; Кся-Бертоні [8]; Буллінгтона (Bullington) [9]; Епштейна – Петерсона (Epstein – Peterson) [10]; Піквінарда (Picquenard) [11]; Дейгоута (Deygout) [12]; Джованелі (Giovaneli) [13]; Воглера (Vogler) [14]; Ібрагіма (Ibrahim) – Парсона (Parsons) [15]; TIREM [5]; RMD [5]. Розглянемо дані методи обчислення їх переваги та недоліки.

Однією із простих моделей поширення сигналу запропонував Лі, яка заснована на серії проведених вимірювань на носійній частоті $f_c = 900$ МГц. Відповідно до моделі Лі, середнє значення потужності, яка вимірюється на відстані d від передавальної станції, описується логарифмічним виразом [2]:

$$(P(d))_{dB} = (P_0)_{dB} - \gamma \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) - n \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + (F_0)_{dB} \quad (1)$$

де P_0 – еталонна медіанна потужність, виміряна на відстані $d_0 = 1$ км; $F_0 = \prod_{i=1}^5 F_i$ – поправочний

коефіцієнт, що обчислюється на основі серії компонентних множників; f – частота сигналу; γ – враховує степінь кривизни поверхні; n – показує степінь частотної залежності. Значення P_0 та γ – отримані експериментально на основі проведених замірів у різноманітних типах зовнішнього середовища. Параметри даної моделі можуть бути просто скореговані за допомогою додаткових натурних вимірювань до конкретних умов поширення. Після проведення цієї процедури передбачення рівня сигналу становиться доволі точним. Більш того, алгоритм передбачення простий для використання і легко обчислюється. Багато систем мобільного зв'язку спроектовані з використанням цієї моделі (AMPS, DAMS, GSM, IS-95) [2].

Найбільш простими і в той же час достатньо точними математичними методами розрахунку втрат є моделі запропоновані вченими Окамурою та Хата. Формули математичної моделі Окамура – Хата отримані емпірично. Вони враховують декілька явищ, що викликають зміну сигналу в точці прийому: екранування й дифракцію сигналу, обумовлені рельєфом місцевості й будинками, розташованими на лінії, що з'єднує прийомну та передавальну антени; повільні завмирання, що з'являються у результаті відбиття радіосигналу від перешкод; явище багатопроблемності, викликане неоднорідностями (будинками, пагорбами й т.п.), що перебувають в околиці точки прийому сигналу, результатом якого є швидкі завмирання.

Розрахунок значень затухань визначається для різних типів територій: великого міста, середнього та малого міста, передмістя, відкритої території і села. Втрати, дБ, на трасі поширення радіохвиль у відповідності до метода Окамури визначаються наступними співвідношеннями [3]:

$$L = A_{mu}(f_0, R) - H_b(h_b, R) - H_m(h_m, f_0) - K - K_{s0} - K_n - K_{ls}, \quad (2)$$

де $A_{mu}(f_0, R)$ – фактор зміни медіанного значення втрат у місті відносно втрат у вільному просторі для ефективної висоти антени базової станції (БС); $h_b = 200$ м і висоти антени МС $h_m = 3$ м;

$H_b(h_b, R)$ – фактор "висота – підсилення" для БС з $h_b = 200$ м; $H_m(h_m, f_0)$ – фактор "висота – підсилення" для мобільних станцій (МС) з $h_m = 3$ м; K – поправочний коефіцієнт для місцевості з пагорбами; K_{s0} – поправочний коефіцієнт для приміської зони та відкритого простору; K_n – поправочний коефіцієнт для "земної поверхні з нахилом"; K_{ls} – поправочний коефіцієнт для ділянки "земля – вода", що дозволяє скорегувати, значення втрат, якщо на шляху поширення сигналу трапляється вода.

Усі поправочні коефіцієнти у моделі Окамури є табличними функціями або представляються у вигляді графіків, що сильно ускладнює використання формули (2). Оскільки всі коефіцієнти в рівнянні (2) є усередненими величинами, отриманими експериментальним шляхом, то обов'язковим має бути їх порівняння з результатами натурних вимірів на тій місцевості, де буде розгортатися СРЗ. Основний недолік моделі Окамури – повільна реакція на зміну типу місцевості. Ця модель найкраще підходить для міських і приміських районів і не дуже ефективна для сільської місцевості. Різниця вимірних експериментально та розрахункових напруженостей поля зазвичай не перевищують 10-13 дБ [3].

Модель Хата (англ. Hata) виникла у результаті адаптації емпіричних формул до графіків, отриманими Окамурою і його співавторами. Ці формули добре апроксимують графіки в певних діапазонах носійних частот на квазігладкій земній поверхні. Втрати, дБ, при поширенні сигналу на трасі для міського району у відповідності з рівнянням Хата визначаються виразом [4]:

$$L = 37,11 + 6,16 \lg(f_0) - 13,82 \lg(h_{BC}) - a(h_{MC}) + (24,9 - 6,55 \lg(h_{BC})) \lg(R), \quad (3)$$

де R – відстань між передавачем і приймачем, км; $a(h_{MC})$ – поправочний коефіцієнт.

Для приміських районів втрати (2) коригуються наступним чином: $L_{II} = L - 2 \left(\lg \frac{f_0}{28} \right) - 5,4$. Для квазівідкритої сільської місцевості ці втрати визначаються рівнянням:

$$L_{ке} = L - 4,78(\lg(f_0))^2 + 18,33 \lg(f_0) - 35,94. \quad (4)$$

Представлені вище моделі розповсюдження сигналу дозволяють оцінити залежність втрат від носійної частоти, висоти антен базової та рухомої станцій і типу місцевості. Вони непогано відображають процеси поширення сигналу на відстані від 1 до 30 км, і краще всього підходять для частот 150-1000 МГц та до 1,5 ГГц. Метод Хата використовується з урахуванням обмежень на висоту антени БС h_{BC} - 30-200 м та висоту антени МС h_{MC} - 1-10 м. Однак системи персонального зв'язку працюють в діапазоні від 1,8 до 2,0 ГГц. Приклади таких систем – це DCS 1800 і PCS 1900 – дві версії системи GSM, що функціонують у Європі та USA відповідно. У зв'язку з цим, для створення моделей розповсюдження сигналу в частотному діапазоні від 1,8 до 2,0 ГГц в умовах, характерних для систем PCS, були поставлені численні експерименти і проведено безліч вимірів. Через велике затухання сигналу у діапазоні 1,8 ГГц у порівнянні з діапазоном 900 МГц, традиційно вживаним у стільникової телефонії, основна відмінність між системою PCS і традиційною стільниковою системою полягає в зменшенні розміру стільників. Дослідження нових моделей розповсюдження проводилися в рамках проекту Європейського Союзу COST #231. У результаті в довідковій літературі представлені, принаймні, дві відомі моделі розповсюдження, розроблені в рамках проектів COST: модель COST231-Хата; модель COST231-Уолфіш-Ікегамі.

Для обчислення основних втрат на трасі розповсюдження використовують формулу COST231-Хата [3]:

$$(L_{50})_{dB} = 46,3 + 33,9 \lg f - 13,82 \lg(h_{BC,eff}) - a(h_{MC}) + [44,9 - 6,55 \lg(h_{BC,eff})] \lg d + C, \quad (5)$$

де C – постійна: для середніх міст та приміських районів з помірно рослинністю $C = 0$ і для центрів великих міст $C = 3$. Формально моделі Окамури, Хата і COST231-Хата можна використовувати тільки для висоти антени базової станції, що перевищує 30 м, проте їх застосування можливе і для більш низьких висот за умови, що сусідні будівлі значно нижче антени. Модель COST231-Хата не підходить для оцінки загасання сигналу при відстанях між рухомою і базовою станціями менш 1 км. У цьому випадку затухання сильно залежить від топографії місцевості, у якій поширюється сигнал. Цю модель також не можна використовувати для оцінки поширення сигналу по вулицях з високими будівлями.

Модель COST231-Уолфіш-Ікегамі може застосовуватися у випадках, коли антена базової станції розташована як вище, так і нижче лінії рівня дахів міської забудови. У сукупність емпіричних факторів, врахованих розрахунковою формулою входять висоти антен базової та рухомої станцій, ширина вулиць, відстані між будівлями, висота будівель і орієнтація вулиць щодо направлення розповсюдження сигналу. У загальних рисах формула, що описує втрати сигналу, складається з трьох членів: втрат L_s на поширення у вільному просторі; втрат L_{rts} на дифракцію і розсіювання хвиль на дахах будівель; L_{ms} втрат, викликаних багаторазовою дифракцією від рядів будівель. Сумарні втрати розраховуються за формулою [7]:

$$L = L_s + L_{rts} + L_{ms} \quad (6)$$

Дана модель широко використовується міжнародним телекомунікаційним союзом (ITU) як стандартна модель для універсальної системи рухомого зв'язку третього покоління ІМТ-2000. Її можна застосовувати в наступних діапазонах параметрів: $800 < f_c < 2000$ МГц; $4 < h_{BC} < 50$ м; $1 < h_{MC} < 3$ м; $0,02 \leq d \leq 5$ км. Недоліком методу, що доведено експериментально, є недостатня точність обчислень при великих і дуже малих кутах підвищення траси [7].

Девідсону вдалося розширити діапазон відстаней, для яких визначають втрати при поширенні, до 300 км, діапазон частот від 30 до 1500 МГц, діапазон висот антен БС від 30 до 1000 м [5].

Більш точний метод коригування обчислюваних втрат залежно від щільності забудови міста (або кварталу) запропонований Ібрагімом і Парсоном [15]. Напівемпіричним методом Ібрагіма – Парсона отриманий шляхом обробки даних експериментів, що проводилися у Лондоні. Умови експериментів описані в [15]. Вимірювання в Лондоні проводилися на частотах 168; 455 і 900 МГц, тому метод можна використовувати для розрахунку втрат при поширенні сигналу в СРЗ стандартів GSM-900 та NMT-450. Використання в експериментах МС з антеною, розташованою на висоті 2,5 м від поверхні землі, дещо обмежує застосування даного методу. Також використання методу Ібрагіма – Парсона можливе лише в обмеженому числі випадків. Оскільки метод Ібрагіма – Парсона, також як і інші методи, ґрунтуються на експериментальних дослідженнях, що носять локальний характер, обов'язковим є порівняння результатів, отриманих на основі цих методів з результатами натурних вимірювань втрат при поширенні сигналу.

Існуюча модель Кся-Бертоні дозволяє враховувати ряд додаткових параметрів, зв'язаних з етажністю будівель, шириною вулиць і т. п. [8]. Дана модель представляє собою дифракційну аналітичну модель, розроблену для розрахунку затухання на трасах СРЗ в міських та приміських зонах. На відмінність від статистичної моделі Окамури-Хати дозволяє вести розрахунки в більш широкому діапазоні частот (до 2200 МГц). Модель побудована на основі рівнянь хвильової оптики і розглядає різноманітні механізми розповсюдження радіохвиль в умовах міської забудови: поширення у вільному просторі; дифракцію на кромках дахів будівель; відображення від стін зданий і т.п. Величина середніх втрат за даною моделлю розраховується як [8]:

$$L = -10 \lg \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[\frac{\lambda}{2\pi R} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[2,35^2 \left(\frac{\Delta h_B}{R} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \right)^{1,8} \right], \quad (7)$$

де λ – довжина хвилі; R – відстань між БС та МС; $\Delta h_B = h_{BC} - h_0$ – різниця висот антени БС та середнього рівня дахів; $\theta = \tan^{-1}(\Delta h_M / x)$, Δh_M – різниця висот середнього рівня даху і антени МС; x – відстань по горизонталі між МС і кромкою даху, на якому дифрагує хвиля. Модель Кся – Бертоні дозволяє оцінити середній рівень втрат і в тих випадках, коли антена БС розташована на рівні дахів або нижче рівня дахів. Не дивлячись на це, дана модель не враховує ряд важливих параметрів (вид будівельних матеріалів, різноманітна орієнтація вулиць і т.п.), вона дає простий і зручний спосіб отримання попередніх оцінок рівня середніх втрат у каналі зв'язку.

Характерним для радіотрас СРЗ є те, що сигнал у точці прийому нормується за рахунок багаторазової дифракції на кромках будівель. Для розрахунку втрат при багаторазовій дифракції використовують методи: Буллінгтона [9], Енштейна-Петерсона [10], Піквінарда [11], Дейгоута (Deugout) [12]; TIREM [5], RMD [5], Джованелі [13], Волгера [14] та інших.

На рисунку 1 показані геометрична побудова моделі Буллінгтона. Ефективна висота еквівалентної перешкоди h дорівнює довжині перпендикуляра, опущеного з точки перетину дотичних до вершин перешкод, найближчих до антен БС і МС відповідно, на лінію візування. Множник ослаблення \hat{V}_0 для еквівалентної траси обчислюється для певного значення h за наступною формулою [9]:

$$\hat{V}_0 = 20 \lg \left[S \left(\frac{h}{\rho_0} \right) + 0,5 \right] - 20 \lg \left[\sqrt{2} \sin \left(\arctg \frac{S \left(\frac{h}{\rho_0} \right) + 0,5}{C \left(\frac{h}{\rho_0} \right) + 0,5} \right) \right], \quad (8)$$

де $S(x)$, $C(x)$ – інтеграли Френеля [3]; h – висота клиноподібної перешкоди щодо лінії візування, м; ρ_0 – радіус зовнішнього кордону першої напівзони Френеля, м.

Для методу Буллінгтона точність розрахунку \hat{V}_0 зростає в міру зменшення відстані між вершинами перешкод [9].

Для розрахунку втрат при багаторазовій дифракції сигналу на перешкодах рекомендується використовувати методи Енштейна – Петерсона і Піквінарда.

У методі Енштейна – Петерсона (рисунк 2) ослаблення обчислюється

окремо для кожної перешкоди, при цьому кожна наступна перешкода виступає в ролі "приймача", а попередня перешкода є "передавачем". Загальний множник ослаблення V , дБ, обчислюється як сума окремих множників ослаблення: V_1 і V_2 . Для методів Енштейна – Петерсона точність розрахунків зростає у міру збільшення відстані між перешкодами [10].

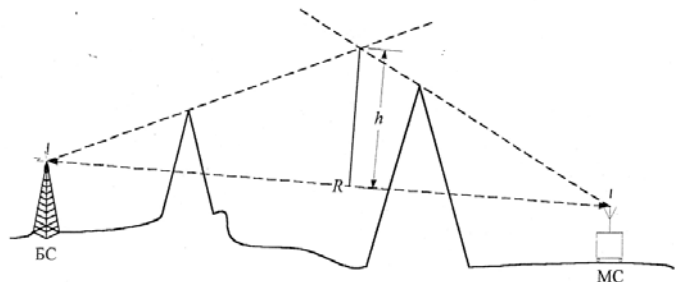


Рис. 1. Геометрична побудова моделі Буллінгтона

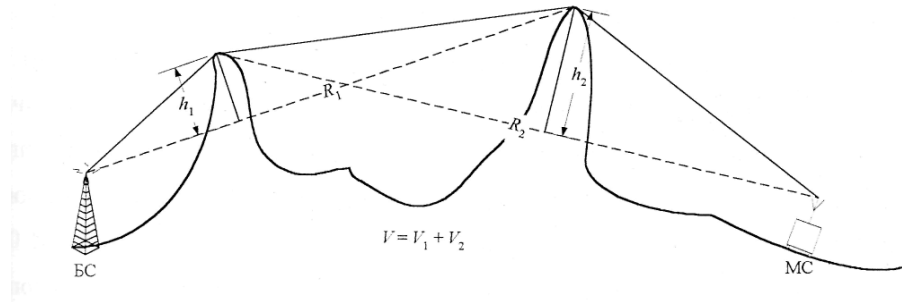


Рис. 2. Геометрична побудова моделі Епштейна – Петерсона

Відповідно до методу Піквінарда висота перешкоди h_1 обчислюється без урахування присутності другого перешкоди. Обмеження на точність цього методу не накладаються [11].

Однією з найбільш складних використовуваних в даний час є модель обчислення дифракційних втрат Terrain Integrated Rough Earth Model (TIREM) [5], розроблена Національним Комітетом передачі даних та інформації (NTIA) спільно з Міністерством оборони USA. Модель TIREM широко використовується урядовими і військовими організаціями, а також приватними компаніями.

Модель TIREM використовує один з двох підходів, для обчислення втрат на трасі поширення. У випадку прямої видимості антени MC, програма обчислює ступінь закриття зони Френеля, щоб пропорційно коригувати величину додаткових втрат на трасі, які обчислюються за однією з наступних двох моделей втрат у вільному просторі. Для частот перевищуючих 200 МГц використовується модель Longley – Reasoner [16]. Для частот нижче 150 МГц використовується модель Longley – Rice [16]. У діапазоні частот між 150 і 200 МГц втрати, розраховані за двома методами, пропорційно усереднюються. Якщо відкрито більше ніж 1,5 радіуса першої зони Френеля, то додаткове ослаблення не вноситься, а враховуються тільки основні втрати на трасі вільного простору. Якщо відкрито від 0,5 до 1,5 радіуса першої зони Френеля, то вносяться додаткові втрати на трасі як лінійна функція від радіуса зони Френеля. Коли траса класифікується як закрита, TIREM використовує метод розрахунку втрат при багаторазовій дифракції на клиноподібних перешкодах [5].

Метод Reflection plus Multiple Diffraction Loss (RMD) – це частина методу розрахунку дифракційних втрат на перешкодах, взятого з технічних приміток NBS № 101 [5]. У випадку прямої видимості, коли немає перешкод, які екранують прямий промінь від передавача до приймача, загасання визначається шляхом розгляду вкладу одиночного відбитого променя від землі і векторного додавання його з прямим променем. Для трас, де рельєфні перешкоди досить високі, щоб частково закривати 0,6 від радіуса першої зони Френеля, RMD-метод включає додаткові втрати в діапазоні від 0 до 6 дБ залежно від ступеня закриття першої зони Френеля. У заобрійній або закритій перешкодами місцевості, затухання на трасі обчислюється за допомогою методу Епштейна – Петерсона шляхом об'єднання дифракційних втрат над рельєфними перешкодами.

Модель TIREM і метод RMD є одним з найбільш складних в даний час програмних методів розрахунку втрат при поширенні сигналу в радіолінійних стільникових систем зв'язку. Дані методи засновані на ряді спрощених припущень, за якими їх точність необхідно визнати обмеженою.

Висновки

Результати аналізу методів розрахунку енергетичних втрат на трасах СРЗ свідчать про те, що для міських та приміських місцевостей з незначними нерівностями рельєфу краще використовувати статистичні емпіричні та напівемпіричні моделі. Статистичні методи враховують випадковий характер неоднорідностей середовища, які впливають на процес розповсюдження радіохвиль. Точність розрахунку при використанні даних методів залежить від ретельного підбора емпіричних коефіцієнтів, заснованого на аналізі карт місцевості. Ці методи дозволяють передбачити деякі середні характеристики сигналів, дозволяють прогнозувати зони впевненого прийому і зони радіотіней, однак не забезпечують можливості обліку індивідуальних особливостей радіотрас. До числа достоїнств даних моделей також можна віднести порівняно невеликий час розрахунку. Хоча побудова теоретичної статистичної моделі поширення радіохвиль у місцевості є досить складним завданням, її рішення цілком реально і представляє велику цінність для прогнозування стійкого бездротового зв'язку між рухомими об'єктами.

Детерміновані методи мають більш високу ефективність й у принципі дозволяють із високою точністю враховувати конкретні особливості міської забудови, рельєфу місцевості й т.п. Однак через складність їх можна використовувати в основному для розрахунку радіотрас в обмежених областях простору, наприклад, усередині пікостільника. Використання цих методів при розрахунках покриття в умовах міської забудови зі складною архітектурою займе величезну кількість часу, порівнянне з часом розгортання мережі. Це викликано не тільки обчислювальними витратами на розрахунок багатопроменевого поширення радіохвиль, але й необхідністю точного моделювання міського середовища з урахуванням архітектурних особливостей, матеріалів будівель, що практично неможливо в масштабах великого населеного пункту.

Використання квазідетермінованих методів дають більшу точність у порівнянні зі статистичними методами при розрахунках енергетичних втрат сигналу, однак їх обчислювальні витрати набагато менше, ніж при детермінованому способі.

Література

1. Комашинский В. И. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации. Основы моделирования / В.И. Комашинский, А. В. Максимов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 176 с.: ил.
2. Подойницын Р.Н. Модели радиоканалов мобильной связи / Р.Н. Подойницын // Мобильные системы, 2002. – № 12. – С. 34 – 41.
3. Веселовский Кшиштоф. Системы подвижной радиосвязи / Пер. с польск. И.Д. Рудинского / Под ред. А.И. Ледовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с.: илл.
4. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services / M. Hata // IEEE Trans. Vehicular Technology, 1980. – Vol. 29, No 3 – P. 317-325.
5. Модели распространения радиоволн. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://telecomproject.tripod.com/mod.htm/>. – Назва з екрану.
6. Банкет В. Л. Аналіз ефективності систем цифрового рухомого радіозв'язку / В. Л. Банкет, В. А. Иванов // Зв'язок, 1999. – № 6. – С. 21 – 25.
7. Ikegami F. et all. Theoretical prediction of mean field strength on urban mobile radio / F. Ikegami [et all.] // IEEE Trans. on Antenn. and Propag, 1991. – Vol. 39, No 3.
8. Бабков В. Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование / В. Ю. Бабков, М. А. Вознюк, П. А. Михайлов. – СПб.: СПб ГУТ, 2000. – 196 с.
9. Bullington K. Radio Propagation for Vehicular Communications // IEEE Trans. Veh. Technol, 1977. – Vol. VT-26, No 4.
10. Epstein J. An Experimental Study of Wave Propagation at 850 MC / J. Epstein, D.W. Peterson // Proc. of the I. R. E. – May, 1953 /– Vol. 41. – P. 596 – 611.
11. Picquenard A. Radio Wave Propagation / A. Picquenard. – Wiley, New York, 1974. – P. 296.
12. Deygout J. Correction Factor for Multiple Knife-Edge Diffraction / J. Deygout // IEEE Trans, on Antennas and Propagation. – Vol. AP-39, No 8, August 1991. – P. 1256-1258.
13. Giovaneli C. L. An analysis of simplified solutions for multiple knife- edge diffraction // IEEE Trans, on Antennas and Propagation. – Vol. AP-32, No 3, Marsh 1991. – P. 297 – 301.
14. Vogler L. E. An attenuation function for multiple knife-edge diffraction // Radio Science – Vol. 17, No 6, November – December 1982. – 1541-1546.
15. Ibrahim M. F. Signal strength prediction in built-up areas Part 1: Median signal strength // IEEE Proc. – August 1983. – Vol. 130, part F, No 5. – P. 377- 384.
16. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У. К. Джейкса. – М.: Связь, 1979. – 520 с.: илл.

Надійшла 3.4.2011 р.

УДК 621.3.0.1

В.Д. КОСЕНКОВ, Л.В. ПАСТЕРНАК, Л.В. СКУБІЙ
Хмельницький національний Університет

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРАЛІВ ДЮАМЕЛЯ ПРІ АНАЛІЗІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

За результатами аналізу перехідних процесів за допомогою інтегралу Дюамеля подано рекомендації щодо застосування тієї чи іншої форми інтегралу Дюамеля залежно від характеру зовнішніх дій.

The results of the analysis of transient processes using the integral of Duhamel filed recommendations applying one or another form of the integral Duhamel, depending on the nature of external action.

Ключові слова: інтеграл Дюамеля, межі інтеграла, імпульсна дія.

Вступ

Відомо, що у випадках, коли до лінійного електричного кола підводиться напруга, яка змінюється за складним законом в часі, а також має розриви першого роду, то аналіз перехідного процесу здійснюється як правило, за допомогою інтегралів Дюамеля.

Аналіз публікацій та постановка задачі

В різних джерелах наводиться різна кількість форм інтегралів Дюамеля. Так в роботі [1] наводиться 4 форми запису інтегралів Дюамеля в роботі [2]- 6 форм, в роботі [3] – 9 форм. На практиці, як це подано в усіх підручниках, використовують в прикладах дві форми запису, а саме [1]:

$$u_2 = u_1(0)h(t) + \int_0^t u_1(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (1)$$