

УДК 621.317

Б.Б. ПОСПЄЛОВ

Харківський коледж ДУІКТ

О.М. ШИНКАРУК

Хмельницький національний університет

Ю.О. БАБІЙ

Хмельницький національний університет

## АДАПТАЦІЯ БАГАТОАНТЕННИХ СИСТЕМ ДО НЕВИЗНАЧЕНИХ УМОВ ЗВ'ЯЗКУ В MESH-МЕРЕЖАХ

*В статті представлено метод адаптації фізичного рівня до невизначених та змінних умов зв'язку в mesh-мережах на основі узгодженого управління випромінюючими та приймаючими багатоантенними системами невідомої структури.*

*In the article presents a method of adapting the physical layer to the uncertain and changing conditions of communication in Mesh-Based Network Management agreed radiating and receiving multi-antenna system unknown structure.*

Ключові слова: багатоантенні системи, mesh-мережі, канал зв'язку, маршрутизація, просторово-часова обробка.

Mesh-мережі представляють новий і перспективний клас бездротових мереж передачі мультимедійної інформації, який в найближчі роки знайде широке комерційне та спеціальне використання [1, 2]. Одним з головних принципів побудови таких мереж є самоорганізація архітектури, що забезпечує можливості топології мережі "кожний з кожним", стійкість до відмов окремих компонентів, збільшення зони інформаційного покриття в режимі самоорганізації, динамічну маршрутизацію трафіку, автоматичний контроль стану мережі і т.д. Важливою особливістю прикладної mesh-мережі є можливість розміщення обладнання всіх або частини вузлів на рухомих об'єктах різного базування, в тому числі пілотованих і безпілотних [3, 4]. Ця особливість mesh-технології (технологію mesh-мережі описує стандарт IEEE 802.11s) стає особливо привабливою для забезпечення зв'язку в умовах неможливості організації провідної інфраструктури. Наприклад, дане рішення ідеальне для організації зв'язку в важкодоступних місцях, а також для оперативного зв'язку (аварійні ситуації, тунелі і нафтові платформи, військові конфлікти) і здатне забезпечити високошвидкісне мобільне підключення, що дозволяє передавати потокові дані в режимі реального часу (наприклад, відеодатки, голосові комунікації, дані телеметрії та інші дані). Технологія mesh-мережі дозволяє самостійно адаптуватися до мінливих умов зв'язку і автоматично конфігурувати мобільні маршрутизатори, об'єднуючи їх за допомогою радіоліній в топологію довільної форми. При цьому маршрутизатори можуть вільно переміщатися і організувати себе в єдину мережу довільної архітектури, топологія якої може швидко і непередбачувано змінюватися. Така мережа може працювати автономно або бути пов'язаною з будь-якою зовнішньою мережею або Інтернет.

Незважаючи на широкі можливості, застосування mesh-мереж обмежується додатками, критичними до швидкості передачі даних і часу доставки повідомлень. У зв'язку з постійно розширюваною сферою застосування mesh-мереж швидкісні інформаційні показники і надійність зв'язку в них стають визначальними. Враховуючи загальний дефіцит частотного ресурсу, актуальною стає проблема забезпечення зростаючих потреб додатків в швидкісних показниках і надійності зв'язку в mesh-мережах. Дана проблема тісно пов'язана з важливою науковою і прикладною задачею створення систем і мереж, здатних забезпечувати високу швидкість і надійність передачі інформації всупереч невизначеним умовам, що змінюються в каналі зв'язку, що викликаються різними збуреннями і перешкодами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В даний час розвиток теорії і техніки mesh-мереж здійснюється в ряді дослідницьких центрів. Серед них слід виділити групу MANET (Mobile Ad-hoc Networks) при організації IETF (Internet Engineering Task Force), Каліфорнійський університет, Санкт-Петербурзький університет телекомунікацій ім. проф. М.А. Бонч-Бруєвича, Інститут радіотехніки та електроніки ім. В.А. Котельникова РАН, а також Нижегородський державний університет ім. М.І. Лобачевського. Специфіка mesh-мереж полягає в тому, що кожен вузол повинен, у разі необхідності, виконувати функції маршрутизатора. У зв'язку з рухливістю вузлів, канали передачі даних можуть з'являтися і зникати в будь-який момент часу. Це робить неможливим використання відомих протоколів маршрутизації. Відомі протоколи та механізми практично не зачіпають фізичного рівня [1]. Велика частина з них відноситься в основному до MAC-підрівня канального рівня, а стандарт IEEE 802.11s розглядає питання маршрутизації пакетів в рамках mesh-мережі (фактично – мережевий і транспортний рівень моделі OSI). Різноманіття існуючих протоколів і механізмів пояснюється тим, що вони не повною мірою враховують потенційні можливості підвищення ефективності передачі на фізичному рівні моделі OSI. При цьому відомо, що розробка і оптимізація протоколу вищого рівня, особливо типу MAC, повинна базуватися

на повному врахуванні потенційних можливостей найнижчого з рівнів моделі OSI – фізичного рівня. Зокрема, відомі протоколи та механізми не повною мірою враховують всіх можливостей адаптації фізичного рівня до невизначених і динамічних змінних умов зв'язку, характерних для реальних умов передачі в mesh-мережах. Адаптація фізичного рівня обмежується переважно процедурами, що базуються на можливостях частотно-енергетичного ресурсу. У меншій мірі розвинені підходи до реалізації адаптації фізичного рівня в mesh-мережах засновані на можливостях використання просторово-поляризаційного ресурсу [5]. Практично відсутні результати досліджень проблеми адаптації фізичного рівня в mesh-мережах на основі використання узгодженого і динамічного управління передавальної і приймальної багатоантенними системами просторово-часової обробки з урахуванням непевності умов випромінювання, розповсюдження і прийому радіосигналів, топології мережі та можливої просторової динаміки вузлів. На сучасному етапі вирішення цієї проблеми додатково ускладнюється істотною електромагнітною "забрудненістю" середовища передачі з-за інтенсивного використання радіочастотного ресурсу всіма видами радіосистем, а також значного збільшення щільності розміщення радіообладнання і абонентів усіх видів бездротових систем і мереж.

**Мета.** Розробка конструктивного методу адаптації фізичного рівня до невизначених та змінних умов зв'язку в mesh-мережах на основі узгодженого управління передавальної і приймальної багатоантенними системами просторово-часової обробки з невідомою структурою і характеристиками.

**Постановка завдання.** Розглянемо на основі структури моделі OSI організацію зв'язку в mesh-мережі між двома сусідніми вузлами. Нехай на фізичному рівні моделі на приймальній і передавальній сторонах використовуються багатоантенні системи просторово-часової обробки. При цьому приймальна багатоантенна система реалізується у вигляді традиційного суматора з попереднім і керованим зважуванням сигналів з виходів заданої сукупності антен з невідомими характеристиками спрямованості і конфігурацією їх розміщення на вузловій платформі. Вважається, що вектор  $U_R$  управліннь вагами відомий і визначений, виходячи з вимог прийому. Оскільки на передавальній стороні використовується керована багатоантенна система випромінювання, що реєструється сукупністю сигналів, що діють на виході заданої сукупності антен на приймальній стороні, буде визначатися деяким векторним оператором  $Y(U_T)$ , залежним від вектора  $U_T$  управліннь деякої багатоантенної випромінюючої системи. У загальному випадку оператор  $Y(U_T)$  залежить не тільки від вектора управліннь  $U_T$ , але й від переданого сигналу  $x_\lambda(t)$  і його перетворень в середовищі передачі з урахуванням діючих джерел завад  $j(t)$  та шумів (далі для зручності запису в окремих співвідношеннях аргумент часу буде опущений).

Невизначеність і мінливість умов передачі, властиві фізичним рівням в mesh-мережах, зазвичай, характеризуються відсутністю відомостей про структуру та характеристики багатоантенних випромінюючих систем, статистичних характеристикам випромінюваного сигналу і діючих завад та шумів, які можуть непередбачено змінюватися в процесі зв'язку.

Дотримуючись прийнятої структури приймальної багатоантенної системи, сигнал  $Y_\lambda$ , що спостерігається на її виході у фіксований момент часу, може бути представлений у вигляді:

$$y_\lambda = Y^T(U_T)U_R = U_R^T Y(U_T) \quad (1)$$

Нехай потрібний у цей момент часу вихідний сигнал визначається  $s_0$ . Тоді якість передачі на фізичному рівні можна охарактеризувати середнім квадратом відхилення  $\varepsilon^2 = M\{(y_\lambda - s_0)^2\}$  (СКВ).

При цьому завдання узгодженого управління передавальної і приймальної багатоантенної системи в розглянутих умовах зв'язку може бути інтерпретована як завдання визначення управліннь  $U_T$  передавальної багатоантенної системи, що забезпечують мінімум СКВ передачі для довільних заданих управліннь  $U_R$  багатоантенної системи просторово-часової обробки на приймальній стороні.

**Рішення завдання.** У силу невизначеності структури і характеристик використовуваної передавальної багатоантенної системи, а також статистики сигналу та завад, які можуть при цьому непередбачено змінюватись в процесі зв'язку, скористатися критерієм мінімуму СКВ не представляється можливим [6]. Доступними для спостереження в зазначених умовах виявляються тільки реалізації сигналів на виході сукупності прийомних антен, вихідного сигналу  $y_\lambda$  та похибки  $c$  (якщо відомий сигнал  $S_0$ ).

З урахуванням виразу (1) і в припущенні відомого  $s_0$  похибка визначається:

$$\varepsilon_t^2 = Y^T(U_T)U_R U_R^T Y(U_T) - 2Y^T(U_T)U_R s_0 + s_0^2. \quad (2)$$

У цьому випадку градієнт похибки (2) за вектором  $U_T$  буде визначатися вектором:

$$\nabla_{U_T} \varepsilon_t^2 = \frac{dY^T(U_T)}{dU_T} [2U_R U_R^T Y(U_T) - 2U_R s_0] = 2[y_\lambda - s_0] \frac{dY^T(U_T)}{dU_T} U_R, \quad (3)$$

де 
$$\frac{dY^T(U_T)}{dU_T} = \begin{vmatrix} \frac{dy_{\lambda 1}}{du_T^1} & \frac{dy_{\lambda 2}}{du_T^1} & \frac{dy_{\lambda 3}}{du_T^1} & \dots & \frac{dy_{\lambda k}}{du_T^1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dy_{\lambda 1}}{du_T^n} & \frac{dy_{\lambda 2}}{du_T^n} & \frac{dy_{\lambda 3}}{du_T^n} & \dots & \frac{dy_{\lambda k}}{du_T^n} \end{vmatrix} = J_T(Y, U_T)$$
 представляє собою функціональну

матрицю розміру  $n \times k$  ;

$k$  – розмір вектора  $U_R$  управління багатоантенної системи на приймальній стороні;

$n$  – розмір вектора  $U_T$  управління багатоантенної системи на передавальній стороні.

З врахуванням (3) можливий метод адаптації вектора управління передавальної багатоантенної системи для довільного моменту буде визначатися співвідношенням:

$$U_T(i+1) = U_T(i) - 2\mu_i(y_\lambda(i) - s_0(i))J_T(Y, U_T, i)U_R(i), \quad (4)$$

де  $J_T(Y, U_T, i) = J_T(Y(i), U_T(i))$ . Відповідно до методу (4) може бути проведена адаптація управління передавальної багатоантенної системи при будь-якому заданому векторі  $U_R$  управління приймальної багатоантенної системи. При цьому, як випливає з (4), необхідно знати матрицю  $J_T(Y, U_T, i)$  для кожного моменту та процедури адаптації. У (4) параметр  $\mu_i$  може бути скалярним або матричним і вибиратися із відомих умов збіжності відповідних процедур.

**Аналіз результатів.** Управління  $U_T$ , зумовлені (4), в загальному випадку можуть визначатися на приймальній або передавальній стороні. У разі їх визначення на приймальній стороні необхідна спеціальна радіолінія для управління передавальної багатоантенної системи. В якості таких радіоліній в Mesh-мережах можуть використовуватися наявні лінії зв'язку між вузлами або спеціально організовані для цих цілей лінії управління передавальними багатоантенними системами. У разі визначення управління на передавальній стороні необхідна лінія передачі інформації про похибку, матрицю  $J_T(Y, U_T, i)$  і вектор  $U_R$  для кожного моменту адаптації. Найбільш важким при реалізації процедури (4) виявляється визначення вектора  $J_T(Y, U_T, i)U_R(i)$ .

Можна показати, що цей вектор являє собою аналог вектора чутливості деякого динамічного тракту передачі (ДТП), утвореного багатоантенною випромінюючою системою, середовищем передачі та прийому багатоантенної системи. При цьому оцінка вектора чутливості ДТП може бути отримана на основі обчислення різниць поточних значень вихідного сигналу  $y_\lambda(i)$  та  $y_\lambda(i-1)$ , а також управління  $u_T^p(i)$  і  $u_T^p(i-1)$  для всіх  $p = \overline{1, n}$  відповідно до процедури:

$$J_T(Y, U_T, i)U_R \cong \left[ \frac{y_\lambda(i) - y_\lambda(i-1)}{u_T^1(i) - u_T^1(i-1)}, \frac{y_\lambda(i) - y_\lambda(i-1)}{u_T^2(i) - u_T^2(i-1)}, \dots, \frac{y_\lambda(i) - y_\lambda(i-1)}{u_T^n(i) - u_T^n(i-1)} \right]^T \quad (5)$$

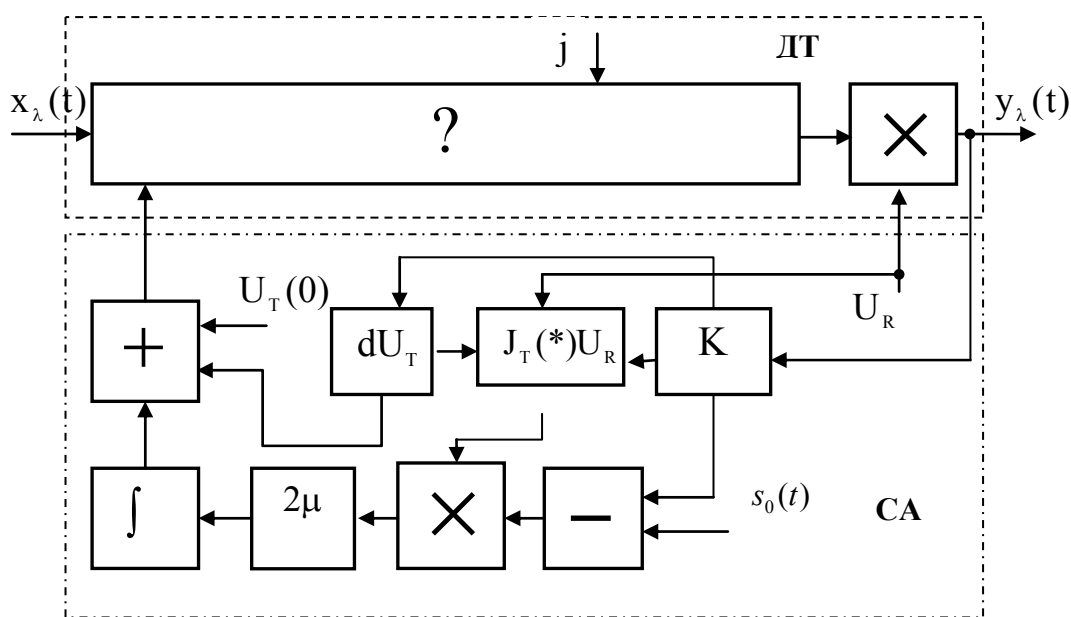


Рис. 1. Структура ДТП за адаптацію управління на передавальній стороні

У цьому випадку структура розглянутого ДТП з відповідною системою адаптивної настройки

управління може бути представлена у вигляді, який зображено на рис. 1. Адаптація вектора  $U_T(i)$  починається з оцінки вектора (5), а потім продовжується у відповідності з процедурою (4). При цьому можливий варіант періодичного виконання процедури (5) і в проміжках між ними виконання процедури (4). При цьому процедура адаптації (4) буде виконуватися при періодично оновлюваних оцінках (5). Зазначений режим роботи адаптивного ДТП здійснюється за допомогою контролера (К), який управляє і забезпечує перехід від процедури оцінки до процедури адаптації та навпаки. Період оновлення вектора (5) залежить від швидкості зміни умов зв'язку з урахуванням їх невизначеності і можливої просторової динаміки передавальної і приймальної сторін.

Основні труднощі при реалізації даного методу адаптації, як зазначалося вище, пов'язана з необхідністю використання вектора чутливості ДТП. Для його визначення необхідно введення в процес адаптації спеціальних режимів оцінювання, які потребують додаткових тимчасових витрат. Можна показати, що, використовуючи метод настроюваної моделі для розглянутого ДТП, можна оцінювати вектор чутливості безпосередньо в процесі адаптації.

**Метод настроюваної моделі.** При цьому ДТП задається у вигляді моделі, що описується рівнянням  $y(t) = B^T U_T x_\lambda(t)$ , де  $B$  – вектор невідомих і змінних управління моделі ДТП. Будемо вважати, що швидкість зміни вектора  $B$  управління моделі в часі значно менше швидкості зміни параметрів вхідного процесу.

Задамо показник якості близькості заданої моделі до реального ДТП у вигляді:  $M\{(y_\lambda(t) - y(t))^2\}$ . Тоді в умовах відсутності відомостей про статистику відповідних процесів для обчислення оптимального (в сенсі мінімуму даного показника якості) вектора управління моделі може бути запропонована відома процедура стохастичної апроксимації виду [6]:

$$dB/dt = -2\mu_B(y_\lambda(t) - U_T^T B x_\lambda(t)) U_T x_\lambda(t), \quad (6)$$

де  $\mu_B$  – параметр, який визначається із умов стійкості даної процедури. Обчислюючи відповідно до (6) вектор параметрів моделі, оцінка вектора чутливості ДТП буде визначатися вектором  $Bx_\lambda(t)$ . Дану оцінку можна використовувати в методі (4) замість потрібної оцінки вектора чутливості (5) для адаптації розглянутого ДТП.

**Висновки.** Запропоновано конструктивний метод адаптації фізичного рівня до невизначених та змінних умов зв'язку в mesh-мережах на основі узгодженого управління випромінюючими та приймаючими багатоантенними системами невідомої структури. Даний метод на основі поточної інформації про варіації вихідного сигналу ДТП, обумовлених відповідними змінами управління випромінюючої системи, дозволяє визначати в процесі адаптації такі значення управління, при яких забезпечується екстремум заданого показника якості передачі сигналів у невизначених і мінливих умовах зв'язку. Зауважимо, що за невизначеність умов зв'язку доводиться платити ускладненням методів адаптації та процедур їх реалізації. При цьому для спрощення реалізації запропонованого методу адаптації обчислення вектора чутливості в ряді випадків можна проводити збільшення управління та відповідних варіацій вихідного сигналу або з використанням розглянутого методу настроюваної моделі. У цьому випадку структура, що представлена на рис. 1, дещо зміниться.

Запропонований метод адаптації випромінюючих багатоантенних структур з невизначеною структурою може знайти застосування не тільки в розглянутих mesh-мережах, а й у різних за призначенням системах і мережах радіозв'язку цивільного та спеціального використання, в яких умови зв'язку є головним чинником, що обмежує можливість підвищення ефективності передачі інформації. Застосування даного методу дозволить, наприклад, істотно підвищити ефективність передачі даних з безпілотних і пілотованих платформ різного базування.

## Література

1. Вишнеvский В. М. Энциклопедия WiMAX: путь к 4G / Вишнеvский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. – М. : Техносфера, 2009. – 472 с.
2. Сюваткин В. С. и др. WiMAX-технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / [ под ред. В. В. Крылова ] . – СПб. : БВХ-Петербург, 2005. – 368 с.
3. STANAG 7023/AEDP-9. NATO Digital Motion Imagery Format. – standard/7023/7023.htm.
4. STANAG 7085. Inoperable Data Links for Imaging Systems.
5. Поспелов Б. Б. Комплексная оптимизация беспроводных каналов связи / Б. Б. Поспелов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 2. – С. 162–167.
6. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Цыпкин Я. З. – М.: Наука, 1968. – 400 с.

Надійшла 16.1.2011 р.