

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На даний час безпроводові мережі передачі інформації є одним з основних напрямків розвитку інфокомунікацій. LTE - стандарт універсальних міських мереж, в яких безпроводовий широкосмуговий доступ використовується дуже широким спектром додатків - від традиційної передачі мови до сучасних мультимедійних додатків. Технологія LTE використовує відповідні протоколи взаємодії вузлів мережі для управління передачею пакетів по загальному каналу зв'язку. Наявність загального каналу зв'язку, який колективно використовується абонентами (часто дуже великою кількістю), є спільною рисою сучасних і перспективних безпроводових телекомунікаційних систем. Дана риса ставить проблеми збільшення продуктивності, необхідність розробки алгоритмів, що забезпечують своєчасну і надійну передачу інформації, які підвищують коефіцієнт використання смуги пропускання, скоротять час реагування базової станції (БС) на запити абонентських станцій (АС), забезпечать якість обслуговування (QoS) для різних видів трафіку.

Важливими проблемами в галузі забезпечення якості обслуговування є проблеми підвищення пропускну здатності БС. Для подальшого поліпшення якості та ефективності передачі даних в мережах LTE потрібна розробка нових методів підвищення пропускну здатності шляхом раціонального використання ресурсів.

Таким чином, актуальною є задача вибору і розробки більш ефективних алгоритмів розподілу ресурсів і управління доступом, для того щоб отримати більш високу пропускну здатність БС мережі LTE при незбалансованому трафіку, знизити затримку пакетів і підвищити ймовірність з'єднання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційні дослідження пов'язані з положеннями "Концепції національної інформаційної політики", "Концепції національної програми інформатизації", "Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки" та "Концепції конвергенції телефонних мереж та мереж з пакетною комутацією в Україні". Дисертаційна робота є продовженням і подальшим розвитком наступних науково-дослідних робіт (НДР): НДР № 261-1 "Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління" (ДР № 0111U002627), яка виконувалася в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ); НДР № 299-1 "Підвищення масштабованості технологічних рішень по забезпеченню якості обслуговування в конвергентних мережах" (ДР № 0115U002432), яка виконується в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ), НДР "Концепція обробки, аналізу і передачі даних в ІАС НАКУ", яка виконувалася в Харківському державному регіональному науково-технічному центрі з питань технічного захисту інформації.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення пропускну здатності базових станцій мережі LTE.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішені такі задачі дослідження:

- вдосконалення методів адаптивної модуляції в мережах LTE при наявності завад з метою підвищення пропускної здатності базових станцій;
- проведення натурних досліджень параметрів суміжних радіоканалів і визначення їх статистичних характеристик;
- розробка математичної моделі суміжних радіоканалів з урахуванням статистичної залежності між ними;
- розробка і аналіз методів поточної оцінки результатів вимірювання в статистично пов'язаних радіоканалах;
- розробка методів скорочення часу обробки пакетів, при диспетчеризації ресурсів планувальника кадрів;
- розробка методу раціонального розподілу ресурсів при доступі в мережах LTE із забезпеченням скорочення часу реагування базових станцій на запити абонентських станцій і підвищення ймовірності з'єднання.

Об'єкт дослідження. Процеси функціонування систем радіодоступу LTE.

Предмет дослідження. Моделі і методи розподілу ресурсів і управління доступом в мережах LTE.

Методи досліджень базуються на основних положеннях радіофізики, теорії електров'язку, системного аналізу, математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії оптимізації, теорії оцінювання та управління, теорії масового обслуговування, методи просторово-часової обробки сигналів, управління в адаптивних антенних решітках, математичний апарат нечіткої логіки, математичного моделювання, натурального і імітаційного експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено метод адаптивної модуляції при передачі даних в мережах LTE. Метод заснований на використанні індикатора якості каналу, який дозволяє враховувати рівні сигналів і завад, а також відстань між базовою і абонентською станціями. Використання отриманих результатів дозволяє адаптивно управляти параметрами виду модуляції з метою підвищення пропускної здатності базових станцій.

2. Отримала подальший розвиток процедура для оцінки параметрів каналів мережі LTE, заснована на багатовимірному фільтрі Калмана-Бьюсі. Дана процедура на відміну від існуючої процедури, яка використовується в LTE, дозволяє оцінювати не середні значення параметрів каналів, а проводить оцінку в реальному масштабі часу і дозволяє враховувати статистичний зв'язок між суміжними каналами. Даний результат дасть можливість скоротити час оцінювання та підвищити якість оцінки.

3. Удосконалена підсистема планування кадрів при диспетчеризації ресурсів, заснована на алгоритмі SJF (Shortest-Job-First). На відміну від алгоритму FIFO (First In, First Out), який використовується в LTE даний алгоритм забезпечує зменшення часу очікування пакетів в черзі, часу обробки і кількості відкинутих пакетів.

4. З використанням математичної моделі нечіткої логіки удосконалено метод управління просторово-часовим доступом (ПЧД) в мережах LTE, що дозволило забезпечити прискорення доступу до середовища і як результат -

збільшити кількість абонентських станцій, які обслужені в порівнянні з методом, заснованим на аналізі черг.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Практичне застосування адаптивної модуляції в мережах LTE дозволить скоротити ймовірність помилки на 1 - 2 порядки, що підвищить пропускну здатність базових станцій.

2. Практичне застосування багатовимірної рекурсивної процедури оцінки Калмана-Бьюсі на відміну від традиційних одновимірних оцінок, і оцінок заснованих на вибіркових статистиках, дозволяє отримувати більш точні результати і синтезувати керуючий вплив режиму функціонування в реальному масштабі часу. Аналіз багатовимірної процедури Калмана-Бьюсі з урахуванням статистичного зв'язку дає вигреш по точності оцінювання більше, ніж в 10 разів і цей вигреш збільшується зі збільшенням відносини сигнал / шум.

3. Практичне застосування алгоритму SJF при диспетчеризації ресурсів дає вигреш щодо алгоритму FIFO, який використовується в LTE за середнім часом очікування в черзі до 3000 мкс, що становить від 45% до 50% від звичайного часу, за середнім часом обробки пакетів до 48%, за відкинутими пакетами до 15%.

4. Практичне застосування ПЧД дозволяє підвищити відношення сигнал / завада + шум (BC3Ш) на 20 - 30 і більше дБ, що дає економію 1,5 - 2 підканала. Алгоритм ПЧД, заснований на моделі нечіткої логіки дає вигреш в ймовірності з'єднання на 10% щодо алгоритму, заснованому на аналізі черг, який використовується в LTE. При обмежених доступних ресурсах алгоритм, заснований на аналізі черг поступається алгоритму нечіткого виведення з ПЧД на 40%.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані в:

- Харківському державному регіональному науково-технічному центрі з питань технічного захисту інформації при побудові телекомунікаційної мережі LTE (акт реалізації від 15.04.2016);

- навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки при вивченні дисципліни «Теорія електричного зв'язку», звіті НДР № 261-1 "Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління" (ДР № 0111U002627), яка виконувалася в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ) та звіті НДР № 299-1 "Підвищення масштабованості технологічних рішень по забезпеченню якості обслуговування в конвергентних мережах" (ДР № 0115U002432), яка виконується в ХНУРЕ (акт реалізації від 19.04.2016).

Особистий внесок здобувача в спільних публікаціях. В роботі [1] автору належить проведення аналізу завадостійкості методів модуляції. В роботі [2] автору належить розробка алгоритму управління розподілом ресурсів і доступом з'єднань в мережах LTE. В роботі [3] автору належить розробка методу оцінки параметрів радіоканалів мережі LTE. В роботі [4] автору належить проведення аналізу ефективності алгоритмів планування

передачі кадру в мережах LTE. В роботі [5] автору належить дослідження параметрів радіоканалів мережі LTE. В роботі [6] автору належить розробка просторово-часового доступу до базових станцій мережі LTE. В роботі [8] автору належить розробка математичної моделі внутрішньосистемних завад. В роботі [10] автору належить проведення аналізу впливу внутрішньосистемних завад на пропускну здатність мережі LTE.

Апробація результатів дисертації: Результати доповідались на наукових семінарах кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ, а також на 4-х Міжнародних конференціях [7-10]. Всі виступи за темою дисертації.

Публікації: за темою дисертації надано 6 статей [1-6], які опубліковано в спеціалізованих виданнях, з них 1 стаття за кордоном [3].

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який складається з 69 найменувань. Загальний обсяг роботи 136 сторінок з них: 50 рисунків, 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми досліджень, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, наведено інші необхідні характеристики дисертаційної роботи.

У першому розділі показано, що число користувачів мережі LTE збільшується щорічно на 20,8%. Наявність загального каналу зв'язку, який колективно використовується великою кількістю абонентів, є спільною рисою сучасних і перспективних безпроводових телекомунікаційних систем. При цьому важливим є дефіцит частотного ресурсу, зниження пропускну здатності БС і як наслідок обмеження в наданні доступу АС до середовища. В якості систем множинного доступу в LTE використовуються OFDMA в низхідному каналі і SC-FDMA в висхідному каналі. Як в низхідному, так і в висхідному каналі можуть використовуватися такі види модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM. Адаптивний вибір даних видів модуляції забезпечує необхідну швидкість передачі інформації і якість обслуговування. Робота мережі LTE здійснюється з коефіцієнтом перевикористання частот 1, тобто всі БС працюють на одній несучій. Внутрішньосистемні завади в даній системі мінімізуються завдяки частотно-селективній диспетчеризації, координації завад між стільниками, гнучкому частотному плану. Однак, все ж, проблема внутрішньосистемних завад присутня особливо на межах стільників, що в свою чергу впливає на пропускну здатність БС мережі та обмеження в наданні доступу.

Показано, що пропускну здатність БС визначається ймовірністю помилки, точністю оцінювання результатів вимірювання каналів, часом очікування пакетів в черзі, часом обробки пакетів, ймовірністю з'єднання.

У цьому розділі показано, що для вирішення задач підвищення пропускну здатності БС необхідне вдосконалення методів адаптивної модуляції в мережах LTE; розробка та аналіз методів поточної оцінки результатів вимірювання в статистично пов'язаних радіоканалах; розробка

методів скорочення часу обробки пакетів, при диспетчеризації ресурсів планувальника кадрів; розробка методу раціонального розподілу ресурсів при доступі в мережах LTE із забезпеченням скорочення часу реагування БС на запити АС і підвищення ймовірності з'єднання.

У другому розділі удосконалено метод адаптивної модуляції при передачі даних в мережах LTE.

Проведено аналіз зниження пропускної здатності БС мережі LTE за рахунок соканальних завад. Аналіз показав, що втрати в пропускній здатності для користувача на краю стільника можуть досягати до 70%.

У мережах LTE для вибору виду модуляції використовується Індикатор Якості Каналу. Для цього використовується процедура вимірювання стану каналів.

В роботі запропоновано крім Індикатора Якості Каналу використовувати відстань між передавачем і приймачем і значення потужності завад. Отримано залежності ймовірності помилки P_9 з урахуванням відстані між передавачем і приймачем, потужності сигналу, флуктуаційних та імпульсних завад для видів модуляції:

- для PSK:

$$P_9 = \frac{1}{2} \left\{ (1 - \rho) \left[1 - F \left(\sqrt{\frac{2PGAn}{4\pi r^2 N_0 k}} \sin \frac{\pi}{M} \right) \right] + \rho \left[1 - F \left(\sqrt{\frac{2PGAn}{4\pi r^2 (N_0 + J_0) k}} \sin \frac{\pi}{M} \right) \right] \right\}$$

- для QAM:

$$P_9 = \frac{1}{2} \left\{ (1 - \rho) \left[1 - F \left(\sqrt{\frac{\sqrt{2}PGAn}{8\pi r^2 N_0 k (\sqrt{M} - 1)}} \right) \right] + \rho \left[1 - F \left(\sqrt{\frac{\sqrt{2}PGAn}{8\pi r^2 (N_0 + J_0) k (\sqrt{M} - 1)}} \right) \right] \right\},$$

де ρ - ймовірність виникнення завади, R_k - швидкість кодування, P - ефективна випромінювана потужність, G - коефіцієнт посилення антени передавача, r - відстань між АС і БС, A - ефективна площа приймальної антени, N_0 - спектральна густина потужності шуму, J_0 - сумарна спектральна густина потужності завад, M - число позицій модуляції, $F(\bullet)$ - функція Лапласа.

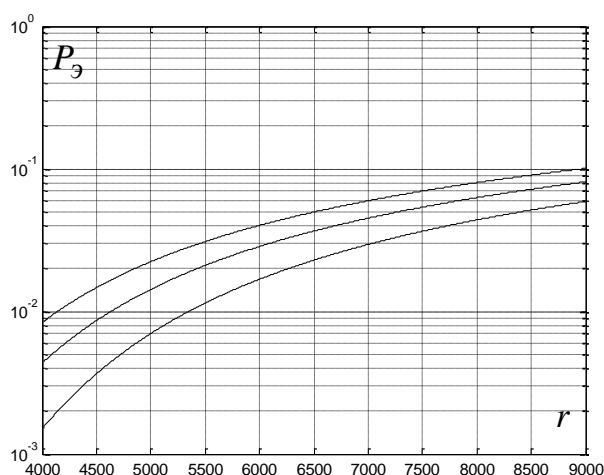


Рис.1. Залежність ймовірності помилки від відстані між передавачем і приймачем для модуляції QPSK

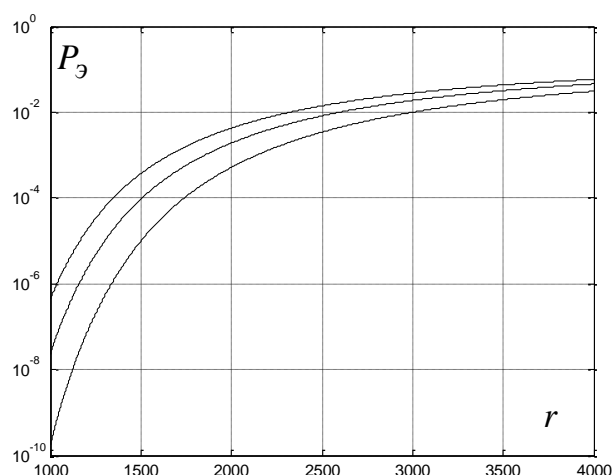


Рис.2. Залежність ймовірності помилки від відстані між передавачем і приймачем для модуляції QAM -16

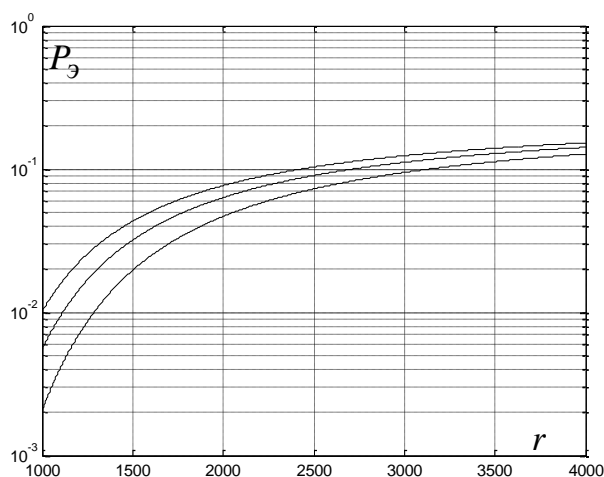


Рис.3. Залежність ймовірності помилки від відстані між передавачем і приймачем для модуляції QAM-64

Побудовано залежності ймовірності помилки на біт інформації від відстані між передавачем і приймачем при наявності імпульсних завад. Потужність випромінювання прийнята рівною 1 Вт. Спектральна густина потужності шуму була прийнята 0,1767 Вт. Потужність імпульсної завади при моделюванні була обрана в три рази більше потужності внутрішніх шумів. На рис.1 - рис. 3 надано залежності ймовірності помилок для видів модуляції QPSK і QAM, які використовуються в LTE. Верхні криві на даних рисунках відповідають швидкості кодування $R_k = 5/6$, середні - $R_k = 2/3$, нижні -

$$R_k = 1/2.$$

Проведений аналіз показує що, використовуючи відстань між БС і АС і потужності завад, можна адаптивно управляти ймовірністю помилки з метою оптимізації пропускної здатності базових станцій мережі і підвищення ймовірності з'єднання.

У третьому розділі отримала подальший розвиток процедура для оцінки параметрів каналів мережі LTE, заснована на багатовимірному фільтрі Калмана-Бьюсі.

Для розподілу ресурсів і надання доступу в мережі LTE кожні 0,5 мс проводяться виміри характеристик каналу, і кожні 40 мс відправляються звіти про середні значення якості каналу. Такий підхід не є раціональним, оскільки параметри каналів постійно змінюються, і на момент відправки звітів про вимірювання стан каналу не буде відповідати середньому значенню. Крім того, вимірювання проводяться в присутності шумів. Більш конструктивним рішенням в даному випадку є застосування методів оцінки результатів вимірювання в реальному масштабі часу.

Проведено натурні дослідження ВСЗШ висхідного каналу в частотному діапазоні 1920 - 1980 МГц на суміжних частотах 1920000 кГц і 1920180 кГц. Експеримент полягав у наступному. Генерувалися тестові сигнали на частотах 1920000 кГц (канал 1) і 1920180 кГц (канал 2). На приймальній стороні проводилися вимірювання ВСЗШ в кожному каналі (рис.4). Для набору статистики було зроблено 1000 вимірювань протягом 428,6 мс через інтервал часу $\Delta t = 0,4286$ мс.

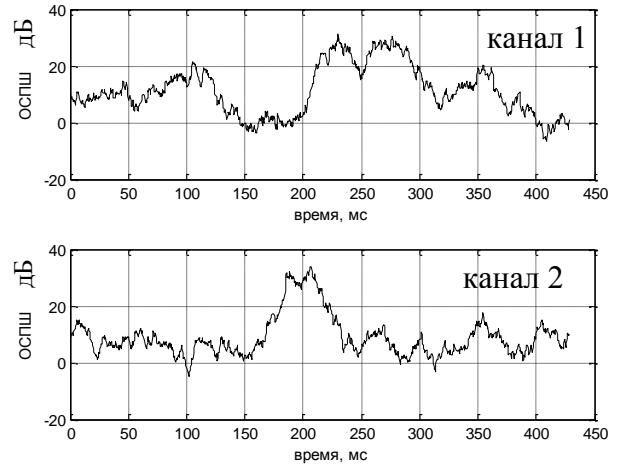


Рис. 4. Результати вимірювання ВСЗШ двох суміжних каналів

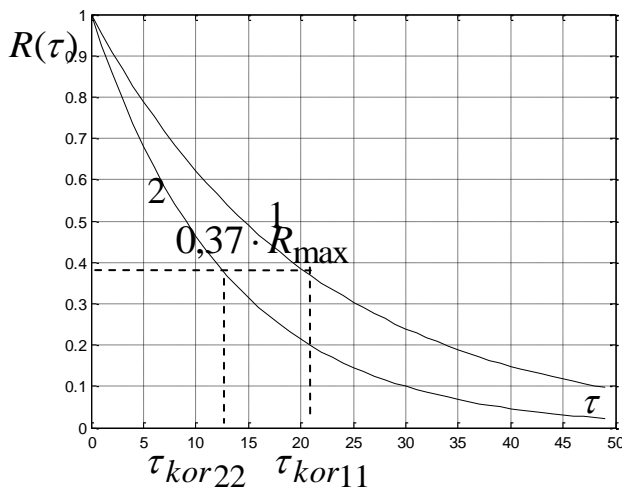


Рис. 5. Графіки нормованих кореляційних функцій процесів 1 і 2

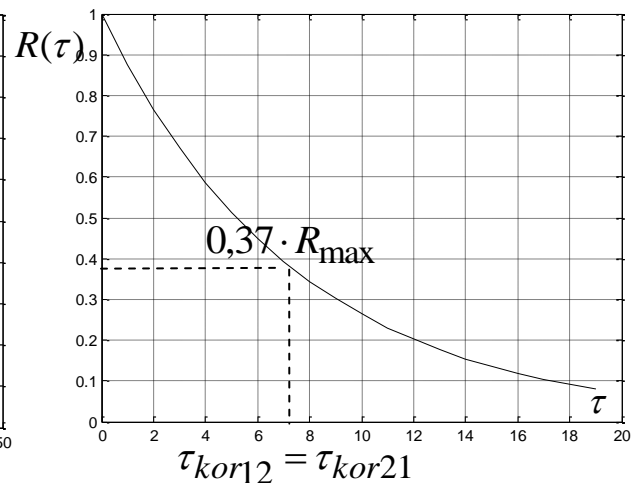


Рис. 6. Графік нормованої взаємної кореляційної функції

За реалізаціями отримані математичні очікування, дисперсії, побудовані функції кореляції (рис.5) і взаємної кореляції (рис.6). Визначено інтервали кореляції і інтервали взаємної кореляції. Всі отримані статистичні характеристики зведені в табл.1.

Табл. 1. Статистичні характеристики отриманих реалізацій

№ каналу	Математичні очікування	Дисперсії	Інтервали кореляції	Інтервал взаємної кореляції
Канал 1	$m_1 = 11.0671$	$\sigma_1^2 = 33.2875$	$\tau_{kor11} = 21$ часовий зсув (9,006 мс)	$\tau_{kor12} = 7,5$ часовий зсув (3,2145 мс)
Канал 2	$m_2 = 10.9773$	$\sigma_2^2 = 27.0391$	$\tau_{kor22} = 13$ часовий зсув (5,5718 мс)	$\tau_{kor21} = 7,5$ часовий зсув (3,2145 мс)

За статистичними характеристиками розроблена двовимірна модель стану каналів:

$$\vec{h}(k+1) = F \cdot \vec{h}(k) + G \cdot \vec{\xi}(k), \quad (1)$$

де h - ОСПШ в каналі, $\vec{\xi}(k)$ - породжуючий векторний білий гаусівський шум, матриця стану $F = \begin{pmatrix} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{kor11}}\right) & \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{kor12}}\right) \\ \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{kor21}}\right) & \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{kor22}}\right) \end{pmatrix}$, $\Delta t = 0,4286$ мс -

крокова постійна, k - крок, матриця збудження $G = \begin{pmatrix} \sqrt{\sigma_1^2 f_{11}(1-f_{11})} & \sqrt{\sigma_1^2 \sigma_2^2 f_{12}(1-f_{12})} \\ \sqrt{\sigma_1^2 \sigma_2^2 f_{21}(1-f_{21})} & \sqrt{\sigma_2^2 f_{22}(1-f_{22})} \end{pmatrix}$, f_{ij} - елемент матриці F .

Модель (1) доповнюється рівнянням спостереження:

$$y(k) = H \cdot \left(\vec{h}(k) + m \right) + n(k) \quad (2)$$

де H - матриця, яка задає послаблення процесів, що вимірюються;

$n(k)$ - шум спостереження, який є векторним білим гаусівським шумом, m - вектор математичних очікувань.

У розділі проведено аналіз вибірових і рекурсивних методів оптимальної оцінки випадкових величин. За допомогою даних методів отримані середні значення ВСЗШ каналів.

Запропонована процедура для оцінки параметрів каналів мережі LTE, заснована на багатовимірному фільтрі Калмана-Бьюсі:

Запропонована процедура для оцінки параметрів каналів мережі LTE, заснована на багатовимірному фільтрі Калмана-Бьюсі:

$$\hat{\vec{h}}(k) = F \cdot \hat{\vec{h}}(k-1) + K(k)[y(k) - H \cdot F \cdot \hat{\vec{h}}(k-1)], \quad (3)$$

где $K(k)$ - матриця, яка забезпечує стійкість і оптимальну швидкість збіжності і підлягає рекурсивному обчисленню $K(k+1) = P(k)H^T N_n^{-1}$, $P(k)$ - апостеріорна дисперсія $P(k+1) = FV(k)F^T + GN_\xi(k)G^T$, $V(k)$ - априорна дисперсія $V(k+1) = [I - K(k)H]P(k+1)$, N_ξ, N_n - відповідно значення спектральних густин потужності шуму, що породжує $\vec{\xi}(k)$ і шуму спостереження $\vec{n}(k)$, I - одинична матриця.

Дана процедура на відміну від існуючої процедури, що використовується в LTE, дозволяє оцінювати не середні значення параметрів каналів, а проводить оцінку в реальному масштабі часу.

Розроблено структурну схему машинного експерименту, яка складається з моделі спостереження, моделі процедури оцінки і моделі процедури обробки результатів аналізу. На основі оцінок $\hat{h}(k)$ вибірових значень процесу, формується масив помилок оцінки $\vec{err}(k) = \hat{h}(k) - h(k)$. Різниця $\vec{err}(k)$ використовується для отримання вибіркової апостеріорної дисперсії помилки оцінки $P = (n-1)^{-1} \sum_{k=1}^n err(k)^2$, де n - обсяг вибірки.

Аналіз якості одержаних оцінок ВСЗШ проведено за допомогою відносної апостеріорної дисперсії помилки оцінки $\frac{P}{P_{np}}$ (P_{np} - дисперсія процесу) в умовах сталого режиму фільтра.

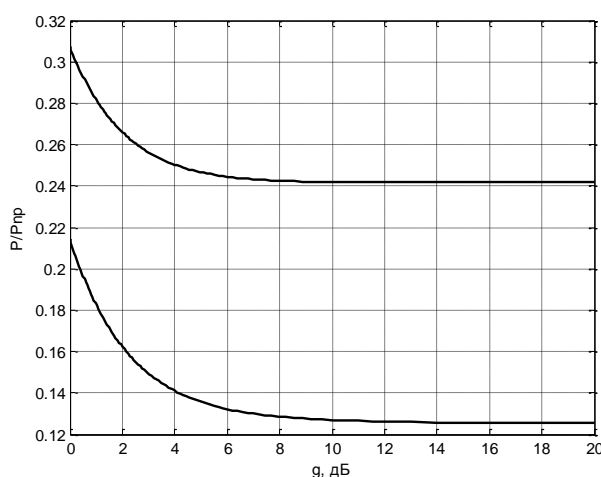


Рис.7. Залежність відносної апостеріорної дисперсії помилки оцінки від q

відношенні потужності вимірюваного процесу до потужності шумів спостереження в каналі.

Побудовано залежності відносної апостеріорної дисперсії помилки оцінки від q (відношення потужності вимірюваного процесу до потужності шумів спостереження) при значеннях інтервалу кореляції $\tau_{кор} = 1$, що характерно для швидких змін каналу і $\tau_{кор} = 20$, що характерно для повільних змін каналу (рис.7). Нижня крива відповідає апостеріорній дисперсії при інтервалі кореляції $\tau_{кор} = 20$, а верхня крива - при $\tau_{кор} = 1$. Аналіз показав, що точність оцінок зростає зі збільшенням інтервалу кореляції і

У зв'язку з тим, що в LTE відбуваються процеси в територіально розподілених ділянках, проведені дослідження щодо впливу затримки (затримка при передачі від одного елемента до іншого, затримка в чергах і буферних пристроях, затримка при обробці і перетворенні і т.д.) на точність оцінки. Аналіз показав, що зі збільшенням затримок точність оцінки знижується.

Проведено порівняльний аналіз методів оцінки результатів вимірювання при статистично залежних частотних каналах. На рис.8 надано залежності апостеріорної дисперсії помилки оцінки від інтервалу взаємної кореляції для двох каналів.

Верхні криві як для каналу 1, так і для каналу 2 відповідають значенням точності оцінки при незалежному оцінюванні, тобто вважається, що елементи побічної діагоналі матриць F і G дорівнюють нулю. Нижні криві відповідають значенням точності оцінки з урахуванням залежності при оцінюванні, тобто вважається, що елементи побічної діагоналі матриць F і G

дорівнюють $f_{ij} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{korij}}\right)$,

$g_{ij} = \sqrt{\sigma^2 f_{ij}(1-f_{ij})}$ при $i \neq j$. Аналіз показав, що урахування взаємних зв'язків дає вигреш при оцінюванні більше, ніж в 10 разів.

У четвертому розділі вдосконалено підсистему планування кадрів при диспетчеризації ресурсів, яка заснована на алгоритмі SJF.

Важливими проблемами в галузі забезпечення якості обслуговування, розподілу ресурсів і підвищення пропускної здатності є проблеми планування.

На першому етапі роботи планувальника для кожного класу обслуговування, використовується свій алгоритм планування:

- Алгоритм EDF для з'єднань rtPS (обслуговування в реальному часі);
- Алгоритм SFQ для з'єднань nrtPS (обслуговування не в реальному часі);
- Алгоритм FIFO для з'єднань BE (поток негарантованої доставки).

Розглянуто і проаналізовано алгоритми планування для з'єднань BE: алгоритм FIFO, алгоритм RR, алгоритм SJF.

За допомогою імітаційного моделювання проведено машинний експеримент, який полягав у наступному. На вхід буфера черги подавалися

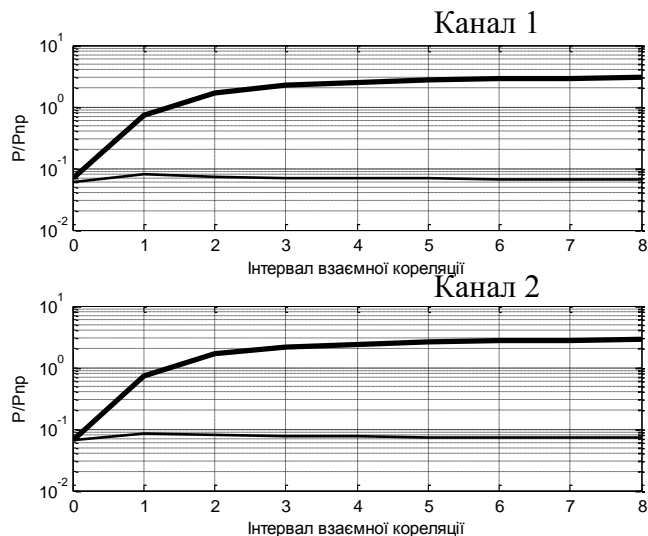


Рис.8. Залежності відносної апостеріорної дисперсії помилки оцінки від інтервалу взаємної кореляції

пакети. Кількість пакетів в черзі $N=8000$. Довжини пакетів генерувалися випадковим чином від 1 до 42 біт. Вид модуляції 64QAM. Розмір буфера черги M в даному випадку був необмежений. Для алгоритму RR виділено квант часу 66,7 мкс.

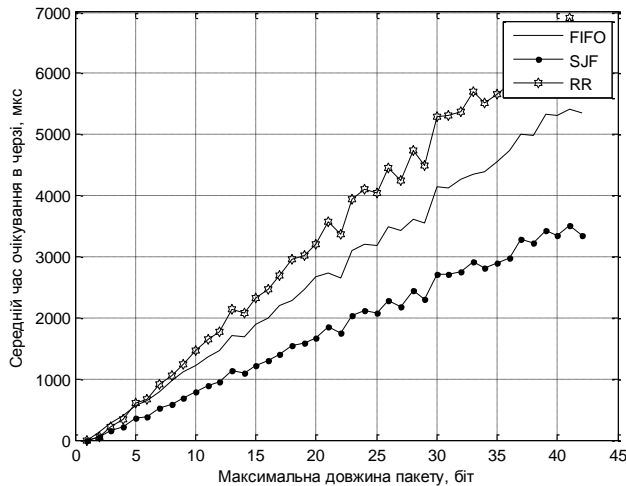


Рис. 9. Залежність середнього часу очікування в черзі від максимальної довжини пакета

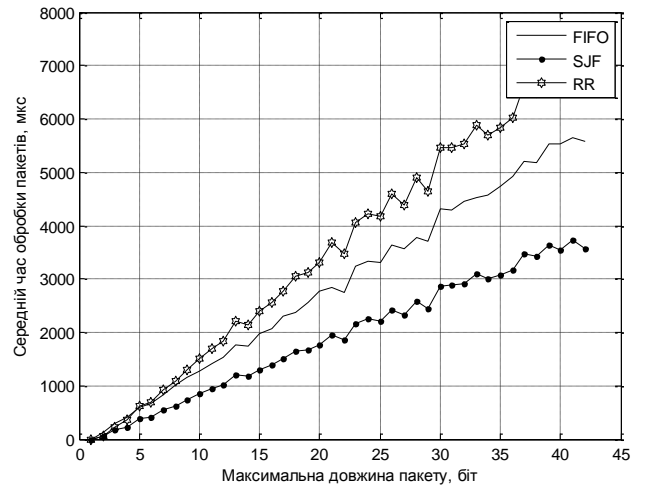


Рис. 10. Залежність середнього часу обробки пакетів від максимальної довжини пакета

Отримано залежності середнього часу очікування в черзі від максимальної довжини пакетів (рис.9). При довжині пакетів 40 біт вигреш алгоритму FIFO щодо RR становить 27%, а алгоритму SJF щодо RR становить 50%.

Отримано залежності часу обробки пакетів від максимальної довжини пакетів (рис.10). За цим показником помітний вигреш дає алгоритм SJF. Щодо RR цей вигреш становить 48%, щодо FIFO - 32%.

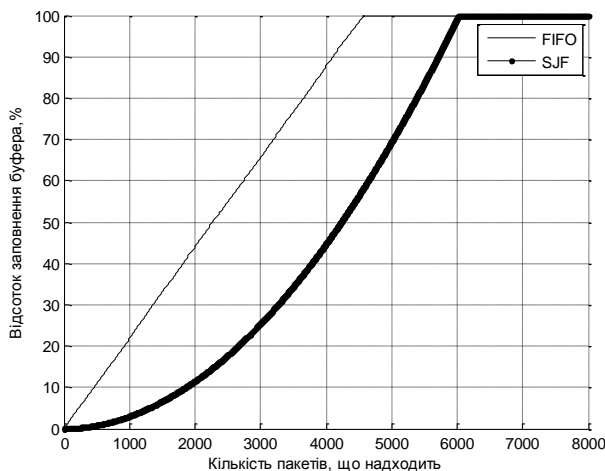


Рис. 11. Залежність відсотка заповнення буфера даними від кількості пакетів, що надходить

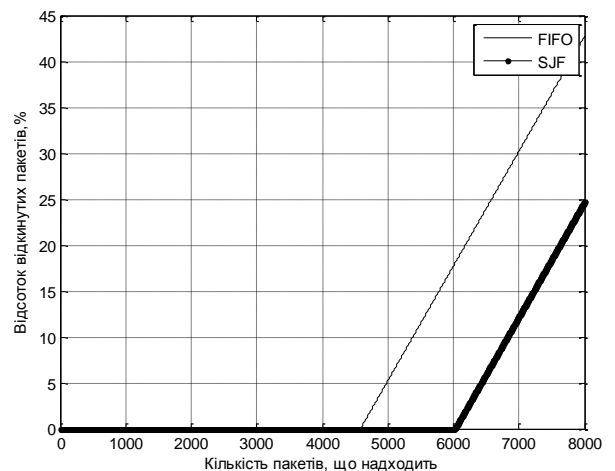


Рис. 12. Залежність відсотка відкинутих пакетів від кількості пакетів, що надходить

Проведено експеримент з обмеженим обсягом буфера черги $M = 150000$ біт. Експеримент полягав у наступному. На вхід буфера черги подавалися пакети. Довжини пакетів генерувалися випадковим чином від 1 до 42 біт. Кількість пакетів в черзі змінювалася від 1 до 8000. Отримано залежність заповнення буфера даними від розміру черги (рис. 11). З даних графіків видно, що заповнення буфера даними для алгоритму FIFO відбувається інтенсивніше, ніж для алгоритму SJF.

Так для алгоритму FIFO буфер повністю заповнений при кількості пакетів, що надходить 4600 а для алгоритму SJF при кількості пакетів 6000. Решта пакетів в даному випадку були відкинуті. Таким чином, при використанні алгоритму SJF з'являється можливість обробити на 17,5% пакетів більше.

Отримано залежність відсотка відкинутих пакетів від кількості пакетів, що надходить (рис.12). Аналіз показав, що за всіма показниками кращі характеристики має алгоритм SJF, який і рекомендується для LTE.

У **п'ятому розділі** з використанням математичної моделі нечіткої логіки удосконалено метод управління просторово-часовим доступом (ПЧД) в мережах LTE.

Загальна структура системи управління ПВД в мережах LTE з використанням математичної моделі нечіткої логіки надана на рис. 13.

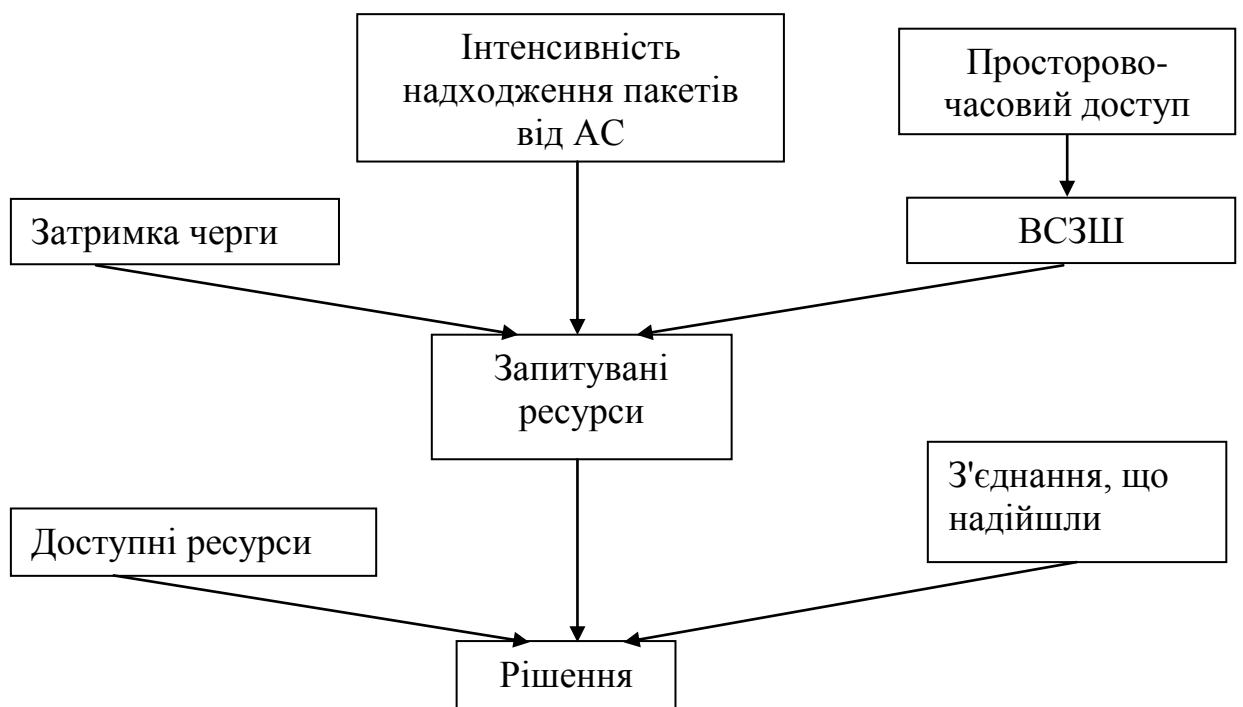


Рис. 13. Схема нечіткого управління доступом

Процес функціонування управління доступом виглядає наступним чином. У разі встановлення зв'язку відповідна АС повідомляє на БС

приблизні параметри джерела трафіку і затримку черги. Потім БС надає ПЧД і вимірює середнє ВСЗШ нового з'єднання і переводить його в значення лінгвістичних змінних. Ці точні значення вхідних змінних перетворюються на значення лінгвістичних змінних за допомогою функцій приналежності (ФП). Запитувані ресурси використовують цю інформацію, щоб отримати число підканалів, які будуть призначено.

На цьому етапі здійснюється перехід від нечітких значень величин запитуваних ресурсів і числа з'єднань, що надійшли до ймовірності з'єднання. На основі цієї ймовірності БС приймає або відкидає нове з'єднання.

У LTE вже використовується множина передавальних і приймальних антен, так звана МІМО технологія, що дозволяє організувати ПЧД без конструктивних змін.

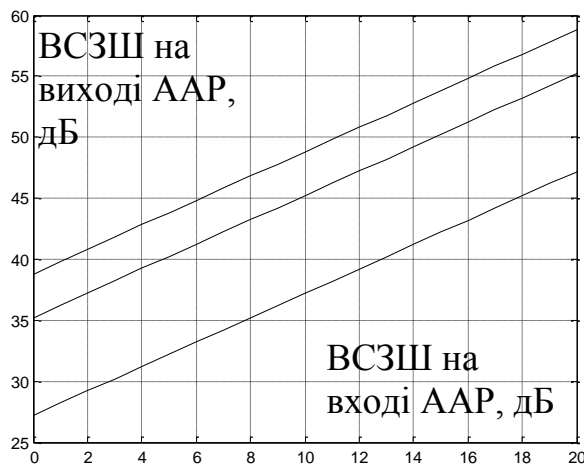


Рис. 14. Графіки залежності ВСЗШ на виході ААР від ВСЗШ на вході ААР

(ААР) від ВСЗШ на вході ААР при різній кількості антенних елементів, $N=2$, $N=4$ та $N=8$. З даних графіків видно, що застосування ПЧД дозволяє підвищити ВСЗШ на 20 - 30 і більше дБ.

У середовищі Matlab модуль Fuzzy Logic дозволяє будувати нечіткі системи двох типів - Мамдані і Сугено. У цьому завданні використаний алгоритм Мамдані.

На рис. 15 надана система нечіткого виведення для формування запитуваних ресурсів.

Вхідними змінними є «інтенсивність», «затримка» і «ВСЗШ». Вихідною змінною є «запитувані ресурси».

Організація зв'язку з ПВД може бути здійснена в три етапи.

1 етап - організація заявки на зв'язок абонентської станції по широкому променю.

2 етап - визначення напрямку приходу сигналу абонента.

3 етап - надання зв'язку абоненту по вузькому променю, що формується відповідно до заявки багатопроменевої антени.

На рис 14 надано графіки залежності ВСЗШ на виході адаптивної антенної решітки

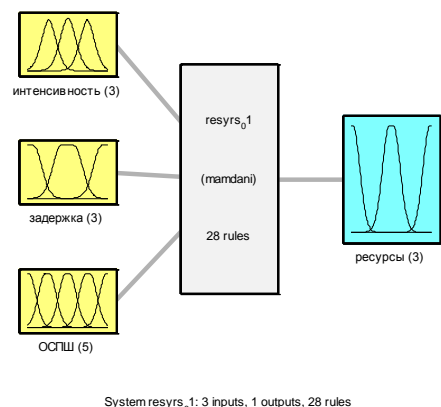


Рис. 15. Система нечіткого виводу для формування запитуваних ресурсів

Для задання ФП встановлюється діапазон зміни і відображення для змінних входів. Для входу інтенсивності задаються три ФП гаусова типу, кожна з яких характеризує вхід, відповідно, як «низька», «середня» і «висока» в діапазоні від 100 до 400.

Для входу затримки задані три ФП гаусова типу, кожна з яких характеризує вхід, відповідно, як «низька», «середня» і «висока» в діапазоні від 0 до 55.

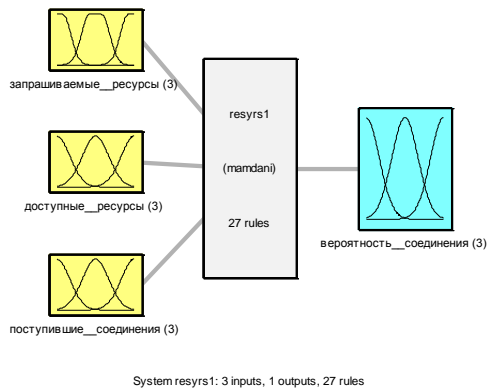


Рис. 16. Система нечіткого виводу для прийняття рішення на надання доступу

Вхідними змінними є «запитувані ресурси», «доступні ресурси» і «з'єднання, що надійшли». Вихідною змінною є «ймовірність з'єднання».

Вхідна змінна «запитувані ресурси» має три ФП гаусова типу, які інтерпретуються як «низькі», «середні» і «високі», які мають діапазон зміни від 1 до 8 підканалів.

Вхідна змінна «доступні ресурси» має три ФП гаусова типу, які інтерпретуються як «низькі», «середні» і «високі», які мають діапазон зміни від 1 до 40 підканалів.

Вхідна змінна «з'єднання, що надійшли» має три ФП гаусова типу, які інтерпретуються як «низькі», «середні» і «високі», які мають діапазон зміни від 0 до 20 підканалів.

Вихідна змінна «ймовірність з'єднання» має три ФП гаусова типу, які інтерпретуються як «відхилити», «прийняти з малою ймовірністю» і «прийняти», які мають діапазон зміни від 0 до 1.

За допомогою розробленої імітаційної моделі проведено аналіз ефективності просторово-часового доступу з використанням математичної моделі нечіткої логіки.

Для входу ВСЗШ задані п'ять ФП гаусова типу, кожна з яких характеризує вхід, відповідно, як «низьке», «нижче середнього», «середнє», «вище середнього» і «високе» в діапазоні від -10 до 40 дБ.

Вихідною змінною є запитувані ресурси. Для виходу задаються три ФП гаусова типу, кожна з яких характеризує вихід, відповідно, як «низькі», «середні» і «високі» в діапазоні від 1 до 8 підканалів.

Створена система нечіткого логічного виводу для прийняття рішення на надання доступу (рис.16).

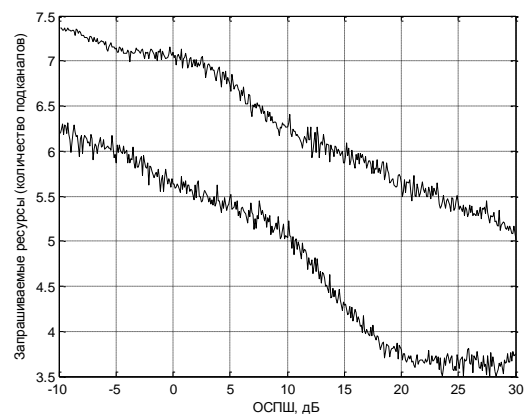


Рис.17. Графіки залежності запитуваних ресурсів від ВСЗШ

На рис. 17. надано графіки залежності запитуваних ресурсів від ВСЗШ. Верхня крива відповідає випадку надання доступу без ПЧД. Нижня крива відповідає випадку надання доступу з ПЧД. З даних графіків видно, що застосування ПЧД дає економію до 1,5 - 2 підканалів.

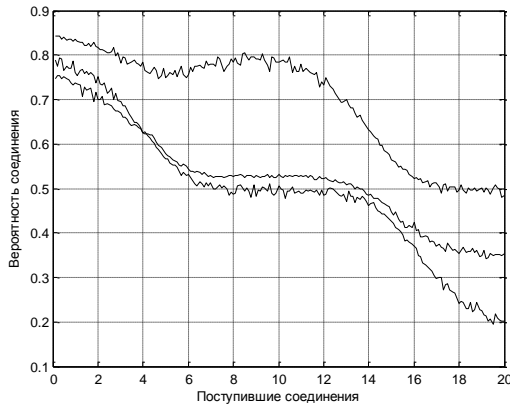


Рис. 18. Графіки залежності ймовірності з'єднання від кількості з'єднань, що надійшли

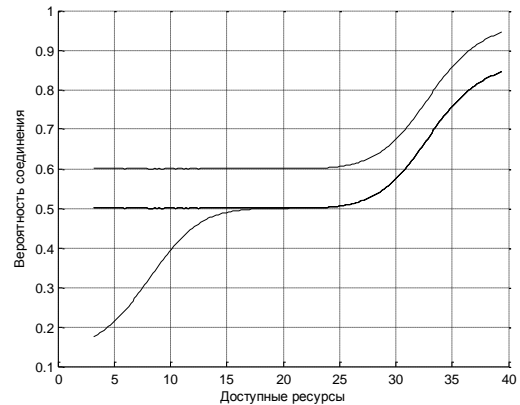


Рис. 19. Графіки залежності ймовірності з'єднання від доступних ресурсів

На рис. 18 надано залежності ймовірності з'єднання від кількості з'єднань, що надійшли. Верхня крива відповідає роботі алгоритму нечіткого виводу з ПЧД. Середня крива відповідає роботі алгоритму нечіткого виводу без ПЧД. Нижня крива відповідає роботі алгоритму, заснованого на аналізі черг. Проведений експеримент свідчить про те, що алгоритм, заснований на аналізі черг, поступається алгоритму нечіткого виводу з ПЧД. Втрати становлять від 7 до 20%.

На рис. 19 надано залежності ймовірності з'єднання від доступних ресурсів. Можливість з'єднання на 10% більше при роботі алгоритму нечіткого виводу з ПЧД по відношенню до роботи алгоритму нечіткого виводу без ПЧД. А алгоритм, заснований на аналізі черг, поступається алгоритму нечіткого виводу з ПЧД на 40% при обмежених доступних ресурсах.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У процесі вирішення поставленої наукової задачі розроблені методи підвищення пропускної здатності базових станцій мережі LTE шляхом раціонального використання ресурсів. При цьому отримані наступні результати:

1. Показано, що пропускна здатність базових станцій є функцією від імовірності помилки, точності оцінювання результатів вимірювання каналів, часу очікування пакета в черзі, часу обробки пакета, ймовірності з'єднання.

2. Проведено аналіз зниження пропускної здатності базових станцій мережі LTE за рахунок завад. Аналіз показав, що втрати в пропускній здатності для користувача на краю стільника можуть досягати до 70%.

3. Проведено аналіз впливу виду модуляції і швидкості кодування інформації на ймовірність помилки. Проведений аналіз показав що, використовуючи відстань між базовою і абонентською станціями і потужності завад, можна адаптивно управляти параметрами ймовірності помилки з метою підвищення пропускної здатності.

4. Проведено статистичний аналіз параметра відношення сигнал / завада + шум (ВСЗШ) висхідного каналу в частотному діапазоні 1920 - 1980 МГц на суміжних частотах 1920000 кГц і 1920180 кГц. Аналіз показав, що процеси є марківськими і статистично залежними. Інтервал взаємної кореляції становить 7,5 часових зсувів. В часі він становить 3,2145 мс.

5. Запропоновано процеси, що відбуваються в каналах апроксимувати у вигляді багатовимірної марковської моделі у вигляді рівнянь стану і рівнянь спостереження. На підставі розрахованих за отриманими вибірками середніх значень процесів, дисперсій і інтервалів кореляцій розроблено двовимірну модель рівнянь стану і рівнянь спостереження.

6. Запропоновано проводити оцінку результатів вимірювання каналів за допомогою багатовимірної процедури Калмана-Бьюсі. Дана процедура на відміну від існуючої процедури, що використовується в LTE, дозволяє оцінювати не середні значення параметрів каналів, а проводити оцінку в реальному масштабі часу і дозволяє враховувати статистичний зв'язок між суміжними каналами.

7. Розроблено структурну схему машинного експерименту, яка складається з моделі спостереження, моделі процедури оцінки і моделі процедури обробки результатів аналізу. Проведено порівняльний аналіз методу оцінки результатів вимірювання з урахуванням статистичної залежності на основі двовимірної моделі і без урахування статистичної залежності на основі одновимірної моделі. Аналіз показав, що урахування взаємних зв'язків дає вигравш більше, ніж в 10 разів при оцінюванні статистично залежних параметрів каналів.

8. Досліджено алгоритми планування, які входять до складу підсистеми забезпечення якості обслуговування в мережах LTE. Проведено дослідження ефективності алгоритмів планування кадру за методом FIFO, SJF і RR. Аналіз показав, що застосування алгоритму SJF при диспетчеризації ресурсів дає вигравш щодо алгоритму FIFO, що використовується в LTE за середнім часом очікування в черзі від 45% до 50%, за середнім часом обробки пакетів до 48%, за відкинутими пакетами до 15%.

9. Синтезовано алгоритм управління просторово-часовим доступом (ПЧД), який засновано на моделі нечіткої логіки. Застосування ПЧД дозволяє підвищити ВСЗШ на 20 - 30 і більше дБ, що дає економію 1,5 - 2 підканалів. Алгоритм ПЧД, який засновано на моделі нечіткої логіки дає вигравш в ймовірності з'єднання на 10% щодо алгоритму, заснованого на аналізі черг, який використовується в LTE. При обмежених доступних ресурсах алгоритм,

заснований на аналізі черг поступається алгоритму нечіткого виведення з ПЧД на 40%.

СПИСОК ОПУБЛІКЛВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Обод І.І. Адаптивна оптимізація швидкості передачі інформації в системах радіодоступу за наявності завад /Обод І.І., Алалі А.М., Фатроні М./ Вісник національного технічного університету «ХПІ». Секція Техніка та електрофізика високих напруг №27(1000) 2013 р. с. 119-124.

2. Коляденко Ю.Ю. Алгоритм управления распределением ресурсов и доступом соединений в сетях LTE/ Коляденко Ю.Ю., Алали А.М./ Проблемы телекоммуникаций. – 2014. – No.1 (13). – С. 35–50. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2014/1/1/141_kolyadenko_LTE.pdf

3. Коляденко Ю.Ю. Метод оценки параметров радиоканалов сети LTE/ Коляденко Ю.Ю., Алали А.М./ Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.2015, vol. 15, no. 2, pp. 32–41 DOI: 10.14529/ctcr150204.

4. Коляденко Ю.Ю. Анализ эффективности алгоритмов планирования передачи кадра в сетях LTE/ Коляденко Ю.Ю., Алали А.М./ Радиоелектроніка, інформатика, управління. ISSN 1607-3274. 2015. № 1 (32) с. 7-14.

5. Коляденко Ю.Ю. Дослідження параметрів радіоканалів мережі LTE/ Коляденко Ю.Ю., Алалі А.М./ Вісник Національного університету "Львівська політехніка" Серія "Радиоелектроніка та телекомунікації" № 818, 2015. с. 195-203.

6. Коляденко Ю.Ю. Пространственно-временной доступ к базовым станциям сети LTE/ Коляденко Ю.Ю., Алали А.М./ Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2015. Вып. 180, с.43-47.

7. Алали А.М. Влияние задержки в канале управления сети LTE/ Алали А.М./ Материалы 18-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» Харьков, 14-16 апреля 2014. с. 9-10.

8. Kolyadenko Y. Intersystem Interference On LTE Network Bandwith Influence Analysis/ Kolyadenko Y. Y., Alali A.M. / INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE «PROBLEMS OF INFOCOMMUNICATIONS. SCIENCE AND TECHNOLOGY» (PICS&T -2014) Volume II, October 14-17, 2014 Kharkov, Ukraine pp. 125-126.

9. Алали А.М. Метод оценки измеряемых параметров состояния каналов сети LTE/ Алали А.М./ Материалы 19-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» Харьков, 20-22 апреля 2015. с. 27-28.

10. Коляденко Ю.Ю. Анализ влияния внутрисистемных помех на пропускную способность сети LTE /Коляденко Ю.Ю., Алалі А.М./ Материалы Первой Международной научно-технической конференции «Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи ЭМС-2015» Харьков, 27 мая 2015 г. с. 90-92.

Анотації

Алали А. Методы повышения пропускной способности базовых станций сети LTE путем рационального использования ресурсов. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Харьков. 2016.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи повышения пропускной способности базовых станций сети LTE.

Анализ показал, что потери в пропускной способности для пользователя на краю соты могут достигать до 70 %. Показано, что пропускная способность базовых станций является функцией от вероятности ошибки, точности оценивания измеряемых параметров каналов, времени ожидания пакета в очереди, времени обработки пакета, вероятности соединения.

Проведен анализ влияния вида модуляции и скорости кодирования информации на вероятность ошибки. Показано что, используя расстояние между базовой и абонентской станциями и мощности помех, можно адаптивно управлять параметрами вероятности ошибки с целью повышения пропускной способности.

Проведен статистический анализ параметра отношения сигнал/помеха+шум (ОСПШ) смежных каналов. Анализ показал, что процессы являются марковскими и статистически зависимыми. Разработана двумерная модель уравнений состояния и уравнений наблюдения.

Предложено производить оценку измеряемых параметров каналов с помощью многомерной процедуры Калмана-Бьюси. Данная процедура производит оценку в реальном масштабе времени и позволяет учитывать статистическую связь между смежными каналами. Анализ показал, что учет взаимных связей дает выигрыш больше, чем в 10 раз при оценивании статистически зависимых параметров каналов.

Исследованы алгоритмы планирования, которые входят в состав подсистемы обеспечения качества обслуживания в сетях LTE. Анализ показал, что применение алгоритма SJF при диспетчеризации ресурсов дает выигрыш относительно используемого в LTE алгоритма FIFO по среднему времени ожидания в очереди от 45% до 50%, по среднему времени обработки пакетов до 48%, по процентному отношению отброшенных пакетов до 15 %.

Синтезирован алгоритм управления пространственно-временным доступом, основанный на модели нечеткой логики. Анализ показал, что по сравнению с существующим алгоритмом, основанным на анализе очередей, предложенный алгоритм позволяет повысить вероятность соединения на 10 – 40 %.

Ключевые слова: сеть LTE, пропускная способность, методы оценивания, алгоритмы планирования, пространственно-временной доступ, модель нечеткой логики.

Алалі А. Методи підвищення пропускної здатності базових станцій мережі LTE шляхом раціонального використання ресурсів. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 - телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків. 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі підвищення пропускної здатності базових станцій мережі LTE.

Проведено аналіз впливу виду модуляції і швидкості кодування інформації на ймовірність помилки. Показано що, використовуючи відстань між базовою і абонентською станціями і потужності завад, можна адаптивно управляти параметрами ймовірності помилки з метою підвищення пропускної здатності.

Запропоновано проводити оцінку результатів вимірювання параметрів каналів за допомогою багатовимірної процедури Калмана-Бьюсі. Дана процедура проводить оцінку в реальному масштабі часу і дозволяє враховувати статистичний зв'язок між суміжними каналами.

Показано, що застосування алгоритму SJF при диспетчеризації ресурсів дає вигоду щодо алгоритму FIFO, який використовується в LTE.

Синтезовано алгоритм управління просторово-часовим доступом, який заснований на моделі нечіткої логіки.

Ключові слова: мережа LTE, пропускна здатність, методи оцінювання, алгоритми планування, просторово-часовий доступ, модель нечіткої логіки.

Alali A. Methods of increasing the capacity of the LTE network base stations through the rational use of resources. - The manuscript. Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.12.02 - Telecommunication Systems and Networks. Kharkov National University of Radio Electronics. Kharkiv. 2016.

The thesis is devoted to solving actual scientific problem of increasing bandwidth LTE network base stations.

The influence of the type of modulation and coding information on the probability of an error rate. It is shown that using the distance between the base and subscriber stations, and interference power, can adaptively control the parameters of the probability of error in order to increase throughput.

It is proposed to assess the measured channel parameters using multivariate procedures Kalman-Bucy. This procedure assesses real-time and takes into account the statistical relationship between adjacent channels.

It is shown that the use of resources when SJF scheduling algorithm gives a gain used in relatively LTE FIFO algorithm.

Synthesized algorithm of spatio-temporal access control based on fuzzy logic model.

Keywords: LTE network, bandwidth, estimation methods, scheduling algorithms, the space-time access, the model of fuzzy logic.