

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

А.В. Лемешко, Л.А. Кирпач, Д.В. Сорокін, І.А. Бученко, М.М. Шрам

ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

Навчальний посібник

Київ – 2021

УДК 004.732

Рецензенти: д.т.н. Макаренко А.О., к.т.н. Голубенко О.І.

*Затверджено вченою радою Навчально-наукового інституту
Інформаційних технологій Державного університету
телекомунікацій (протокол №9 від 28.04.2021 р.)*

Лемешко А.В.

Проектування безпроводових комп'ютерних мереж: навч.
посібник / А.В. Лемешко, Л.А. Кирпач, Д.В. Сорокін, І.А. Бученко,
М.М. Шрам. — К. : ДУТ, 2021. — 147 с.

Містить теоретичні та практичні відомості з методів проектування
безпроводових комп'ютерних мереж.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11	9
1.1. Безпроводові комп'ютерні мережі стандарту IEEE 802.11	9
1.2. Проблеми електромагнітної сумісності і методи їх вирішення	17
<i>Контрольні запитання</i>	43
РОЗДІЛ 2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ В БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ IEEE 802.11	45
2.1. Оцінка електромагнітної сумісності при проектуванні безпроводових комп'ютерних мереж стандарту IEEE 802.11	46
2.2. Технічні вимоги до обладнання Wireless Local Area Network	56
2.3. Механізм резервування середовища передачі	68
<i>Контрольні запитання</i>	81
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ З ВРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ	83
3.1. Визначення базових характеристик Wireless Local Area Network	83
3.2. Види внутрішньосистемних перешкод в мережах стандарту IEEE 802.11	101
3.3. Взаємний вплив параметрів і вибір режимів роботи безпроводової комп'ютерної мережі стандарту IEEE 802.11	121
3.4. Критерії міжсистемної електромагнітної сумісності	130
3.5. Реалізація безпроводової мережі	134
<i>Контрольні запитання</i>	136
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	138

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ITU (International Telecommunication Union) - Міжнародний Союз Електрозв'язку;

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - інститут інженерів з електротехніки і електроніки;

BSS (Basic Service Sets) - базові зони обслуговування;

СКК (Complementary Code Keying) - кодування з використанням комплементарних кодів;

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) - множинний доступ з контролем несучої та запобіганням колізій;

DCF (Distributed Coordination Function) - розподілена функція координації;

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) - технології розширення спектру методом прямої послідовності;

EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) - ефективна ізотропно-випромінювана потужність;

ESS (Extended Service Sets) - розширені зони обслуговування;

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) - технології розширення спектру шляхом стрибкоподібної перебудови частоти;

IBSS (Independent Basic Service Sets) - незалежні базові зони обслуговування;

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) - ортогональне частотне мультиплексування;

PBCC (Packet Binary Convolutional Coding) - технологія довільного пакетного сверточного кодування;

PCF (Point Coordination Function) - точкова функція координації;

QoS (Quality of Service) - якість обслуговування;

RTS/CTS (Request-to-Send/Clear-to-Send) - резервування середовища передачі за допомогою механізму “готовність до передачі/готовність до прийому”;

SSID (service set identifier) - ідентифікатор зони обслуговування;

WLAN (Wireless LAN) - безпроводова локальна мережа;

AP (Access Point) - точка доступу;

ДС - діаграма спрямованості антени;

ЕМО - електромагнітна обстановка;

ЕМП - електромагнітна перешкода;

ЕМС - електромагнітна сумісність;

КП - коефіцієнт підсилення;

МС - мобільна станція;

РЕЗ - радіоелектронний засіб.

ВСТУП

Подібно стільниковим технологіям, безпроводові локальні мережі стандарту IEEE 802.11 розвиваються, щоб йти в ногу зі швидкими змінами і новими потребами користувачів, з якими стикається телекомунікаційна галузь. Експоненціальне зростання трафіку мобільних даних, кількість пристроїв, підключених до Інтернету, електромагнітні завади, нові сценарії використання і вимоги користувачів є основними проблемами для Wi-Fi-мереж [1]. Перевантаження причине надмірним трафіком негативно впливають на ефективність роботи Wi-Fi-мереж.

Безпроводові локальні мережі (Wi-Fi) задовольняють вимогам, що ставляться до безпроводових з'єднань для реалізації зв'язку в будівлях і офісах. Сьогодні в світі близько 15 мільярдів пристроїв підключається до Wi-Fi. Зростаючий обсяг трафіку - виклик для безпроводових мереж майбутнього.

На сьогоднішній день незліченна кількість програм докорінно змінила наше уявлення та використання технологій у нашому повсякденному житті. Wi-Fi - одне з найуспішніших винаходів на сьогоднішній день і визнане на міжнародному рівні як значний крок в галузі телекомунікацій [2].

Одним з рушіїв впровадження Wi-Fi для в внутрішньо-офісних мереж, стало те, що обладнанню яке працює в цих стандартах, не потрібно отримання ліцензії. Перевагами безпроводових комп'ютерних мереж стандартів IEEE 802.11 є їх відносно висока швидкість обміну інформаційними даними, легкий і низький час побудови мережі, можливості цілодобового доступу користувачів мережі, низька вартість і різноманітність обладнання. Через значну кількість переваг, безпроводові мережі широко використовуються у створенні (WLAN, Wireless Local Area Network) в будинках, для громадських Hot-Spot мереж, для надання послуг корпоративним користувачам.

Не дивлячись на впровадження значної кількості нових і вдосконалених технологій Wi-Fi залишається вразливим до електромагнітних завад.

Широке розповсюдження (WLAN, Wireless Local Area Network) призводить до збільшення кількості джерел перешкод в діапазоні 2,4 ГГц та 5 ГГц. Різні пристрої створюють більше шкідливого випромінювання в цій області: пристрої Bluetooth, мікрохвильові печі, інші безпроводові мережі. Складне електромагнітне середовище підвищує вимоги до (ЕМС, електромагнітної сумісності) та потребує врахування цих умов при проектуванні безпроводових мереж.

Ще однією серйозною проблемою безпроводових комп'ютерних мереж є внутрішньосистемна (ЕМС, електромагнітна сумісність). Якщо в безпроводовій мережі є два або більше стільники, виникають внутрішньосистемні перешкоди. Їхній рівень різко зростає з більш ніж трьома стільниками. Це пояснюється тим, що в неліцензованому діапазоні частот, що використовується обладнанням стандартів IEEE 802.11, можуть бути розміщені лише три частотні канали, що не перекриваються. Тому необхідно використовувати один частотний канал одночасно в декількох стільниках.

Для зменшення негативного впливу електромагнітних завад на ефективність роботи (WLAN, Wireless Local Area Network) застосовуються організаційні та технічні заходи. Вони включають раціональний розподіл робочих частот у поєднанні з введенням частотних, регіональних, часових обмежень для радіоелектронних пристроїв. Ці заходи зменшують рівень сигнал/завада в мережі і запобігають втратам пакетів в WI-FI мережах. Але цього не достатньо. Тому частково зменшити негативний вплив електромагнітних завад на ефективну роботу WI-FI мережі намагаються на етапі проектування. Так існуючі підходи до проектування безпроводових комп'ютерних мереж використовують математичні моделі визначення зони покриття з урахуванням впливу місцевості, на якій встановлена безпроводова мережа. Нажаль існуючі моделі не враховують завади, що виникають під час

роботи сусідніх приймачів, що входять до (WLAN, Wireless Local Area Network).

Електромагнітні завади, суттєво погіршують ефективність роботи (WLAN, Wireless Local Area Network). Підвищення рівня сигнал/завада, в працюючій мережі призводить до надмірної втрати пакетів з інформацією, що передаються мережою WI-FI. Стандарт IEEE 802.11 дозволяє втрати пакетів не більше 10 % від загальної кількості пакетів. Саме при такому рівні втрат пакетів виробники обладнання гарантують якість сервісів, що надається через WI-FI мережу.

Даний навчальний посібник, матеріал якого спрямований на покращення ефективності функціонування WLAN (Wireless Local Area Network), за рахунок зниження рівнів внутрішньосистемних та міжсистемних завад ще на етапі проектування є доцільним до використання в навчальному процесі зі спеціальності Комп'ютерна інженерія.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

Безпроводові локальні мережі стандарту IEEE 802.11 набувають все більшого поширення. Це відбувається в першу чергу через те, що вони прості в розгортанні, відносно дешеві і зручні у використанні. Завдяки цим якостям, кількість WLAN постійно збільшується. При постійно зростаючій щільності радіомереж все більш актуальними стають проблеми, пов'язані з ЕМС.

У цьому розділі проаналізовано області застосування, технології і принципи роботи безпроводових комп'ютерних мереж. Показано проблеми, які доводиться вирішувати при проектуванні WLAN. Проаналізовано методи, використовувані для вирішення проблем ЕМС в безпроводових комп'ютерних мережах.

1.1. Безпроводові комп'ютерні мережі стандарту IEEE 802.11

Існує три основних організації стандартизації, що впливають на розвиток WLAN, це Wi-Fi Alliance, IEEE і ETSI.

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) - це некомерційне професійне об'єднання, яке, крім іншого, формує міжнародні стандарти, такі як стандарт IEEE 802.11 на безпроводові LAN [2].

Об'єднання Wi-Fi Alliance сертифікує пристрої WLAN, вироблені відповідно до розроблених IEEE специфікацій, на предмет сумісності. Аналогічно IEEE, Wi-Fi Alliance - некомерційна міжнародна організація торгівлі, створена постачальниками і виробниками [3].

Європейський інститут стандартів з телекомунікацій (ETSI) - ще одна некомерційна організація, створена у 1988 році для розробки стандартів з телекомунікацій для Європи. Що стосується WLAN стандарту IEEE 802.11, то

ETSI допоміг об'єднати європейські країни навколо загального набору документів, що регулюють передачу [4].

Механізми роботи і вимоги до пристроїв для безпроводової передачі даних описуються стандартом IEEE 802.11, а також його більш пізнішими розширеннями - IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g. Стандарт регламентує діапазони частот, швидкості передачі, методи кодування інформації та інші технологічні характеристики роботи мережі. Головною відмінністю розширень стандартів a, b и g є фізичний рівень. Основне призначення фізичних рівнів стандарту IEEE 802.11- забезпечити механізми безпроводової передачі для підрівня MAC, а також підтримувати виконання вторинних функцій, таких як оцінка стану безпроводового середовища передачі і повідомлення про нього підрівню MAC. Набір стандартів IEEE 802.11 визначає цілий ряд технологій реалізації фізичного рівня, які можуть бути використані підрівнем IEEE 802.11 MAC [5 -7].

Також інститут IEEE веде роботу над створенням нових специфікацій протоколу зв'язку в безпроводових комп'ютерних мережах (WLAN). За рахунок використання одночасно декількох частотних каналів пристрої стандартів IEEE 802.11n, ac, ah працюють в кілька разів швидше (від 11 Гбіт/с), ніж обладнання стандартів g і a. У роботі ці стандарти не розглядається.

Базовий стандарт IEEE 802.11

Базовий стандарт [2], розроблений в 1997 році, визначає протоколи, необхідні для організації безпроводових комп'ютерних мереж (WLAN). Він визначає протокол управління доступом до середовища передачі (MAC Medium Access Control) і три протоколи фізичного рівня для передачі сигналів у фізичному середовищі, що відповідають різним технологіям передачі сигналів:

- По радіоканалах у діапазоні 2,4 ГГц за допомогою технології розширення спектру методом прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS, [5]).

- По радіоканалах у діапазоні 2,4 ГГц за допомогою технології розширення спектру шляхом стрибкоподібної перебудови частоти (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS, [2]).

- За допомогою інфрачервоного випромінювання.

З перерахованих технологій для дослідження побудови безпроводових комп'ютерних мереж буде використовуватись тільки технологія DSSS, яка і розглянута в роботі.

Залежно від використовуваного методу модуляції швидкість передачі становить 1 Мбіт/с (двійкова відносна фазова маніпуляція - differential binary phase shift keying, DBPSK) і 2 Мбіт/с (квадратурна фазова маніпуляція - quadrature phase shift key, QPSK). Стандарт визначає 14 частотних каналів, з яких 3 - неперекриваються, ширина кожного каналу - 22 МГц [1, 6 - 9].

Технології стандарту IEEE 802.11b

Стандарт IEEE 802.11b [5], що з'явився в 1999 році, регламентував правила використання високошвидкісної технології DSSS (high-rate direct sequence spread spectrum, HR-DSSS). Він використовує ISM-діапазоі 2,4 ГГц і визначає швидкості передачі 5,5 і 11 Мбіт/с. В технології HR-DSSS використовується та ж схема організації каналів, що і в технології DSSS, - смуга частот шириною 22 МГц, 14 каналів, з них 3 неперекриваються [5, 10, 11].

Фізичний рівень DSSS стандарту IEEE 802.11b сумісний з існуючими WLAN стандарту IEEE 802.11. При цьому застосовується кодування з використанням комплементарних кодів (complementary code keying, ССК) або двійкового пакетного згорткового кодування (packet binary convolutional coding, PBCC). При цьому дані передаються з використанням модуляції ССК або PBCC (5,5 або 11 Мбіт/с), а заголовки з використанням DSSS (1 Мбіт/с) [5].

Технології стандарту IEEE 802.11a

Опублікований в 1999 році, стандарт [10] передбачає швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. Це найбільш широкосмуговий стандарт з сімейства стандартів IEEE 802.11. Стандартами IEEE 802.11a забезпечена робота в діапазонах U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) 5,15-5,25 ГГц, 5,25-5,35 ГГц і 5,725-5,825 ГГц [11]. Обладнання, що працює в частотному діапазоні 5,725-5,825 ГГц, не підкоряється вимогам стандарту і, в основному, застосовується для побудови розподілених безпроводових мереж. Стандарт IEEE 802.11a регламентує використання каналів шириною 20 МГц і визначає по чотири канали для кожного з трьох діапазонів. В якості методу модуляції сигналу обрано ортогональне частотне мультиплексування (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM [6, 7]). На відміну від технологій DSSS і FHSS, метод OFDM передбачає передачу корисного сигналу одночасно за кількома частотам діапазону. В результаті підвищується пропускна здатність каналу і якість сигналу. Стандартом визначено три обов'язкові швидкості - 6, 12 і 24 Мбіт/с та п'ять необов'язкових - 9, 18, 36, 48 і 54 Мбіт/с [11].

До недоліків IEEE 802.11a відносяться: велика споживана потужність радіопередавачів для частот 5 ГГц а також менший радіус дії. Крім того, пристрої для IEEE 802.11a дорожче.

Технології стандарту IEEE 802.11g

IEEE 802.11g - стандарт [12], що описує роботу WLAN в неліцензованому частотному діапазоні 2,4 ГГц. Максимальна швидкість передачі даних в безпроводових мережах IEEE 802.11g може становити до 54 Мбіт/с. У стандарті обов'язковими є швидкості передачі 1; 2; 5,5; 6; 11; 12 і 24 Мбіт/с, а швидкість передачі 9; 18; 36; 48 і 54 Мбіт/с – опціонально [6, 8, 13].

Стандарт IEEE 802.11g являє собою розвиток IEEE 802.11b і сумісний з ним. У числі переваг IEEE 802.11g треба відзначити низьку споживану потужність, радіус дії і високу проникаючу здатність сигналу, меншу вартість обладнання (в порівнянні з IEEE 802.11a), оскільки низькочастотні пристрої

простіше у виготовленні. Специфікація IEEE 802.11g повністю включає в себе IEEE 802.11b, допускаючи застосування як схеми DSSS, так і OFDM-модуляції [6, 7].

При розробці стандарту IEEE 802.11g розглядалися дві конкуруючі технології: метод ортогонального частотного мультиплексування OFDM, запозичений зі стандарту IEEE 802.11a, запропонований до розгляду компанією Intersil, та метод двійкового пакетного згорткового кодування PBCC, опціонально реалізований в стандарті IEEE 802.11b і запропонований компанією Texas Instruments. В результаті стандарт IEEE 802.11g містить компромісне рішення: в якості базових застосовуються технології OFDM і CCK, а опціонально передбачено використання технології PBCC [14].

Якщо в локальній мережі використовуються лише пристрої стандарту IEEE 802.11g, передача здійснюється з максимально можливою швидкістю. Однак, якщо в неї вводяться пристрої стандарту IEEE 802.11b, інформація заголовків повинна передаватися зі швидкостями стандарту IEEE 802.11b, щоб їх могли приймати пристрої цього стандарту (рис. 1.1). Таке зниження швидкості повинно виконуватися при всіх передачах, незалежно від того, відбуваються вони між пристроями стандарту IEEE 802.11g або IEEE 802.11b [5, 12].

Технологія кодування PBCC може використовуватися на швидкостях 5,5, 11, 22 і 33 Мбіт/с, з яких швидкості 5,5 і 11 Мбіт/с є обов'язковими, а 22 і 33 Мбіт/с – опціональними.

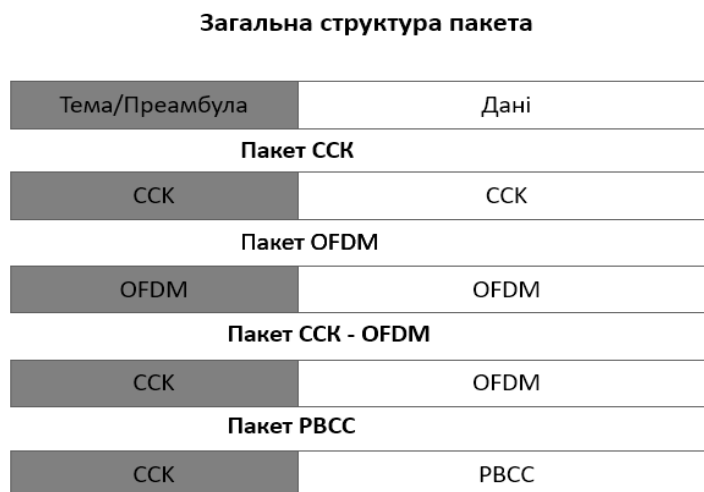


Рис. 1.1. Формати фреймів при використанні різного кодування

Топології WLAN

В основу мереж стандарту IEEE 802.11 покладена стільникова архітектура. Мережа може складатися з однієї або декількох осередків (стільників). Кожен стільник управляється базовою станцією, яка називається точкою доступу (Access Point, AP). Точки доступу багатостільникової мережі взаємодіють між собою через розподільну систему (Distribution System, DS), що є еквівалентом магістрального сегменту кабельних ліній. Вся інфраструктура, що включає точки доступу і розподільну систему, утворює розширену зону обслуговування (Extended Service Set) [8, 9].

Стандартом передбачений також одностільниковий варіант безпроводової мережі, який може бути реалізований і без точки доступу (IBSS). При цьому частина її функцій виконується безпосередньо робочими станціями.

Мережі стандарту IEEE 802.11 використовують три види топологій [5 - 7, 11]:

- незалежні базові зони обслуговування (independent basic service sets, IBSS) - точка доступу в такій мережі відсутня;
- базові зони обслуговування (basic service sets, BSS) - використовується одна точка доступу, підключена до розподільчої системи;

- розширені зони обслуговування (extended service sets, ESS) - точки доступу з'єднані через розподільну систему.

Зона обслуговування (service set) - це логічно згруповані пристрої. Приймаюча станція може отримувати сигнали на декількох частотних каналах. Передавальна станція спочатку передає ідентифікатор зони обслуговування (service set identifier, SSID). Станція-приймач використовує SSID для фільтрації одержуваних сигналів і виділення того, який їй потрібен.

Області застосування WLAN

Безпроводові мережі в приміщеннях

У приміщеннях WLAN розгортаються, якщо необхідно забезпечити мобільність користувачів всередині будівлі, для тимчасових мереж (наприклад, на виставках і конференціях), якщо прокласти кабельну мережу в будинку складно, дорого або неможливо. Безпроводові локальні мережі також використовуються, якщо мережа необхідно ввести в експлуатацію за відносно невеликий час. WLAN дають можливість співробітникам мати постійний доступ до інформаційних ресурсів компанії, навіть якщо вони знаходяться не на робочому місці. В першу чергу, це необхідно керівництву компанії, що часто проводить наради, переговори. Крім керівництва, безпроводове підключення зручно для співробітників, що часто бувають у відрядженнях або не мають постійного робочого місця (зазвичай такі співробітники мають ноутбуки) [6 -10, 15, 16].

Для великих компаній наявність безпроводового сегмента мережі - це ще й іміджевий хід. Будь-який гість, який приїхав до них, зможе швидко підключитися до Інтернету або корпоративної мережі.

Наявність безпроводової мережі в магазині або на складі дозволяє оперативно відслідковувати рух і кількість товарів, своєчасно поповнювати запаси і вести статистику. Безпроводові зчитувачі штрих-кодів дозволяють швидко врахувати товар і відразу відправити інформацію в базу даних.

Підключення POS-терміналів до локальної мережі магазину дає можливість керівнику враховувати і контролювати роботу всього магазину в режимі реального часу.

Розрахунок безпроводових мереж всередині будівель значно ускладнений через важко передбачуване загасання сигналу при проходженні через стіни і перекриття, багаторазових відбиттів. Технології, які використовуються в таких мережах, повинні бути добре пристосовані до багатопроменевого прийому. Потужності передавачів, антени і їх місце розташування слід вибирати таким чином, щоб сигнал проходив через перегородки всередині будівлі, але не проникав за зовнішні стіни. Тобто не створював перешкоди іншим безпроводовим системам. Частоти слід розподіляти таким чином, щоб зменшити або зовсім виключити системні перешкоди, які створюють один одному вузли безпроводової мережі. Також, потрібно звернути увагу на пристрої, які потенційно є джерелами електромагнітних завад (мікрохвильові печі, відеокамери тощо) [17, 18].

WLAN в громадських місцях (Hot-Spot)

Такі мережі зараз є у багатьох громадських місцях, - на вокзалах, в залах очікування аеропортів, готелях, ресторанах і кафе. З їх допомогою користувачам надаються інформаційні послуги такі, як доступ до мережі Інтернет, меню і т.д.

До проблем, які притаманні безпроводовим мережам в приміщеннях, додається набагато складніша ЕМО (наприклад, в аеропортах, де діє велика кількість різних радіосистем).

Організація безпроводового з'єднання між кількома будинками

За допомогою безпроводових технологій можна організувати єдиний інформаційний простір, об'єднавши мережі (в тому числі і телефонні), розташовані на території одного підприємства, але в різних будівлях. Таке

завдання вирішується шляхом встановлення радіомостів або радіомаршрутизаторів і спрямованих антен.

В цьому випадку слід ретельно підбирати потужності, частоти, антени та місце розташування передавачів, для виключення взаємних перешкод з безпроводовими системами, що розташовуються на сусідніх територіях, які не належать підприємству [17 - 19].

Корпоративні мережі на обмеженій території

Особливістю таких мереж є те, що всі з'єднані об'єкти знаходяться на території однієї організації, і сполучаються між об'єктами де немає будівель, що належать іншим власникам. Прикладами можуть служити мережа університетського містечка або територія заводу, в цехах якого організована безпроводова мережа.

Бездротову локальну мережу такого типу краще розбивати на сегменти, стільники. Один стільник - один радіоканал, яким користуються кілька станцій, що мають до нього доступ. Території сусідніх стільників частково перекриваються, тому сусідні стільники повинні працювати на різних частотах. У таких мережах також слід уважно поставитися до можливого виникнення взаємних перешкод з безпроводовими системами, що розташовуються на сусідніх територіях, які не належать підприємству [5 - 7, 11, 12, 17].

1.2. Проблеми електромагнітної сумісності і методи їх вирішення

В цьому підрозділі формуються основні проблеми ЕМС, з якими доводиться стикатися в безпроводових комп'ютерних мережах, і описуються методи вирішення цих проблем.

Проблеми ЕМС, існуючі у WLAN

Вбудовані механізми WLAN забезпечують ефективну одночасну роботу невеликої кількості комп'ютерів всередині одного стільника. Вони не дозволяють виділити гарантовану смугу пропускання для кожного

користувача. З ростом щільності абонентів збільшуються взаємні перешкоди, підвищується число колізій і повторно переданих пакетів, зростає час доступу до мережі і затримки при передачі інформації. Тобто проблема підвищення ефективності доступу стає все більш актуальною [7, 9 - 11, 13, 16].

Проблема прихованого вузла

У безпроводових мережах можлива наступна ситуація: дві станції (А і В) знаходяться поза зоною видимості одна від одної. Станція С може взаємодіяти з обома станціями (А і В). Станція А передає інформацію на станцію С. Станція В «не бачить», що середовище передачі зайняте, тому що станція А знаходиться для неї поза зоною досяжності, і, вважаючи що середовище передачі вільне, починає передавати інформацію. В результаті на станцію С приходять одночасно два сигналу від станції А і В, тобто відбувається колізія. Ця ситуація відома як проблема прихованого вузла [18 - 21].

Взаємні перешкоди між сусідніми стільниками (внутрішньосистемна ЕМС)

У мережах стандартів IEEE 802.11b і g є тільки три канали, що не перекриваються. Якщо мережа складається з 1-3 стільників, то рівень внутрішньосистемних перешкод відносно невеликий. У безпроводовій мережі, що складається з чотирьох і більше стільників, МС і АР сусідніх стільників, які працюють на частотних каналах, що перекриваються, створюються значні взаємні перешкоди. Це призводить до погіршення якості зв'язку, зменшення пропускної здатності і збільшення часу доступу до мережі, аж до її повної непрацездатності [5, 10 - 12].

Міжсистемна ЕМС

Необхідно враховувати взаємні перешкоди з різними радіопристроями, що працюють на тій же території (мікрохвильові печі, інші безпроводові мережі, пристрої Bluetooth). Залежно від інтенсивності випромінювання, цей

вплив може призвести до значного погіршення зв'язку або повно непрацездатності мережі [7, 22, 23].

Забезпечення QoS для відповідальних додатків

Механізми QoS стандарту IEEE 802.11e забезпечують захист чутливого до затримок трафіку (голос, відео), від трафіку інших додатків, що використовують безпроводове середовище передачі, но вони не рятують від змін в середовищі передачі даних. Збільшення кількості користувачів мережі, наявність зовнішніх і внутрішньосистемних перешкод призводять до неконтрольованого зростання числа колізій і повторно переданих пакетів. Це, в свою чергу, призводить до збільшення часу доступу до мережі, зменшення доступної смуги пропускання. Як наслідок, ефективність механізмів QoS знижується або їх робота повністю блокується [8, 9, 13, 15, 24].

Вплив особливостей місцевості

Рельєф, фізичні перешкоди на місцевості (трасі поширення) впливають на поширення радіохвиль, а, отже, і на якість сигналу. Це можуть бути дерева, будинки, стіни будинків, двері, автомобілі, книжкові полиці, предмети дизайну (особливо металеві елементи), і т.д.

Погода також впливає на поширення радіохвиль. Зазвичай опади позначаються на частотах вище 5 ГГц, але, можуть бути ситуації, коли їх вплив досить сильний і на частотах вище 400 МГц (наприклад, мокре листя дерев у парку). Ця проблема актуально для вуличних безпроводових мереж і її необхідно враховувати ще на стадії проектування WLAN [18, 26, 27].

Існуючі методи вирішення проблем ЕМС і їх недоліки

Проблеми ЕМС (внутрішньосистемної і межсистемної) вирішуються при проектуванні обладнання безпроводової мережі (наприклад використовуються різні способи кодування, що підвищують стійкість) і при проектуванні безпосередньо самої безпроводової мережі. При цьому можливості, закладені в технічні засоби, визначають можливості проектувальника мережі [7, 14, 20, 21, 28].

Механізми доступу до середовища передачі

Механізми доступу до середовища передачі, що існують в мережах IEEE 802.11, показані на рис. 1.2. WLAN використовують механізм, який називається “множинний доступ з контролем несучої та запобігання колізій” (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA). CSMA/CA являє собою механізм “прослуховування перед передачею” (listen before talk, LBT). Передавальна станція перевіряє, чи присутній в середовищі сигнал несучої і, перш ніж почати передачу, чекає її звільнення [7, 11, 17, 28].



Рис. 1.2. Механізми доступу до середовища передачі в мережах IEEE 802.11

Запобігання колізій є ключовим моментом для безпроводових мереж, оскільки останні не мають наявного механізму для їх виявлення. При використанні технології CSMA/CA колізія виявляється тільки при неотриманні передавальною станцією очікуваного підтвердження [11, 12, 25].

Компоненти механізму CSMA/CA

IEEE 802.11 - це асинхронна технологія, заснована на методах довільного доступу для надання Інтернет-з'єднання по безпроводовому середовищу. Вона використовує протокол множинного доступу з контролем несучої і запобіганням конфліктів (CSMA/CA), який має на увазі, що кожен вузол виявляє канал до передачі. Якщо енергія, виміряна на каналі, перевищує порогове значення для оцінки чистоти каналу, то канал визначається як занят, і передача відкладається. В іншому випадку канал оголошується як вільним, і вузол переходить до передачі кадру [6, 9, 12, 18, 29].

Компоненти механізму CSMA/CA:

- контроль несучої;
- розподілена функція координації (distributed coordination function, DCF);
- фрейми підтвердження;
- резервування середовища передачі за допомогою механізму "готовність до передачі/готовність до прийому" (Request-to-Send / Clear-to-Send, RTS / CTS) [30].

Крім того, два інших механізму характерні для доступу до середовища передачі за стандартом IEEE 802.11, але не пов'язані безпосередньо з технологією CSMA/CA:

- фрагментація фреймів;
- точкова функція координації (point coordination function, PCF).

Станція, яка має намір здійснити передачу в проводовому середовищі, повинна спочатку перевірити, чи використовується несуча [11]. Якщо несуча зайнята, то передача відкладається до моменту звільнення середовища. Станція визначає стан середовища за допомогою двох методів.

- Перевірка фізичного рівня на наявність несучої.
- Використання віртуальної функції контролю несучої, вектора розподілу мережі (network allocation vector, NAV).

Станція може перевірити фізичний рівень і переконатися в тому, що несуча вільна. Але, в деяких випадках, середовище передачі може бути все ще зайняте іншою станцією через вектор розподілу мережі. Це таймер, значення якого оновлюється даними фреймів, що передаються через середовище передачі. Станція оновлює значення вектора розподілу мережі тільки тоді, коли отримане значення поля тривалості перевищує збережене в її векторі розподілу мережі [11, 12, 25].

Затверджений IEEE механізм доступу до середовища передачі для мереж стандарту IEEE 802.11- це розподілена функція координації (DCF), механізм доступу до середовища передачі, заснований на методі CSMA/CA.

При роботі з використанням DCF станція, яка має намір передати фрейм, повинна почекати певний час після того, як середовище звільниться. Цей інтервал часу називається міжфреймовий зазор DCF (DCF interframe space, DIFS). Після закінчення інтервалу часу DIFS станція може взяти участь в змаганні за право доступу до середовища передачі. Існує велика ймовірність того, що кілька станцій одночасно спробують почати передачу негайно після звільнення середовища, що призведе до виникнення колізії. Щоб уникнути цієї ситуації, DCF використовує таймер випадкової затримки (random backoff timer).

Специфікація IEEE 802.11 вимагає, щоб приймаюча станція передала станції-відправнику фрейм підтвердження. Якщо передавальна станція не отримує фрейм підтвердження, вона вважає, що в середовищі передачі відбулася колізія. Передавальна станція оновлює значення свого лічильника числа спроб, подвоює ширину вікна конкуренції і починає процес доступу до середовища передачі спочатку [11, 12, 25]. На рис. 1.3 представлений алгоритм отримання доступу до середовища передачі з використанням DCF [5, 10, 12, 28 - 31].

У безпроводових мережах стандарту IEEE 802.11 проблема прихованого вузла вирішується за допомогою спеціального керуючого фрейму, який

називається фрейм RTS (фрейм готовності до передачі). Фрейм RTS, що містить час, необхідний для обміну фреймами, надсилається до точки доступу.

Точка доступу отримує фрейм RTS від станції і відповідає керуючим фреймом CTS (фреймом готовності до прийому). Останній також містить поле тривалості, значення якого досить для того, щоб передавальна станція могла завершити обмін фреймами. Обмін фреймами включає той фрейм, який станція має намір передати, а також очікуваний нею фрейм підтвердження. Всі станції, що знаходяться в зоні дії точки доступу отримують фрейм CTS і оновлюють значення своїх NAV (векторів розподілу мережі) [31, 32].

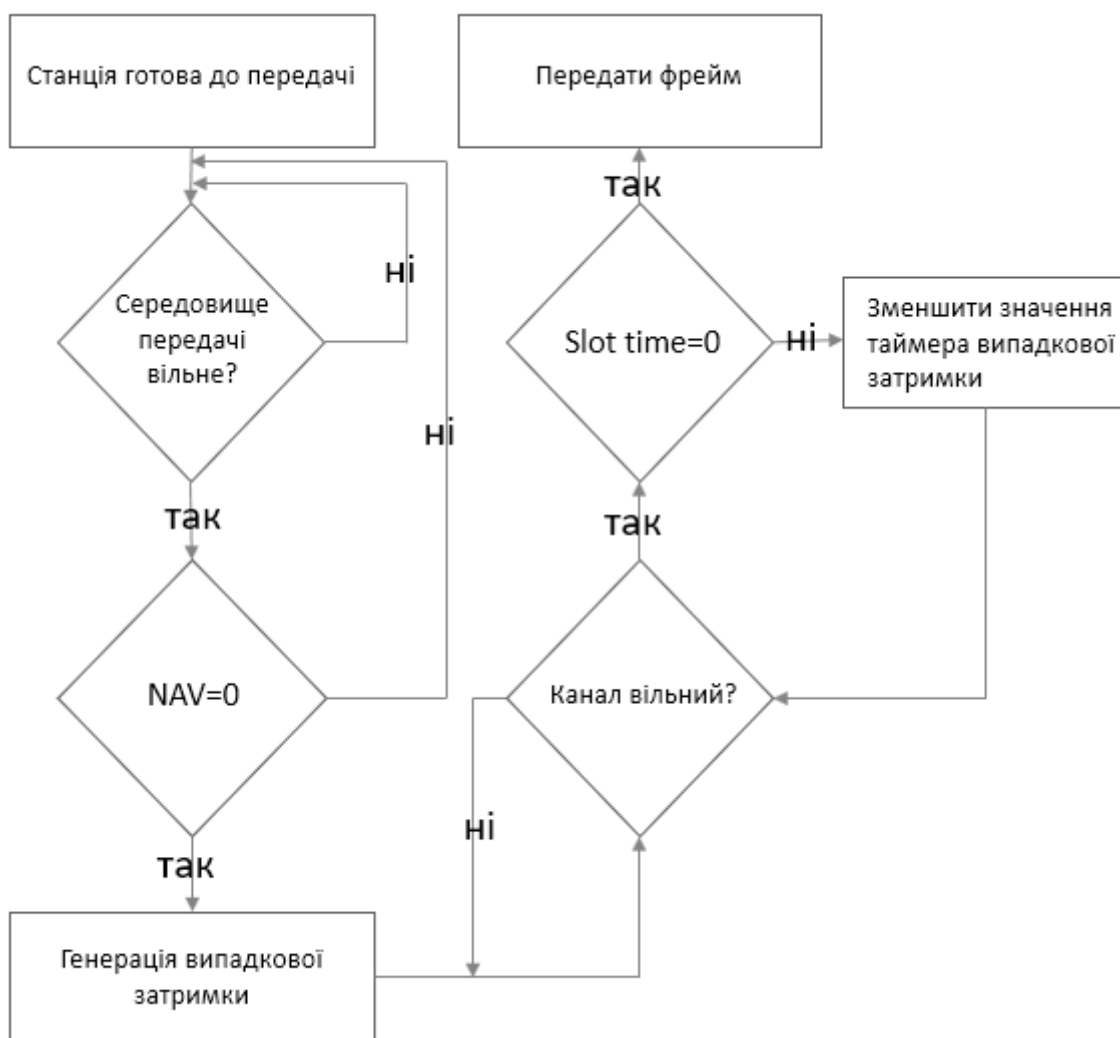


Рис. 1.3. Алгоритм доступу до середовища передачі з використанням DCF

Початковий фрейм RTS повинен пройти через процедуру DCF, як будь-який інший фрейм. Але, аналогічно кадру підтвердження, відповідний CTS-фрейм, який передається точкою доступу, міне процедуру випадкової затримки і, перед тим як бути переданим, повинен витримати час, рівний інтервалу SIFS.

Станція, що отримала фрейм, підтверджує його безпомилковий прийом відправкою передавальної станції фрейму підтвердження. Фрейми можуть містити підтвердження і їм дозволяється не брати участі в процесі випадкової затримки. Це гарантує приймаючій станції найбільший шанс отримання доступу до середовища передачі, в порівнянні з іншими станціями. При кожній невдалій спробі доступу до середовища станція збільшує значення лічильника спроб. Коли значення лічильника числа спроб досягає встановленого адміністратором мережі порогу, станція намагається зарезервувати середовище [12, 18, 31, 32].

Фрагментація фрейму - це виконувана на рівні MAC функція, призначення якої підвищити надійність передачі фреймів через безпроводове середовище. Під фрагментацією розуміється дроблення фрейму на менші фрагменти і передача кожного з них окремо. Отримання кожного фрагмента фрейму підтверджується окремо. Отже, якщо який-небудь фрагмент буде переданий з помилкою або вступить в колізію, тільки його доведеться передавати повторно, а не весь фрейм. Це побічно збільшує пропускну здатність. Кожен фрагмент фрейму включає заголовок, і вимагає передачі окремого фрейму підтвердження. В результаті збільшується число службових сигналів і знижується частка переданих корисних даних. Розмір фрагмента може задавати адміністратор мережі. Фрагментації піддаються тільки одноадресні фрейми. Широкомовні і багатоадресні фрейми передаються цілком. Крім того, фрагменти фрейму передаються пакетом, з використанням тільки однієї ітерації механізму доступу до середовища передачі DCF.

PCF - необов'язковий механізм доступу до середовища передачі, який використовується додатково до механізму DCF. Робота PCF можлива тільки в інфраструктурах BSS. Механізм PCF дозволяє передачу фреймів за опитуванням, обмежуючи вільний доступ до середовища передачі. Більшість виробників не забезпечують підтримку механізму PCF в своїх пристроях, тому що він збільшує кількість переданих службових сигналів в BSS [33, 34].

Механізм PCF заснований на взаємодії точки координації (point coordinator, PC) і станцій, опитуваних точкою координації (станції CF-Pollable). При роботі під управлінням механізму PCF, станції можуть передавати дані (по одному фрейму за один раз) тільки тоді, коли точка координації здійснює їх опитування. Точка координації може посилати фрейми станціям, опитувати їх на предмет передачі фреймів, підтверджувати прийом фреймів відповідно до вимог MAC-рівня або закінчити сеанс CFP.

Механізм доступу до середовища передачі: ефективність при впливі перешкод

Механізми контролю несучої за допомогою часового поділу забезпечують одночасну роботу тільки одного передавача в одному стільнику. При наявності перешкод цей механізм є неефективним, тому що безпроводове середовище може бути зайняте незалежним стороннім передавачем, який заважає [17, 28, 34, 35].

Функції координації DCF і PCF забезпечують розподіл смуги пропускання між абонентами.

За допомогою фреймів підтвердження визначається факт доставки інформації одержувачу і необхідність повторної відправки пакетів.

Механізм RTS/CTS вирішує проблему прихованого вузла і забезпечує доступ абонента до середовища передачі в завантаженій BSS. Цей механізм діє тільки в межах одного стільника і не може регулювати роботу сусідніх стільників.

За рахунок фрагментації фреймів можна підвищити надійність передачі фреймів в безпроводових комп'ютерних мережах, тому що ймовірність успішної передачі меншого фрагмента через безпроводове середовище з перешкодами вище. У той же час, це призводить до збільшення переданої службової інформації. Фрагментація може бути корисна у завантаженої безпроводової мережі або при наявності перешкод.

З розглянутих механізмів тільки фрейми підтвердження і фрагментації можна використовувати для протидії радіоперешкод (цього явно недостатньо). Решта механізми призначені тільки для забезпечення зв'язку всередині стільника і уразливі як для міжсистемних перешкод, так і для перешкод від сусідніх стільників.

Специфікація IEEE 802.11e

Стандарт IEEE 802.11e розроблено для забезпечення прикладних сервісів необхідною пропускну здатністю з припустимою затримкою передачі даних (Quality of Service, QoS). Складність вирішення цієї проблеми щодо безпроводових мереж полягає в тому, що кількість помилкових пакетів може досягати 10-20%, а швидкість передачі даних істотно залежить від місця розташування абонента і може змінюватися під час з'єднання. Пристрій, що управляє виділенням необхідної смуги пропускання, залишається в незнанні щодо наявних ресурсів, оскільки аналогічний сусідній пристрій може в будь-який момент використати частину цих ресурсів для своїх потреб [31, 32, 36].

Специфікація IEEE 802.11e передбачає маркування пакетів, що відносяться до критичних даних, мітками пріоритету. Максимальний пріоритет отримують пакети голосових даних (IP-телефонія), як найбільш критичних до затримки у смузі пропускання, потоки передають відеоінформацію, яким виділяється необхідна смуга при її наявності. У BSS і ESS передача даних йде тільки від клієнта до пункту доступу і назад. Специфікація IEEE 802.11e додає можливість обміну трафіком безпосередньо між двома клієнтами, що не тільки дозволяє більш ефективно використовувати

смугу пропускання, але і додає деякі функціональні можливості, зокрема, для домашніх безпроводових мереж, здатних обходитися без точки доступу взагалі.

Дослідницька група IEEE 802.11e для забезпечення QoS в мережах стандарту IEEE 802.11 запропонувала два рішення, що реалізуються на MAC-підрівні.

- Гібридна функція координації (hybrid coordination function, HCF) з роботою в режимі конкуренції. Найчастіше це рішення називають розширена розподілена функція координації (enhanced DSF, EDSF).

- HCF з роботою в режимі почергового доступу.

У специфікації стандарту IEEE 802.11e дані розбиті на вісім класів. EDSF і HCF в режимі почергового доступу використовують ці вісім класів, які називаються класи трафіку (traffic classes, TC), співвідношення яких з вісьмома класами, визначеними в стандарті IEEE 802.1d, представлено в табл. 1.1 [7, 11, 18, 36]. Трафік розділений на чотири великі категорії - категорії доступу (access categories, AC).

Таблиця 1.1. Відповідність класів трафіку категоріям доступу

TC за стандартом IEEE 802.1D	Опис	AC і черговість передачі
0	Найбільше сприяння (best effort)	0
1	Низький пріоритет	0
2	Низький пріоритет	0
3	Сигналізація / контроль	1
4	Відеозондування (video probe)	2
5	Відео	2
6	Голос	3
7	Управління мережею	3

Категорії доступу 0-3 вказують на пріоритет класів стандарту IEEE 802.11e.

Будь-яка система, що забезпечує різні рівні обслуговування, має три основних компоненти [30, 34, 36]:

- Механізм класифікації трафіку;
- Механізм позначення трафіку відповідним значенням якості зв'язку (QoS);
- Механізм передачі, що враховує класи трафіка.

Механізм класифікації та позначення фреймів даних не підпадає під дію проекту документа IEEE 802.11e, але можна припустити, що додаток (так як забезпечує передачу мови і встановлений в телефоні стандарту IEEE 802.11) має зазначити біти пріоритету IP-дейтаграми. Клієнтський пристрій перетворює ці значення в класи трафіку стандарту IEEE 802.11e. При наявності класифікованого і забезпеченого мітками трафіку стандарт IEEE 802.11e забезпечує механізм диференціації та пріоритетності трафіку, що передається.

Після того, як трафік класифікований і поміщений в відповідну чергу, наступний крок полягає в передачі фреймів.

Метою заходів, прийнятих для забезпечення QoS, є захист трафіку високопріоритетних додатків від впливу трафіку фонових додатків. Якщо дві або більше станцій вступають у колізію, то в цьому випадку фрейм високопріоритетних станції має перевагу, і фонові станції будуть змушені звільнити середовище передачі і збільшити ширину свого вікна конкуренції.

Механізм управління входом (admission control) відстежує наявні ресурси мережі і дозволяє або відхиляє нові сеанси зв'язку додатків. Розширена розподілена функція координації (EDSF) використовує схему управління входом, що отримала назву розподілене управління входом (distributed admission control, DAC). Механізм DAC відстежує в процентах частки використання середовища передачі, що припадає на кожну категорію

доступу. Невикористовувана частка пропускної здатності середовища передачі називається бюджетом (available budget) для даної категорії. Про наявний бюджет точка доступу повідомляє станції в сигнальних фреймах. Якщо бюджет починає наближатися до нуля, станції не можуть ініціювати нові потоки даних. Даний процес захищає існуючі інформаційні потоки додатків від впливу з боку нових потоків [10 - 12, 30, 36].

Робота HCF в режимі почергового доступу аналогічна роботі функції точки координації PCF. Точка доступу містить логічний об'єкт (logical entity), який називається гібридний координатор (hybrid coordinator, HC), який відстежує потоки інформації клієнтських станцій HCF і призначає інтервали опитувань. Отримання доступу в результаті опитування HCF дозволяє станції вимагати потрібній їй час для передачі, а не просто визначати вільну смугу пропускання, як у випадку використання EDSF. HCF дозволяє гібридному координатору визначити, які ресурси безпроводового середовища доступні, і прийняти або відхилити інформаційні потоки трафіка додатків.

HCF може функціонувати в двох режимах, один з них співіснує з EDSF, а другий використовує період, вільний від конкуренції (CFP), аналогічно PCF.

Механізм розподіленого управління входом (DAC) не володіє потрібними характеристиками, бо не здійснює строгий контроль входу. Станції потенційно можуть здійснювати передачу і тим самим негативно впливати на вже існуючі інформаційні потоки. Ефективність механізмів IEEE 802.11e швидко знижується при посиленні перекриття по суміщеному каналу.

Ефективність роботи механізмів стандарту IEEE 802.11e при впливі перешкод

Таким чином, обладнання стандарту IEEE 802.11e захищає високопріоритетний трафік безпроводової мережі від низькопріоритетного всередині одного стільника. Незалежні від стільника заважаючі передавачі негативно впливають на будь-який вид переданий трафіку. В результаті пошкоджені пакети повинні передаватися повторно. Для низькопріоритетного

трафіку затримка в доставці пакетів не дуже критична. Для високопріоритетного трафіку (наприклад IP-телефонія) це неприйнятно, тому що механізми IEEE 802.11e якраз і призначені для того, що б забезпечити швидку доставку високопріоритетних даних [36, 37, 38].

Додаткові специфікації, призначені для зменшення впливу перешкод: стандарти IEEE 802.11h і IEEE 802.11k

Стандарт IEEE 802.11h доповнює існуючу специфікацію IEEE 802.11a алгоритмами ефективного вибору частот, а також засобами управління випромінюваної потужністю і генерації відповідних звітів [7, 10, 39].

Протоколи, які використовуються в стандарті, передбачають динамічне реагування клієнтів безпроводової мережі на інтерференцію радіосигналів шляхом переходу на інший канал, зниженням потужності, або обома способами. Вирішення цих завдань базується на протоколах DFS (Dynamic Frequency Selection) і TPC (Transmit Power Control).

Технологія DFS виявляє інші пристрої, що використовують той же радіоканал, що і точка доступу WLAN, і, при необхідності, перемикає BSS на інший канал. DFS відповідає за відсутність інтерференції сигналів точки доступу та інших засобів зв'язку, включаючи радарні системи та «чужі» сегменти WLAN [13, 16].

Коли безпроводовий пристрій вперше з'єднується з точкою доступу, воно висилає базовій станції список каналів, які може підтримувати. Якщо точці доступу необхідно переключитися на інший радіоканал, вона перевіряє отримані дані для визначення найкращого з них. Точка доступу ініціює перемикання каналу за допомогою відсилання відповідного кадру на всі безпроводові пристрої, пов'язані з нею у процесі сеансу. У кадрі вказуються: номер нового робочого каналу, час до перемикання і дозвіл на передачу до моменту перемикання каналу. Всі абонентські станції, які отримують повідомлення про переключення робочого каналу, змінюють свої настройки після закінчення зазначеного періоду.

Точка доступу постійно вимірює активність каналу для виявлення в ньому трафіку чужих систем. Для цього вона посилає запити на вимірювання на абонентський термінал або групу терміналів, вказуючи номер каналу, який слід перевірити, час початку вимірювання і тривалість вимірів. Абонентська станція проводить вимірювання активності каналу і генерує звіт для точки доступу.

Технологія TRS призначена для зменшення перешкод від мереж WLAN супутниковим і радарним службам, що здійснюється зниженням потужності радіопередачі. TRS також може застосовуватися для управління енергоспоживанням безпроводових пристроїв, для зміни робочої дистанції між точками доступу і безпроводовими пристроями. Точки доступу обмежують максимально допустиму потужність передачі як свою, так і абонентських станцій, які обслуговуються. Потужність передачі будь-якої станції, при зв'язку з цією точкою доступу, не може перевищувати максимальної величини, зазначеної точкою доступу. Коли кожен новий термінал IEEE 802.11 з'єднується з нею, він повідомляє необхідну величину потужності сигналу. Точка доступу акумулює дані про пов'язані з нею станції для визначення максимальної потужності всього сегмента локальної радіомережі. Потужність радіовипромінювання в цьому сегменті WLAN регулюється для зменшення перешкод, створюваних іншим системам, причому підтримується достатній її запас для надійної роботи безпроводової мережі [19, 22, 37].

Стандарт IEEE 802.11k призначений для мереж IEEE 802.11 і передбачає обмін різними службовими параметрами. Частина з них пов'язана з процедурою внутрішньомережевого роумінгу і дозволяє оптимізувати розподіл трафіку по мережі [7, 10, 40].

У безпроводовому середовищі клієнтській пристрій буде з'єднуватись з точкою доступу по максимальному рівню сигналу. При певному числі і розташуванні користувачів цілком можливо, що якась точка доступу

виявиться перевантаженою, а решта будуть працювати з мінімальним навантаженням, що призведе до зниження загальної продуктивності мережі. У безпроводовій мережі стандарту IEEE 802.11k, при повному завантаженні точки доступу з найбільшим рівнем сигналу, клієнтські запити на встановлення з'єднань будуть переадресовуватися до інших пристроїв. У підсумку, завдяки більш раціональному використанню ресурсів, сумарна пропускна здатність мережі зростає. Саме рішення про перенаправлення клієнта на іншу точку доступу приймається на основі отриманої від абонентських пристроїв інформації про всі розпізнані ним точки доступу, інтенсивності сигналів, підтримуваних сервісах, типах шифрування і т. д [7, 18].

Стандарт IEEE 802.11k забезпечує доступ до параметрів, що вимірюється на першому і другому рівнях моделі OSI, з більш високих рівнів. Точка доступу може вимагати від клієнта відомості про рівень шумів в каналі, що не відносяться до роботи пристроїв стандарту IEEE 802.11, про завантаження і тривалості використання даного каналу. Ця інформація буде використовуватися при виборі радіоканалу для встановлення з'єднання. Для поліпшення якості обслуговування передбачено і збір даних про так звані прихованих вузлах. Їх наявність знижує ефективність роботи механізму запобігання колізій і, як наслідок, загальну продуктивність мережі. Специфікація IEEE 802.11k передбачає передачу клієнтами на точки доступу відомостей про виявлені приховані вузли. Стандарт IEEE 802.11k передбачає отримання точками доступу від клієнтів повної статистичної інформації про мережеві параметри і події, а також застосування процедур управління випромінюваної потужністю в різних частотних діапазонах відповідно до вимог регулюючих органів різних країн.

Ефективність механізмів стандартів IEEE 802.11h і IEEE 802.11k при впливі перешкод

Для того, щоб організувати оптимальний розподіл користувачів між точками доступу необхідно збільшувати зони перекриття між сусідніми стільниками. В результаті зменшується відстань між стільниками, що працюють на одному частотному каналі, а, відповідно, збільшуються внутрішньосистемні перешкоди. Ефективно використовувати таку можливість можна в WLAN що складаються з одного-трьох стільників, коли відсутні перешкоди по каналу, що перекривається [7, 36, 39, 40].

Автоматичний вибір частотних каналів з найменшим рівнем перешкод. Така можливість корисна при наявності в мережі однієї-двох стільників. Якщо стільників три і більше, то число доступних частотних каналів, на які можна здійснити перехід вкрай обмежена. При цьому може знадобитися синхронізоване перемикання частотних каналів відразу всіх стільників. Це можливо тільки при наявності єдиної системи управління безпроводовою мережею. При наявності 11 частотних каналів (наприклад в США) таке перемикання взагалі неможливо, тому що комбінація з трьох каналів, що не перекриваються може бути отримана тільки при використанні 1-го, 6-го і 11-го каналів [2, 6, 14, 38].

Регулювання потужності випромінювання. Точка доступу повинна випромінювати сигнал, який змогла б прийняти навіть найбільш віддалена від неї МС. При цьому регулювати потужність випромінювання AP практично не має сенсу. Якщо антени точок доступу всеспрямовані, то AP знаходяться в центрі стільника. При цьому максимальна потужність, необхідна для передачі даних від граничної МС до точки доступу, буде приблизно рівною для всіх МС, які перебувають на межі стільників. Тобто граничні МС, які мають найбільший заважаючий вплив на сусідні стільники, будуть, як і раніше, випромінювати з максимальною потужністю. У підсумку, при використанні всеспрямованих антен зменшується тільки середній рівень

внутрішньосистемних перешкод. Ефективність механізмів стандарту IEEE 802.11k показана на рис. 1.4 [32, 40].

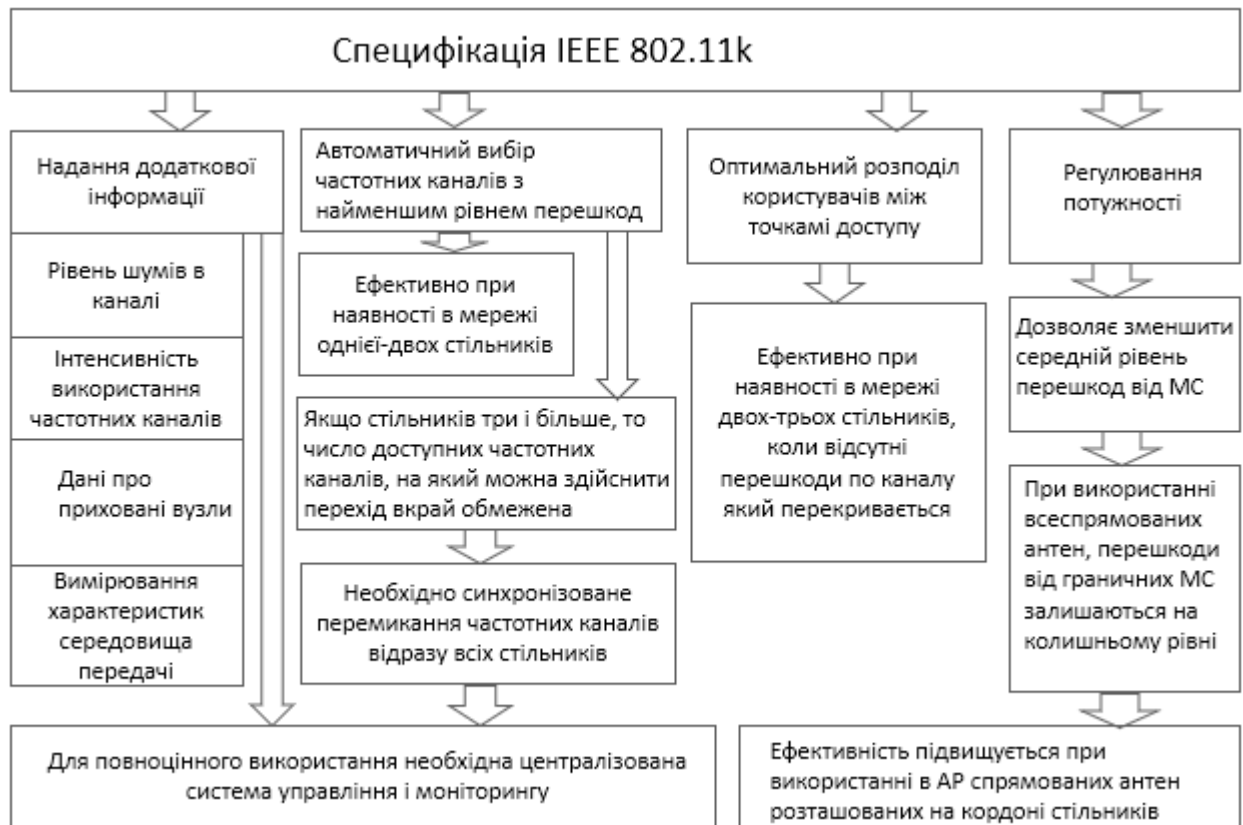


Рис.1.4. Ефективність механізмів стандарту IEEE 802.11k

Кодування і модуляція

Кодування - це механізм, що дозволяє здійснювати високошвидкісну передачу даних зашумленими каналами. Всі канали передачі схильні до перешкод, через що виникають помилки у вигляді спотворених бітів. Кодування збільшує обсяг даних, переданих через зашумлене середовище передачі, замінюючи послідовності бітів довгими кодами. Це дозволяє розпізнати і виправити спотворені біти. Довжина кодового обмеження (constraint length of a code) показує, як багато вихідних елементів виходить з системи в перерахунку на один вхідний. Коди характеризуються ефективним ступенем (або коефіцієнтом) кодування (code rate). Цей коефіцієнт вказує, скільки вихідних бітів, доводиться на один вхідний. Коди з більш високим

ефективним ступенем кодування дозволяють передавати дані з більшою швидкістю, але вони більш чутливі до перешкод [19, 23, 35, 41].

Одним з основних припущень, на яких заснований механізм кодування, полягає в тому, що помилки, що виникають при передачі інформації, є незалежними подіями. Але найчастіше помилки в передачі відбуваються серіями. З цих причин використовується чергування для розкиду бітів блокових помилок, роблячи, таким чином, помилки схожими на незалежні. Основна мета чергування - розкидати сусідні біти шляхом розміщення між ними бітів несусідніх.

При кодуванні інформаційний біт, що представляється прямокутним імпульсом, розбивається на послідовність більш дрібних імпульсів-чипів.

В результаті спектр сигналу значно розширюється, оскільки ширину спектра можна з достатнім ступенем точності вважати зворотно пропорційною тривалості одного чіпа. Такі кодові послідовності часто називають шумоподібним кодами. Поряд з розширенням спектра сигналу, зменшується і спектральна щільність енергії, так що енергія сигналу як би розмазується по всьому спектру, а результуючий сигнал стає шумоподібним в тому сенсі, що його тепер важко відрізнити від природного шуму.

Одна з найбільш відомих таких послідовностей - код Баркера завдовжки в 11 чіпів: 11100010010. Коди Баркера мають найкращі серед відомих псевдовипадкових послідовностей властивості шумоподобного. Для передачі одиничного і нульового символів повідомлення використовуються, відповідно, пряма і інверсна послідовності Баркера [41, 42].

У приймачі отриманий сигнал множиться на код Баркера (обчислюється кореляційний функція сигналу), в результаті чого він стає вузькосмуговим, і його фільтрують у вузькій смузі частот. Будь-яка вузькосмугова перешкода, яка потрапляє в смугу вихідного широкосмугового сигналу, після множення на код Баркера, навпаки, стає широкосмуговою, а в вузьку інформаційну смугу потрапляє лише частина перешкоди, по потужності приблизно в 11 разів

менша, ніж перешкода, яка діє на вході приймача. Основний сенс використання коду Баркера полягає в тому, щоб гарантувати високу ступінь достовірності прийнятої інформації і при цьому передавати сигнал практично на рівні перешкод [43, 44].

Таким чином, при швидкості передачі 1 або 2 Мбіт/с енергія вузькосмугової перешкоди розподіляється по всьому спектру сигналу і її рівень зменшується в 11 разів [7, 11, 18, 41].

Якщо перешкода широкосмугова, то зменшення рівня перешкоди можна оцінити таким чином. Припустимо, що перешкода, пошкоджує якусь частину спектру сигналу p , %. Тоді, після декодування, енергія перешкоди розподілиться по всьому спектру сигналу. Уявімо широкосмугову перешкоду набором вузькосмугових перешкод шириною df [41 - 44]:

$$\partial f = V f / 11,$$

де df - ширина вузькосмугової перешкоди, МГц;

Δf - ширина смуги спектра сигналу, МГц.

Кожна з вузькосмугових складових широкосмугової перешкоди, розподілена по всій ширині спектра повинна зменшитися в 11 разів [43, 44]. При цьому сума рівнів вузькосмугових перешкод дорівнює:

$$\partial f = V f / 11;$$

$$P_{i_перешкоди} = P_{перешкоди} / 11;$$

$$P_{\Sigma_перешкоди} = \sum_{i=1}^n P_{i_перешкоди} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{перешкоди}}{11} = n \cdot \frac{P_{перешкоди}}{11};$$

$$a_{\Sigma_перешкоди} = 10 \log(P_{\Sigma_перешкоди}) = 10 \log(P_{перешкоди}) + 10 \log(n) - 10 \log 11;$$

$$a_{\Sigma_перешкоди} = 10 \log(P_{перешкоди}) + 10 \log(n) - 10,4, \quad (1.1)$$

де $P_{перешкоди}$ - рівень широкосмугової перешкоди, що потрапляє в приймач, мВт;

$a_{перешкоди}$ - рівень широкосмугової перешкоди, що потрапляє в приймач, дБ;

$P_{i_перешкоди}$ - рівень вузькосмугової складової перешкоди, після множення на код Баркера, дБ;

$P_{\Sigma_перешкоди}$ - рівень широкосмугової перешкоди після множення на код Баркера, мВт;

$a_{\Sigma_перешкоди}$ - рівень широкосмугової перешкоди після множення на код Баркера, дБ;

n - число вузькосмугових перешкод, що складають широкосмугову перешкоду, шт.

Використання ССК-кодів дозволяє кодувати 8 бітів на один символ при швидкості 11 Мбіт/с і 4 біта на символ при швидкості 5,5 Мбіт/с. Самі кодові послідовності є 8-чіповими, і при швидкості передачі 11 Мбіт/с кодування 8 бітів на символ відповідає символної швидкості $1,375 \cdot 10^6$ символів в секунду ($11/8=1,385$) [43 - 45]. Аналогічна символна швидкість використовується і при швидкості передачі 5,5 Мбіт/с, так як в даному випадку в одному символі кодується тільки 4 біти (табл. 1.2) [2, 5, 42, 46].

Для того щоб забезпечити достовірність отриманих даних (тобто мати можливість виявляти і виправляти помилки) в режимах передачі за технологією OFDM, використовують додавання надлишкової інформації і так зване згорткове кодування. Суть згорткового кодування полягає в тому, що до послідовності переданих бітів додаються службові біти, значення яких залежать від декількох попередніх переданих бітів. При одному і тому ж типі модуляції в стандартах використовуються різні швидкості передачі [45, 46].

Таблиця 1.2. Швидкості передачі і тип модуляції в стандарті IEEE 802.11b

Швидкість передачі, Мбіт/с	Кодова послідовність	Тип модуляції	Символьна швидкість, символів в секунду	Кількість біт на символ
1	11-чіпова (Баркера)	DBPSK	10^6	1
2	11-чіпова (Баркера)	DQPSK	10^6	2
5,5	8-чіпова (ССК)	DQPSK	$1,375 \cdot 10^6$	4
11	8-чіпова (ССК)	DQPSK	$1,375 \cdot 10^6$	8

При ступені згорткового кодування $1/2$, на кожен інформаційний біт додається один службовий (надмірність дорівнює 2). З цієї причини при ступені згорткового кодування $1/2$ інформаційна швидкість вдвічі менше швидкості передачі. При ступені згорткового кодування $3/4$ на кожні три інформаційних біта додається один службовий, тому в даному випадку корисна (інформаційна) швидкість становить $3/4$ від повної швидкості. Відповідно, при загальній швидкості передачі 12 Мбіт/с, інформаційна швидкість для коефіцієнта кодування $1/2$ складе $12 \times 1/2 = 6$ Мбіт/с. А для коефіцієнта кодування $3/4$ інформаційна швидкість складе $12 \times 3/4 = 9$ Мбіт/с (табл. 1.3) [5, 42, 46].

Технологія бінарного пакетного згорткового кодування опціонально використовується і в стандарті IEEE 802.11b на швидкостях 5,5 Мбіт / с і 11 Мбіт / с. В основі методу РВСС лежить так зване згорткове кодування зі швидкістю $1/2$. Використовувані в РВСС типи модуляції: BPSK для швидкості 5,5 Мбіт / с і QPSK для швидкості 11 Мбіт/с [41 - 44].

Таблиця 1.3. Параметри передавача стандарту IEEE 802.11a

Швидкість передачі даних (Мбіт/с)	Сигнальне сузір'я	Ступінь згорткового кодування / декодування	Число канальних бітів	Число канальних бітів на символ	Число бітів даних на символ OFDM
6	BPSK	$\frac{1}{2}$	1	48	24
9	BPSK	$\frac{3}{4}$	1	48	36
12	QPSK	$\frac{1}{2}$	2	96	48
18	QPSK	$\frac{3}{4}$	2	96	72
24	16-QAM	$\frac{1}{2}$	4	192	96
36	16-QAM	$\frac{3}{4}$	4	192	144
48	64-QAM	$\frac{2}{3}$	6	288	192
54	64-QAM	$\frac{3}{4}$	6	288	216

Для отримання швидкостей 22 і 33 Мбіт/с в технології РВСС використовується 8-позиційна фазова модуляція 8-PSK. Дані надходять спочатку на згортковий кодер з коефіцієнтом кодування $\frac{1}{2}$, а потім на пунктурний кодер, з коефіцієнтами кодування $\frac{4}{3}$ (22 Мбіт/с) і $\frac{2}{1}$ (33 Мбіт/с). Пунктурний кодер необхідний для зменшення надмірності інформації, що передається. Результуючий коефіцієнт кодування складе $\frac{2}{3}$ для швидкості 22 Мбіт/с, і 1 для швидкості 33 Мбіт/с [46, 47].

Можна припустити, що тип використовуваної модуляції задає вимога до відношенню сигнал / перешкода, а кодування і надмірність переданих даних визначають виграш у відношенні сигнал/перешкода при декодуванні в залежності від ступеня пошкодження перешкодою корисного сигналу.

В ідеалі, допустиме відношення сигнал/перешкода має бути зазначено виробником обладнання. На жаль, для обладнання WLAN така інформація зазвичай відсутня. У табл. 1.4 показані характеристики радіостанцій стандарту IEEE 802.11g [12, 42].

Таблиця 1.4. Мінімально допустимі характеристики радіопристроїв стандарту IEEE 802.11g OFDM

Швидкість передачі даних (Мбіт / с)	Модуляція	Ступінь згорткового кодування	Дод. перевищення рівня перешкоди над рівнем сигналу, дБ ($\Delta f > 25$ МГц)	Дод. перевищення рівня перешкоди над рівнем сигналу, дБ ($\Delta f > 35$ МГц)	Дод. відношення сигнал/перешкода, дБ
6	BPSK	1/2	16	32	8=24-16=40-32
9	BPSK	3/4	15	31	9=24-15=40-31
12	QPSK	1/2	13	29	11=24-13=40-29
18	QPSK	3/4	11	27	13=24-11=40-27
24	16-QAM	1/2	8	24	16=24-8=40-24
36	16-QAM	3/4	4	20	20=24-4=40-20
48	64-QAM	2/3	0	16	24=24-0=40-16
54	64-QAM	3/4	-1	15	25=24-(-1)=40-15

Для обладнання стандартів IEEE 802.11b/g, вважається допустиме відношення сигнал/перешкода при різниці між сусідніми каналами 25 МГц (перешкода від сусіднього каналу) і 35 МГц (перехресна перешкода). Тоді для обладнання стандарту IEEE 802.11g, що використовує технології OFDM, згідно спектральної маски і даних про допустимі рівні перешкод, зменшення рівня сигналу при віддаленні від несучої на 16 і більше МГц складе не менше

24 дБ, зменшення рівня сигналу при віддаленні від несучої на 30 і більше МГц складе не менше 40 дБ.

У стандартах IEEE 802.11 DSSS, IEEE 802.11b і IEEE 802.11g RBSS зазначено, що зв'язок повинен забезпечуватися при перевищенні рівня сусіднього каналу (різниця 25 МГц, зменшення рівня не менше 30 дБ) над сигналом не менше, ніж 35 дБ. Згідно спектральної маски відношення сигнал/перешкода в цьому випадку буде $30-35 = -5$ дБ. Тобто рівень перешкоди може перевищувати рівень сигналу на 5 дБ. Для оцінки допустимого відношення сигнал / перешкода при впливі перешкоди по каналу, що перекривається це число не підходить. За результатами тестування, при випробуваннях пристроїв при одному і тому ж рівні пакетних помилок ($PER = 0,01$) і швидкості передачі 11 Мбіт/с, робота в режимі ССК була можливою при відношенні сигнал/шум 8,5 дБ, а застосування RBSS дозволило зменшити це співвідношення до 4,5 дБ [35, 42, 45, 48].

Для моделі точки доступу DWL-900AP виробник показує вимоги до відношення сигнал / перешкода, відповідні даними табл. 1.5 (крім режиму 33 Мбіт / с, непідтримуваного тією точкою доступу). У режимі RBSS 33 Мбіт/с вимога до чутливості на 2 дБ нижче, ніж в режимі RBSS 22 Мбіт/с. Отже, при однаковому рівні шуму приймача, допустиме відношення сигнал / перешкода має бути на 2 дБ вище (табл. 1.5) [7, 9, 12, 42, 44].

Забезпечення ЕМС на етапі проектування WLAN

Процес проектування безпроводової мережі необхідно проводити з урахуванням параметрів використовуваного обладнання, особливостей місцевості, впливу міжсистемних і внутрішньосистемних перешкод. На сьогодні є системи, що дозволяють планувати безпроводову мережу і здійснювати її моніторинг і управління. Одна з найбільш функціональних з існуючих систем проектування і управління WLAN - NetAlly AirMagnet Survey [49, 50] - дозволяє здійснювати контроль і візуалізацію роботи внутрішньої мережі в режимі реального часу. Основна увага в цій системі зроблена не на

проектування WLAN, а на централізованому управлінні і моніторингу безпроводової мережі. Інтерфейс системи NetAlly AirMagnet Survey показаний на рис. 1.5.

Таблиця 1.5. Мінімально допустиме відношення сигнал/перешкода в радіостанціях стандартів IEEE 802.11DSSS, 801.11b і IEEE 802.11g PBCC

Швидкість передачі даних	Допустиме відношення сигнал/перешкода
1 Мбіт/с, Баркера	3 дБ
2 Мбіт/с, Баркера	3 дБ
5.5 Мбіт/с, ССК	5,5 дБ
11 Мбіт/с, ССК	8,5 дБ
5,5 Мбіт/с, PBCC	1,5 дБ
11 Мбіт/с, PBCC	4,5 дБ
22 Мбіт/с, PBCC	8,5 дБ
33 Мбіт/с, PBCC	10,5 дБ

При проектуванні WLAN здійснюється визначення зони покриття в залежності від матеріалів, з яких побудовано будівля. Є вбудований редактор плану поверхів. На підставі наданих даних NetAlly AirMagnet Survey допомагає вибрати оптимальне розташування точок доступу і показує очікувану зону покриття.

Перевагами системи NetAlly AirMagnet Survey є:

- широкі можливості з моніторингу мережі (аж до відстеження координат МС);
- зручне управління безпроводовою мережею (управління настройками устаткування);

- безпроводова мережа, що працює під управлінням програми, активно використовує можливості стандартів IEEE 802.11 до і IEEE 802.11h (регулювання потужності, автоматичний перехід на інші частоти і т.д.);

- при плануванні розміщення точок доступу враховуються особливості місцевості (складається план-карта приміщень, вказуються матеріали стін).

Недоліки системи:

- висока ціна;

- планування розміщення антен і оцінка зони обслуговування точок доступу здійснюються без урахування перешкод (внутрішньосистемних та міжсистемних).

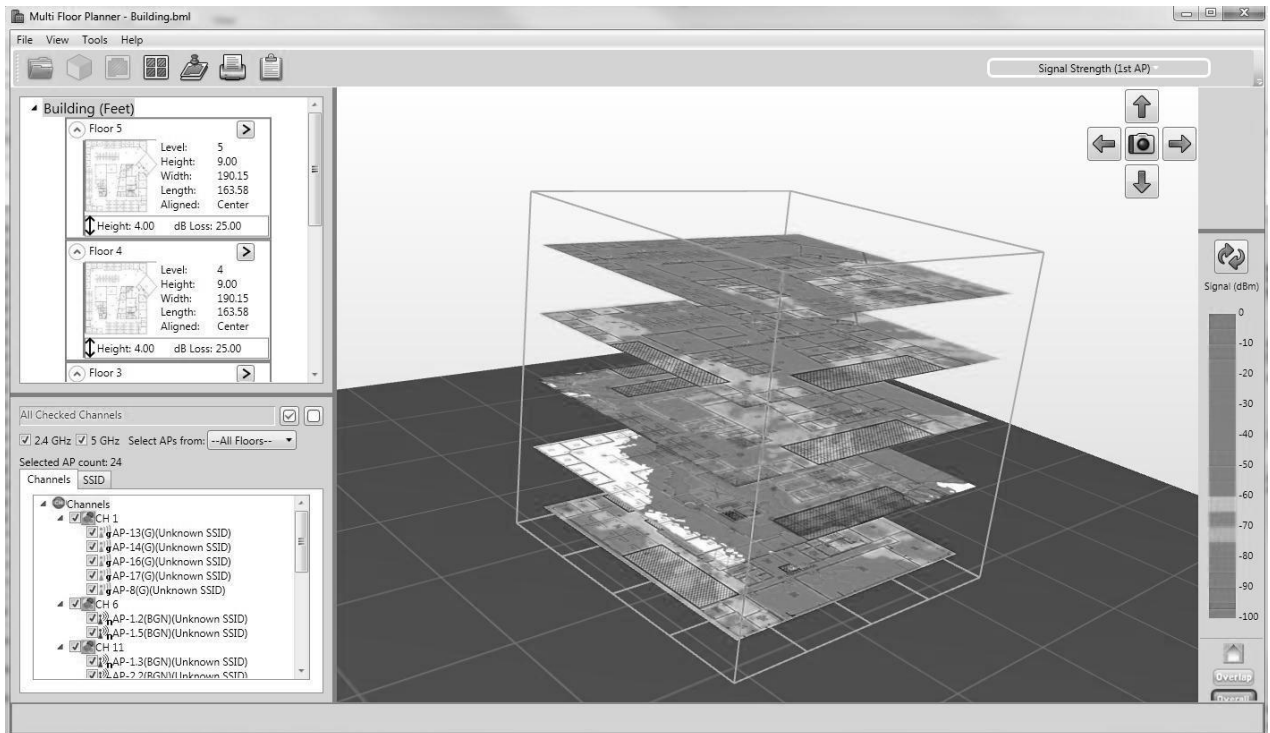


Рис. 1.15. Планування WLAN в NetAlly AirMagnet Survey

Контрольні запитання

1. Які органи стандартизації мають найбільший вплив на розвиток WLAN?

2. Яке некомерційне професійне об'єднання формує міжнародні стандарти, такі як стандарт IEEE 802.11 на безпроводові LAN?
3. Яке об'єднання сертифікує пристрої WLAN?
4. Яка роль ETSI у впровадженні WLAN стандарту IEEE 802.11 в країнах Європи?
5. Основне призначення фізичних рівнів стандарту IEEE 802.11?
6. Базовий стандарт, розроблений в 1997 році, визначає протоколи, необхідні для організації безпроводових комп'ютерних мереж (WLAN), скільки цих протоколів?
7. Технології стандарту IEEE 802.11 були розвинуті до IEEE 802.11a IEEE 802.11b IEEE 802.11g. В чому основна різниця між цими версіями?
8. Опишіть, які види архітектури взяті за основу WLAN і чому?
9. Які три види топології використовуються при побудові WLAN?
10. Які області застосування WLAN вам відомі?
11. Перерахуйте проблеми електромагнітної сумісності, що виникають при побудові та функціонуванні WLAN?
12. WLAN використовують механізм, який називається “множинний доступ з контролем несучої та запобігання колізій”, поясніть принцип роботи задіяного механізму
13. Чому при наявності перешкод механізм “множинний доступ з контролем несучої та запобігання колізій” неефективний?
14. Що таке «мітки пріоритету» та їх призначення?
15. Трафік у WLAN розділений на чотири великі категорії - категорії доступу (access categories, AC) від 0 до 3, охарактеризуйте ці категорії доступу.

РОЗДІЛ 2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ В БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

Під електромагнітною сумісністю РЕЗ розуміється їх здатність одночасно функціонувати в реальних умовах експлуатації з необхідною якістю при впливі на них ненавмисних радіоперешкод, не створюючи неприпустимих радіозавад іншим радіозасобам. Іншими словами, EMC РЕЗ - це властивість РЕЗ функціонувати без погіршення якісних показників нижче допустимого в заданій електромагнітній обстановці (ЕМО). Під електромагнітною обстановкою будемо розуміти сукупність електромагнітних полів РЕЗ різних служб радіозв'язку в даній області простору. Оцінка EMC РЕЗ є спільним завданням і невід'ємною частиною процесу узгодження умов спільної роботи РЕЗ. В ході оцінки EMC РЕЗ виробляються умови, що задовольняють критерію EMC у ЕМО. Ці умови можуть включати: територіальні обмеження на розміщення станції - джерела перешкод; обмеження EIRP станції-джерела сигналів, що заважають у напрямку на станцію, схильній заваді; захисні смуги і частотні обмеження РЕЗ; значення необхідного придушення бічних пелюсток діаграм спрямованості передавальної і приймальної антен; оптимізацію параметрів розташування РЕЗ та орієнтації антен та ін. [51 - 53].

За критерій забезпечення EMC зазвичай приймають захисне відношення радіоприймача - мінімальне допустиме відношення сигнал/радіоперешкода на вході приймача, що забезпечує необхідну якість функціонування в умовах впливу ненавмисних радіозавад.

Для подолання проблеми EMC РЕЗ застосовуються технологічні і технічні методи. Технічні методи гарантування EMC пов'язані із зміною характеристик параметрів РЕЗ (наприклад, пониження ступеня позасмугових і інших випромінювань передавачів, підвищення характеристик приймачів

пов'язаних з їх вибірковістю, зменшення ступеню шкідливих значень бічних пелюсток ДС антен та ін.). Такі засоби доволі ефективні, але їх впровадження пов'язано в основному з впровадженням новітнього обладнання. Для РЕЗ, що вже знаходиться на об'єктах, такими ефективними заходами гарантування ЕМС є організаційні заходи. Тому що застосування відповідного подання робочих частот пов'язано із запровадженням частотних, регіональних та часових обмежень, якими обмежують РЕЗ.

У цьому розділі розглянуто основні принципи оцінки ЕМС радіосистем і сформульовані завдання по оцінці ЕМС, які необхідно вирішувати при проектуванні безпроводових комп'ютерних мереж. Проаналізовано вимоги 40 стандартів до характеристик обладнання, які необхідно враховувати при забезпеченні ЕМС.

2.1. Оцінка електромагнітної сумісності при проектуванні безпроводових комп'ютерних мереж стандарту IEEE 802.11

Кінцева мета оцінки ЕМС радіосистем - це обчислення відношення сигнал/перешкода в приймальному пристрої і порівняння його з допустимим значенням [52 - 59].

Основні кроки при оцінці ЕМС включають в себе:

- аналіз параметрів джерел корисного і заважаючих сигналів;
- аналіз характеру трас поширення між рецептором і джерелами корисного і заважаючого сигналів;
- аналіз параметрів рецептора корисного сигналу при одночасній дії корисного і заважаючого сигналів.

В якості вихідних даних для прогнозування ЕМС двох радіосистем задаються:

- Параметри всіх радіопристроїв (приймачів і передавачів), що знаходяться в межах можливого перешкоджаючого впливу:
 - Частоти корисного і що заважає сигналів;
 - Потужності корисного і що заважає сигналів;

- Смуги пропускання трактів передавача і приймача;
 - Рівень позасмугового випромінювання заважаючого передавача;
 - Втрати в фідерах передавача і приймача;
 - Взаємне орієнтування антен передавача і приймача;
 - Характеристики антен (коефіцієнт підсилення, діаграма спрямованості, азимут основного пелюстка, висота установки);
 - Чутливість приймача;
 - Захисні відношення в приймачі (допустиме відношення сигнал / перешкода).
- Умови розповсюдження електромагнітної хвилі у вільному просторі:
- Координати установки радіозасобів;
 - Висоти установки антен над рівнем моря;
 - Наявність або відсутність прямої видимості між джерелами і рецепторами;
 - Характеристики навколишньої місцевості (тип місцевості, рельєф, кліматичні умови).

На основі отриманих даних проводяться розрахунки загасання сигналу і перешкоди. ЕМС забезпечується, якщо рівень перешкоди не перевищує допустимого рівня.

Оцінка втрат на трасі поширення

Втрати на трасі поширення у відкритому просторі L обчислюються наступним чином [52, 53]:

$$L = 20 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot l \cdot f \cdot 10^6 / c), \text{ дБ}; \quad (2.1)$$

де f - частота сигналу, МГц;

$c = 300\,000\,000$ - швидкість світла, м/с;

$l = \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2}$ - відстань між приймачем і передавачем, м;

d - відстань між приймачем і передавачем в горизонтальній площині, м;

h_1 та h_2 - висоти установки антен передавача і приймача, м.

Висота розташування антен МС, як правило, визначається висотою столів (робочих місць), на яких розташовуються абонентські МС. Середнє значення висоти розташування антен МС приймається рівним 1 м.

Формулу (2.1) можливо привести до наступного вигляду:

$$L = 20\lg(4\pi) + 20\lg(l) + 20\lg(f) + 20\lg 10^6 - 20\lg(c);$$

$$L = 21,984 + 20\lg(l) + 20\lg(f) + 120 - 169,542;$$

$$L = 20\lg(l) + 20\lg(f) - 27,558. \quad (2.2)$$

Розглянемо різницю у втратах на трас поширення, між першим та 14-м частотним каналом в діапазоні 2,5 ГГц. У разі прямої видимості, втрати на поширення обчислюються наступним чином [55, 56, 57]:

$$L = 20\lg(4\pi f l / c), \text{ дБ}$$

$$\Delta L = L_{14} - L_1 = 20\lg(4\pi f_{14} l / c) + 20\lg f_{14} - 20\lg(4\pi f_1 l / c) - 20\lg f_1$$

$$\Delta L = 20\lg_{14} - 20\lg f_1 = 20\lg\left(\frac{f_{14}}{f_1}\right),$$

де ΔL - різниця у втратах на трасі поширення, між 1-м і 14-м частотним каналом, дБ;

f_1 та f_{14} - центральні частоти 1-го і 14-го частотних каналів, МГц.

Значення центральної частоти для першого каналу $f_1 = 2412$ МГц, для 14-го каналу $f_{14} = 2484$ МГц. Відповідно, $\Delta L = 20\lg(2484/2412) = 0,26$ дБ. Цією різницею можна знехтувати. Розрахунок зон обслуговування слід вести для сьомого частотного каналу, що знаходиться в центрі частотного діапазону ($f_7 = 2442$ МГц);

$$L = 20\lg(l) + 20\lg(f) - 27,558 = 20\lg(l) + 20\lg(2442) - 27,558;$$

$$L = 40,2 + 20\log(l). \quad (2.3)$$

Для оцінки додаткових затухань на трасі використовується наступна залежність [55, 56]:

$$A_{\text{дод.}} = \sum A_{i-\text{дод.}}; \quad (2.4)$$

$A_{\text{дод.}}$ - додаткові втрати на трасі поширення, дБ: втрати на перешкодах, стінах або листі дерев і т.д. ;

$A_{i-\text{дод.}}$ - додаткові втрати на трасі поширення від i -ї перешкоди, дБ.

Обчислення сумарного рівня перешкод в рецепторі

Перешкоди від різних заважаючих передавачів можуть приходити у фазі або протифазі. У цьому випадку вони будуть складатися або компенсувати один одного. Для оцінки EMC розглядається найгірший випадок, в якому перешкоди складаються.

В рецепторах WLAN діє набір з декількох перешкод [7, 23, 38, 58]:

- власний шум приймача;
- перешкоди від сусідніх стільників;
- міжсистемні перешкоди від функціонуючих поблизу радіосистем.

При проектуванні необхідно враховувати всі перелічені види перешкод.

Сумарний рівень перешкод обчислюється таким чином:

$$a_i = b + c; \quad a_i = 10\lg P_i; \quad P_{\Sigma} = \sum P_i;$$

$$a_{\Sigma} = 10\lg P_{\Sigma} = 10\lg \left(\sum_i P_i \right) = 10\lg \left(\sum_i 10^{\frac{a_i}{10}} \right) = 10\lg \left(\sum_i 10^{\frac{b+c_i}{10}} \right);$$

$$a_{\Sigma} = 10\lg \left(\sum_i \left[10^b \cdot 10^{\frac{c_i}{10}} \right] \right) = 10\lg \left(10^b \cdot \sum_i \left[10^{\frac{c_i}{10}} \right] \right) = 10\lg 10^b + 10\lg \left(\sum_i \left[10^{\frac{c_i}{10}} \right] \right);$$

$$a_{\Sigma} = b + 10 \lg \left(\sum_i \left[10^{\frac{c_i}{10}} \right] \right); \quad (2.5)$$

де a_i - рівень i -ї перешкоди, дБ;

c_i - індивідуальна складова i -ї перешкоди, дБ;

b - складова, однакова для всіх перешкод, дБ;

P_i - рівень i -ї перешкоди, мВт;

P_{Σ} - сумарний рівень перешкод, мВт;

a_{Σ} - сумарний рівень перешкод, дБ.

У разі, коли складаються перешкоди з однаковим рівнем, то $a_{\Sigma} = a_i + 10 \lg n$,

де n - число таких перешкод.

Оцінку внеску перешкоди в сумарний рівень перешкод можна оцінити таким чином [7, 52, 58, 59]:

$$10 \lg P_1 = a_1 = \lg 10^{a_1}; \quad 10 \lg P_2 = a_2 = 10 \lg^{a_2};$$

$$\lg P = \frac{\lg 10^a}{10} = \lg 10^{\frac{a}{10}}; \quad P = 10^{\frac{a}{10}};$$

$$a_{\Sigma} = 10 \lg (P_1 + P_2) = 10 \lg \left(10^{\frac{a_1}{10}} + 10^{\frac{a_2}{10}} \right) = 10 \lg \left[\left(\frac{10^{\frac{a_1}{10}}}{10^{\frac{a_2}{10}}} + 1 \right) \cdot 10^{\frac{a_2}{10}} \right] = 10 \lg 10^{\frac{a_2}{10}} + 10 \lg \left(\frac{10^{\frac{a_1}{10}}}{10^{\frac{a_2}{10}}} + 1 \right);$$

$$a_{\Sigma} = a_2 + 10 \lg \left(10^{\frac{a_1 - a_2}{10}} + 1 \right); \quad (2.6)$$

де a_1 - менша за рівнем з двох перешкод, дБ;

a_2 - велика за рівнем з двох перешкод, дБ;

a_{Σ} - сумарний рівень двох перешкод, дБ;

P_1 і P_2 - рівні перешкод, що складаються, мВт.

На рис. 2.1 показаний графік залежності $f(V = a_2 - a_1) = a_\Sigma - a_2$.

При складанні двох синусоїдальних сигналів однакової частоти різниці декількох фаз, які одночасно прийшли в рецептор заважаючих сигналів, можливо врахувати наступним чином [58 - 62]:

$$P_\Sigma = |P_0 \text{gcos}(\varphi_0) + P_1 \text{gcos}(\varphi_1) + P_2 \text{gcos}(\varphi_2) + \dots + P_n \text{gcos}(\varphi_n)|; \quad (2.7)$$

де P_Σ - сумарний рівень перешкод, мВт;

P_0, P_1, \dots, P_{n-1} - рівні сумарних перешкод, мВт;

N - число перешкод в рецепторі, шт.;

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1} = 0^\circ \dots 360^\circ$ - фазові зрушення відповідних перешкод, градусів.

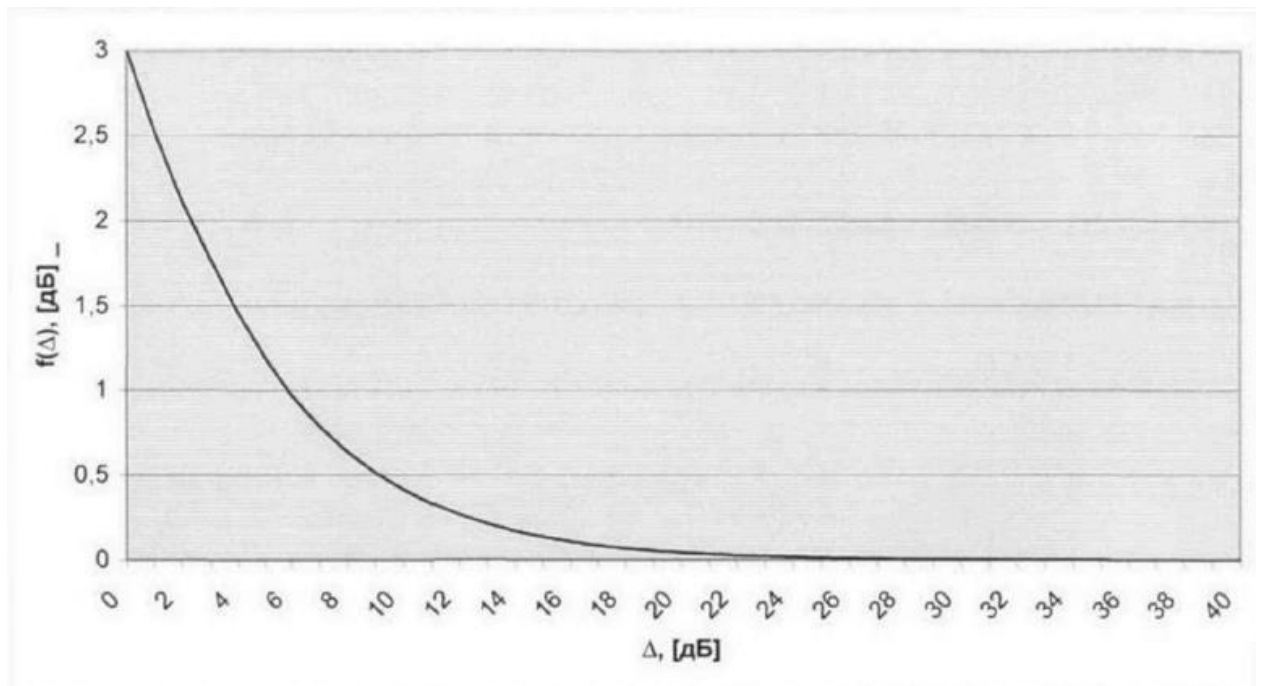


Рис. 2.1. Збільшення рівня сумарної перешкоди при складанні двох перешкод

Якщо задана ймовірність (ν) того, що сумарна перешкода не перевищить деяке граничне значення і необхідно порахувати це граничне значення ($P_{сп.}$), можливо скористатися запропонованим методом.

Діапазон значень $\varphi = 0^0 \dots 360^0$ розбивається на k однакових відрізків. Попадання фазового зсуву перешкоди в будь-який з таких відрізків рівноімовірна подія. Фазовий зсув перешкоди може потрапляти тільки в один з таких відрізків, тобто події є несумісними. Функція $\cos(\varphi)$ представляється набором точок, кожна з яких розміщена в центрі відповідного відрізка. Таким чином число значень, яке може приймати $P_{\Sigma} = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n)$ виходить рівним k^N . Імовірність появи кожної комбінації дорівнює $1/k^N$. Максимальне значення $P_{\max} = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_N$ досягається при $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = \varphi_N = 0^0$, або при $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = \varphi_N = 180^0$ [58 - 62]. Мінімальне значення дорівнює 0 мВт [10].

Діапазон значень $0 \leq P_{\Sigma} \leq P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$ розбивається на m відрізків (вони необов'язково повинні бути рівні). Межами першого відрізка будуть значення $p_0 = 0 \leq P_{\Sigma} \leq p_1$; межами другого відрізка $p_1 < P_{\Sigma} \leq p_2$; і т.д. Межами останнього відрізка будуть значення $p_{m-1} < P_{\Sigma} \leq p_m = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$. Якщо для кожного такого відрізка розраховується число комбінацій (u_j), при яких значення $P_{\Sigma}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N)$ потрапляє в цей відрізок. За результатами обчислень можна намалювати функцію розподілу ймовірності рівня сумарної перешкоди на відрізку $0 \leq P_{\Sigma} \leq P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$.

Площа (S), яку обмежує графік функції розподілу ймовірності на відрізку $0 \leq P_{\Sigma} \leq P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$, дорівнює 1. Значення $P_{ep.}$, розділяє графік функції розподілу ймовірності на дві частини: площа однієї частини (відрізок $0 \leq P_{\Sigma} < P_{ep.}$) дорівнює v ; площа іншої частини (відрізок $P_{ep.} < P_{\Sigma} \leq P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$) дорівнює $1-v$.

Площа функції розподілу ймовірності, обмежена j -м відрізком (S_j) буде дорівнювати [60, 61]:

$$S_j = (P_j + P_{j-1}) g u_j g k^{-N}. \quad (2.8)$$

Послідовно підсумовуючи площі S_j , починаючи з $j=m$. Потім $j=m-1$ і т.д., знаходимо максимальне значення $j = x$, при якому $\sum_{j=x}^m s_j \leq 1 - v$. Значення P_{cp} буде рівне p_x . Точність розрахунків збільшується при збільшенні значень k та m .

На рис. 2.2 представлений розроблений алгоритм розрахунку сумарного рівня перешкод для методу, що дозволяє врахувати різницю фаз сигналів, що заважають, які прийшли в рецептор [2, 6 - 9, 41, 43].

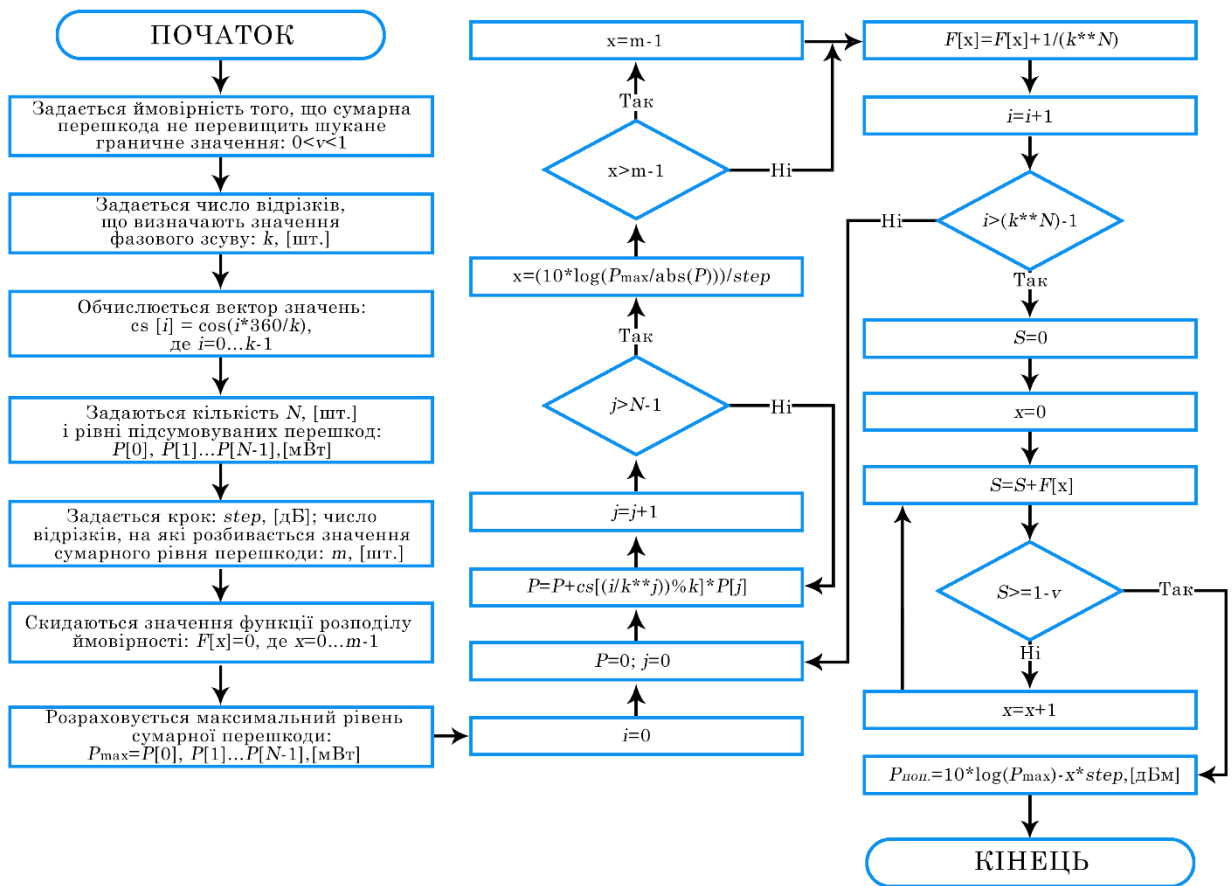


Рис. 2.2. Схема алгоритму обчислення сумарного рівня перешкод

На основі запропонованого алгоритму був проведений розрахунок для наступних вихідних даних [45 - 47, 55]:

- графік 1: рівні перешкод рівні: -45 дБ і -48 дБ; максимальний рівень сумарної перешкоди дорівнює -43,2 дБ; $k = 6$; $\text{step} = 1$ дБ.

- графік 2: рівні перешкод рівні: -45 дБ і -50 дБ; максимальний рівень сумарної перешкоди дорівнює -43,8 дБ; $k = 6$; $\text{step} = 1$ дБ.

Результати розрахунків показані на рис. 2.3 у вигляді графіків, де $P_{\text{гр.}} = P_{\text{max}} - V$, дБ.

Оскільки заважаючі сигнали, можуть впливати на приймач на різних ділянках спектра, то точну оцінку сумарного рівня перешкод можна провести, склавши (як показано вище) окремі спектральні складові всіх сигналів, що заважають.

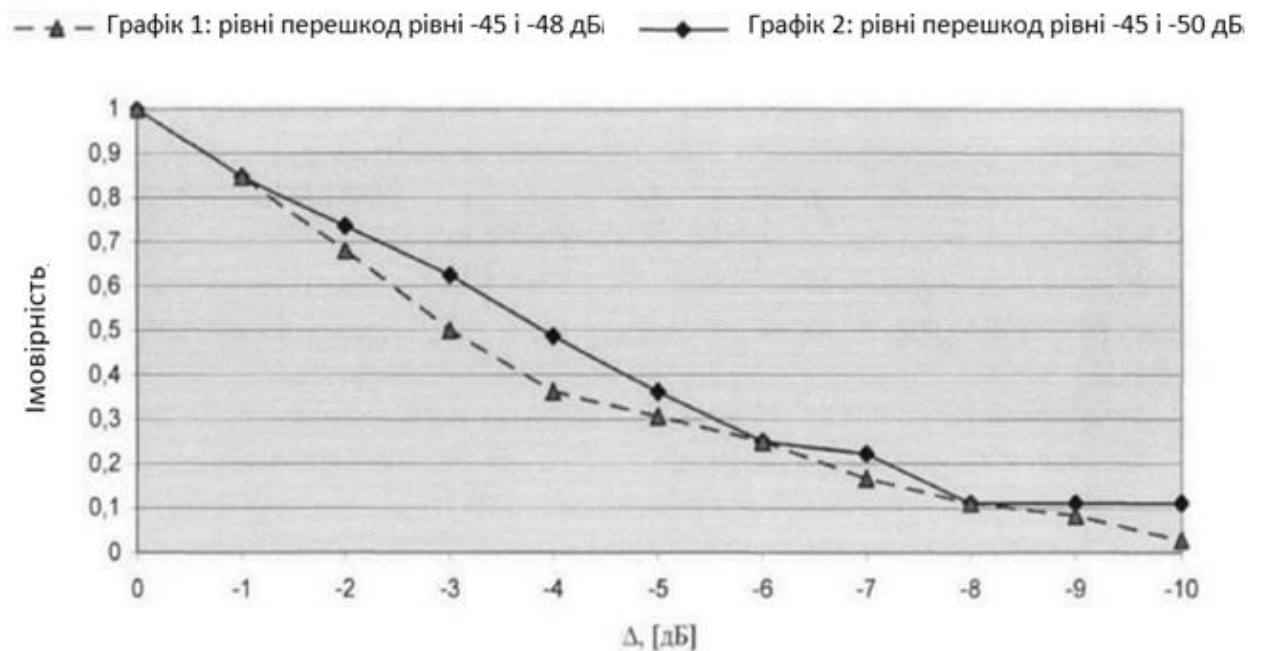


Рис. 2.3. Результати розрахунків сумарного рівня перешкод

Завдання по оцінці ЕМС в безпроводових комп'ютерних мережах стандарту IEEE 802.11

При оцінці ЕМС перш за все необхідно визначити джерела і рецептори сигналу. Трафік в безпроводовій мережі передається між МС і АР. Джерелом або рецептором сигналу може бути точка доступу або мобільна станція.

Антенa точки доступу має фіксоване розташування, яке не змінюється з часом. МС може розташовуватися в будь-якому місці стільника. Найбільші втрати поширення будуть, швидше за все, між точкою доступу і найбільш віддаленою від неї МС. Оцінка ЕМС зводиться, відповідно, до двох завдань [51, 53, 56, 57]:

- визначення рівня сигналу і перешкоди граничної МС, найвіддаленішої від точки доступу (з найбільшими втратами);
- визначення рівня сигналу, переданого найбільш віддаленою МС (з найбільшими втратами), і рівня перешкод в АР.

Траса поширення сигналу від АР до МС називається прямою, від МС до АР зворотною.

При оцінці внутрісистемної ЕМС в WLAN необхідно визначити джерела перешкод. Механізм доступу до середовища передачі визначає, що в одному стільнику може випромінювати тільки один передавач: точка доступу або мобільна станція. Отже, на заваді від сусіднього стільника може бути або АР або МС. Розташування точки доступу зафіксовано, а МС може перебувати в будь-якому місці стільника. У гіршому випадку, який і слід враховувати при оцінці ЕМС, МС буде розташовуватися на відстані, максимально близькій до рецептора. Рівень перешкоди від сусіднього стільника в рецепторі слід вважати рівним максимальної з двох можливих перешкод: від АР або найближчій МС сусіднього стільника. Якщо сусідніх стільників декілька, то і перешкод теж буде кілька [10, 11, 19, 38].

В діапазоні 2,4 ГГц найбільш часто міжсистемні радіоперешкоди створюються іншими безпроводовими локальними мережами.

2.2. Технічні вимоги до обладнання Wireless Local Area Network

В цьому підрозділі показані і проаналізовані вимоги до обладнання WLAN.

Передавачі

Однією з найважливіших характеристик радіостанції є потужність її передавача. Вихідна потужність вимірюється у лінії передачі, кабелі або антени і зазвичай вказується в ватах (Вт) або міліватах (мВт). Для порівняння потужності застосовується логарифмічна шкала. Відношення потужності вимірюється у децибелах (дБ). Виробники радіостанцій вказують їх потужність в дБ, тобто в децибелах по відношенню до потужності в 1 мВт, або в дБі, тобто в децибелах по відношенню потужності 1 Вт. Іншою важливою характеристикою передавача є його АЧХ. Вона визначає рівень позасмугового випромінювання, що створюється передавачем [41 - 44].

Приймачі

Радіоприймачі характеризуються, перш за все, їх чутливістю, яка визначається як мінімальний рівень сигналу, при якому приймач здатний задовільно декодувати інформацію. Поріг прийнятності визначається частотою появи помилкових бітів (BER), частотою появи помилкових пакетів (packet error rate, PER) або частотою появи помилкових фреймів (frame error rate, FER). Наприклад, стандарт IEEE 802.11a, при швидкості передачі даних 54 Мбіт / с і PER, що становить 10%, вказує мінімально прийнятну чутливість приймача рівній -65 дБ [7, 10, 63].

Чутливість приймача радіостанції залежить від рівня власного шуму приймача. Оскільки кожна схема модуляції має свої вимоги до відношення сигнал/шум (SNR), чутливість приймача вказується для конкретної швидкості передачі. У загальному випадку, чим вище швидкість передачі даних, тим більше рівень власного шуму приймача і необхідне відношення сигнал/шум. Отже, чутливість приймача зменшується.

Діапазон 2,400 - 2,483 ГГц

Дозволено використання даного частотного діапазону для побудови безпроводових мереж як всередині приміщень, так і поза ними з максимальною вихідною потужністю передавача до 1 Вт. На даний момент діапазон практично вичерпаний в містах для побудови мереж поза приміщеннями. Однак, для побудови мереж в будинках підходить якнайкраще, в основному за рахунок найбільшої зони покриття (на однаковій площі точок доступу доведеться ставити менше, ніж, наприклад, в діапазоні 5 ГГц). При побудові безпроводових мереж в приміщеннях для діапазону 2,4 ГГц не потрібно оформляти ліцензію. При цьому EIRP офісної системи безпроводової передачі даних не повинна перевищувати 100 мВт. Також рекомендується використовувати діапазон 2,4 ГГц, для побудови мереж в областях, поза великих населених пунктів. Основна причина та ж, - дальність зв'язку до 50 км і більше, із застосуванням зовнішніх підсилювачів. Крім того, обладнання для цього діапазону випускається давно, представлено великою кількістю виробників, і коштує відносно недорого [5, 41, 43, 64].

Діапазон 5,150-5,20 і 5,250-5,350 ГГц

Ці два діапазони розглядаються як для побудови WLAN всередині приміщень (за стандартом IEEE 802.11a), так і для розгортання територіально розподілених мереж масштабу міста. Для їх використання необхідно отримання ліцензії.

У діапазоні 5 ГГц порядок призначення радіочастот однаковий як для вуличних операторських мереж, так і для внутрішньоофісних мереж безпроводової передачі даних [10, 41, 43, 64].

Вимоги стандарту IEEE 802.11 до пристроїв, що використовує технологію DSSS

У табл. 2.1 представлені частотні канали WLAN діапазону 2,4 ГГц, що використовують технологію DSSS, і вказано, в яких країнах які з них використовуються [65, 66].

Таблиця 2.1. Частотні канали використовуються мережами IEEE 802.11, що працюють за технологією DSSS

Номер каналу	Основна частота, МГц	Частотні канали				
		FCC США	ETSI Україна	ETSI Франція	ETSI Іспанія	Японія
1.	2412	X	X	-	-	X
2.	2417	X	X	-	-	X
3.	2422	X	X	-	-	X
4.	2427	X	X	-	-	X
5.	2432	X	X	-	-	X
6.	2437	X	X	-	-	X
7.	2442	X	X	-	-	X
8.	2447	X	X	-	-	X
9.	2452	X	X	X	-	X
10.	2457	X	X	X	X	X
11.	2462	X	X	X	X	X
12.	2467	-	X	X	-	X
13.	2472	-	X	X	-	X
14.	2484	-	-	-	-	X

Мінімальний рівень переданої потужності повинен бути не менше 1 мВт.

Для країн, які застосовують правила ETSI, Європейський стандарт на телекомунікації (European Telecommunications Standard, ETS) EIRP обмежується рівнем 100 мВт (20 дБ) [67, 68].

Щодо центральної частоти, спектральні складові випромінюваного сигналу повинні мати рівень менш -30 дБ на частотах, віддалених від несучої на 11 МГц, і менш -50 дБ па частотах, віддалених від несучої більш ніж на 22

МГц [42, 45, 63]. На рис. 2.4 показана спектральна маска сигналу, що регламентується стандартом IEEE 802.11 [69].

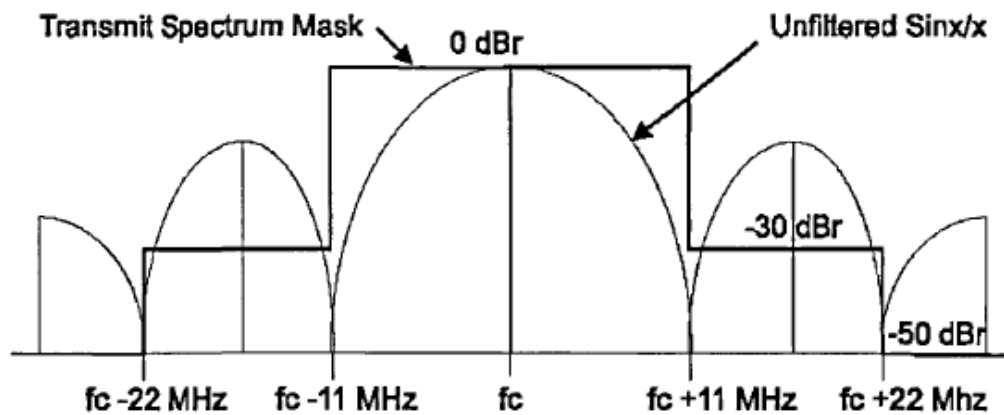


Рис. 2.4. Спектральна маска стандарту IEEE 802.11(DSSS)

Для швидкості роботи 2 Мбіт/с (DQPSK-модуляція), має забезпечуватися $FER \leq 8 \cdot 10^{-2}$ при MPDU довжиною 1024 байт для вхідного рівня сигналу -80 дБ, виміряного в з'єднувачі антени. Відповідно, чутливість при цих умовах повинна бути менше або дорівнює -80 дБ [2, 5, 42, 46].

Також приймач повинен забезпечити $FER \leq 8 \cdot 10^{-2}$ для MPDU довжиною 1024 байти, для максимального вхідного рівня сигналу -4 дБ, виміряного в антені (для 2 Мбіт/с, DQPSK-модуляція).

У виділеному діапазоні можна розмістити 3 канала, що не перекриваються.

Відстань між центральними частотами двох каналів, що не перекриваються більше або дорівнює 30 МГц.

Стандарт вимагає, що б приймач забезпечував роботу при рівні перешкоди від сусіднього каналу, що перевищує рівень сигналу не більше ніж на 35 дБ (при дотриманні вимог до спектральної маски, визначених стандартом) [56 - 58].

Слід звернути увагу, що в стандарті IEEE 802.11b, канал, що не перекриваються - це канал, з центральною частотою відрізняється не менше,

ніж на 25 МГц. А в стандарті IEEE 802.11 DSSS на 30 МГц. Проте, загальноприйнято вважати різницю між центральними частотами сусідніх каналів, що не перекриваються 25 МГц.

Вимоги стандарту IEEE 802.11b

Вимоги до передавача (рівні потужності і спектральна маска) пред'являються також, як для технології DSSS в стандарті IEEE 802.11.

Для швидкості роботи 11 Мбіт/с (ССК-модуляція), має забезпечуватися $FER \leq 8 \cdot 10^{-2}$ при PSDU довжиною 1024 октету для вхідного рівня сигналу -76 дБ, вимірюного в з'єднувачі антени. Відповідно, чутливість при цих умовах повинна бути менше або дорівнює -76 дБ.

Також приймач повинен забезпечити $FER \leq 8 \cdot 10^{-2}$ для PSDU довжиною 1024 октету, для максимального вхідного рівня сигналу -10 дБ, вимірюного в антені (для 11 Мбіт/с, ССК-модуляція) [2, 5].

Відстань між основними частотами двох аналів, що не перекриваються більше або дорівнює 25 МГц. Стандарт вимагає, що б приймач забезпечував роботу при рівні перешкоди від сусіднього каналу, що перевищує рівень сигналу не більше ніж на 35 дБ (при дотриманні вимог до спектральної масці, визначених стандартом).

Вимоги стандарту IEEE 802.11a

Частоти діапазону U-NII доступні в основному у США і країнах, які прийняли правила використання спектра FCC-типу. Діапазон U-NII 1 простягається від 5,15 до 5,25 ГГц, діапазон U-NII 2 безпосередньо межує з ним і простягається від 5,25 до 5,35 ГГц, а діапазон U-NII 3 займає ділянку 5,725-5,825 ГГц [11,12, 18, 26]. Нумерація каналів починається з позначки 5,000 ГГц, і номер каналу збільшується на 1 через кожні 5 МГц. Подібний спосіб позначення дає схему нумерації каналів, що дозволяє охопити всі частоти всього діапазону 5 ГГц, які коли-небудь будуть використані в WLAN. На рис. 2.5 представлені канали, що не перекриваються діапазонів U-NII I, U-NII 2 і U-NII 3 [70]. Центральні частоти (діапазонів U-NII 1 і 2) крайніх каналів

відстоять на 30 МГц від граничних частот діапазону. Центральні частоти діапазону U-NII 3 відстоять лише на 20 МГц від граничних частот діапазону. Цей факт важливо пам'ятати при розгляді вимог до побічного радіовипромінюванню і спектральної маски для цього діапазону, тому що виконувати їх розробникам радіотракта складніше, ніж аналогічні вимоги нижніх діапазонів.

При застосуванні зовнішніх антен необхідно мати інформацію про вимоги, що пред'являються до спектральної маски і побічного радіовипромінюванню. Коли виробники сертифікують свої радіостанції і антени на предмет відповідності вимогам FCC [70] вони задають рівні, базуючись не тільки на межах EIRP, але також на обмеження, обумовлених цією спектральною маскою. Коефіцієнт підсилення антени і рівні потужності необхідно приводити у відповідність до вимог спектральної маски [69, 70].

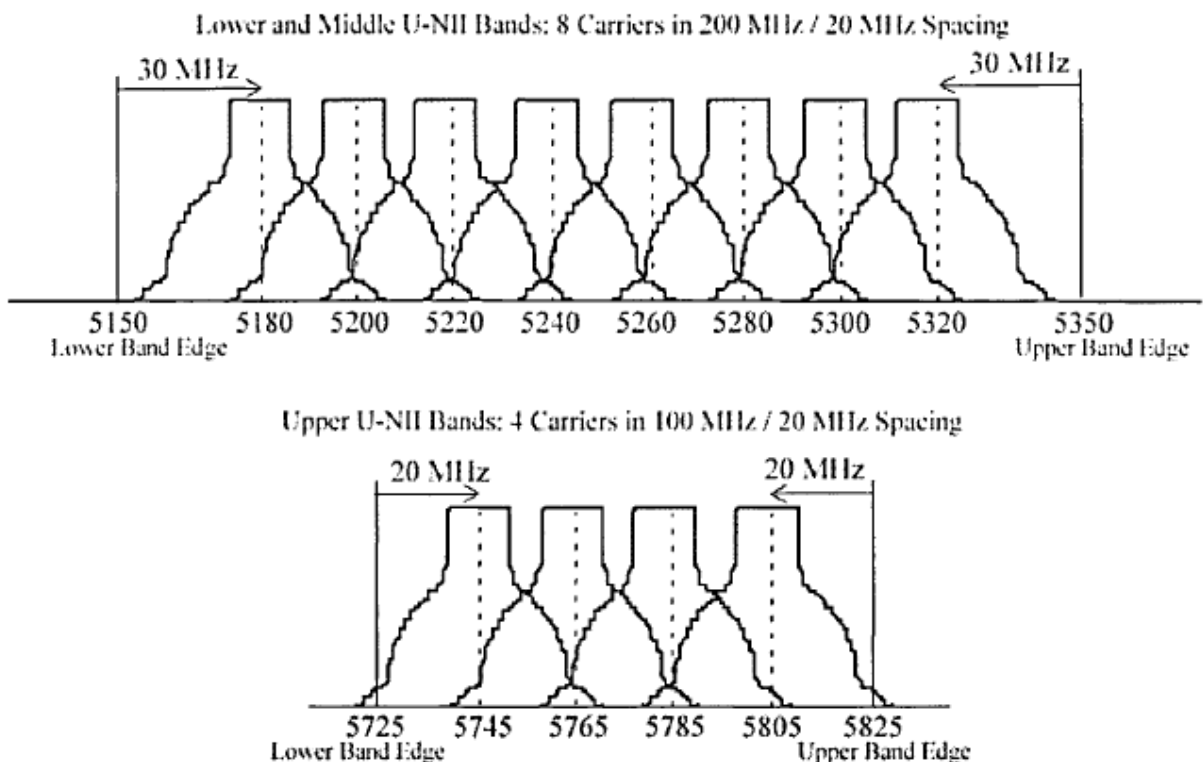


Рис. 2.5. Канали діапазонів U-NII 1, U-NII 2 та U-NII 3

Три діапазони U-NII мають різні обмеження на потужність випромінювання. U-NII 1 призначений для використання пристроями, розрахованими па роботу тільки в приміщеннях, при найменших рівнях випромінювання. Діапазон U-NII 3 має найвищі рівні, тому що він призначений для пристроїв, що працюють поза приміщеннями і на великих відстанях. У діапазонах U-NII встановлені наступні обмеження на випромінюється потужність [71]:

- В діапазоні U-NII 1 можна використовувати передавач потужністю до 40 мВт, 16 дБ і антену з коефіцієнтом підсилення до 6 дБі при максимумі EIRP, що становить 22 дБ. Крім того, при кожному підвищенні коефіцієнта підсилення антени на 1 дБ понад 6 дБі яку випромінює потужність повинна бути знижена на 1 дБ.

- В діапазоні U-NII 2 можна використовувати передавач потужністю до 200 мВт, 23 дБ і антену з коефіцієнтом підсилення до 6 дБі при максимумі EIRP, що становить 29 дБ. Крім того, при кожному підвищенні коефіцієнта підсилення антени на 1 дБ понад 6 дБі яку випромінює потужність повинна бути знижена на 1 дБ.

- В діапазоні U-NII 3 можна використовувати передавач потужністю до 800 мВт, 29 дБ і антену з коефіцієнтом підсилення до 6 дБі при максимумі EIRP, що становить 35 дБ. Крім того, при кожному підвищенні коефіцієнта підсилення антени на 1 дБ понад 6 дБі випромінювана потужність повинна бути знижена на 1 дБ. При роботі в діапазоні U-NII 3 можна використовувати антену на 23 дБі.

Стандарт IEEE 802.11a визначає спектральну маску для передачі в діапазонах U-NII. Переданий спектр повинен бути на рівні 0 дБ по відношенню до максимуму спектральної щільності сигналу аж до максимальної ширини смуги частот 18 МГц, а потім він повинен бути менше -20 дБ “на відстані” 11 МГц від центральної частоти, -28 дБ на частотах, віддалених від центральної

на 20 МГц, і -40 дБ для частот, віддалених від центральної на 30 МГц і більше [10]. Ця спектральна маска показана на рис. 2.6 [69 - 71].

Аналогічно IEEE 802.11b, стандарт IEEE 802.11a також визначає мінімально допустимі параметри радіостанції. Це мінімальна чутливість приймача, допустиме перевищення рівня перешкоди від сусіднього каналу (різниця в центральних частотах не менше 20 МГц) над рівнем сигналу і допустиме перевищення рівня перехресної перешкоди від сусіднього каналу (різниця у центральних частотах не менше 30 МГц) над рівнем сигналу (alternate adjacent channel rejection) на з'єднувачі антени для швидкостей передачі даних стандарту IEEE 802.11a при PER менше 10% і довжині PSDU 1000 байт [10].

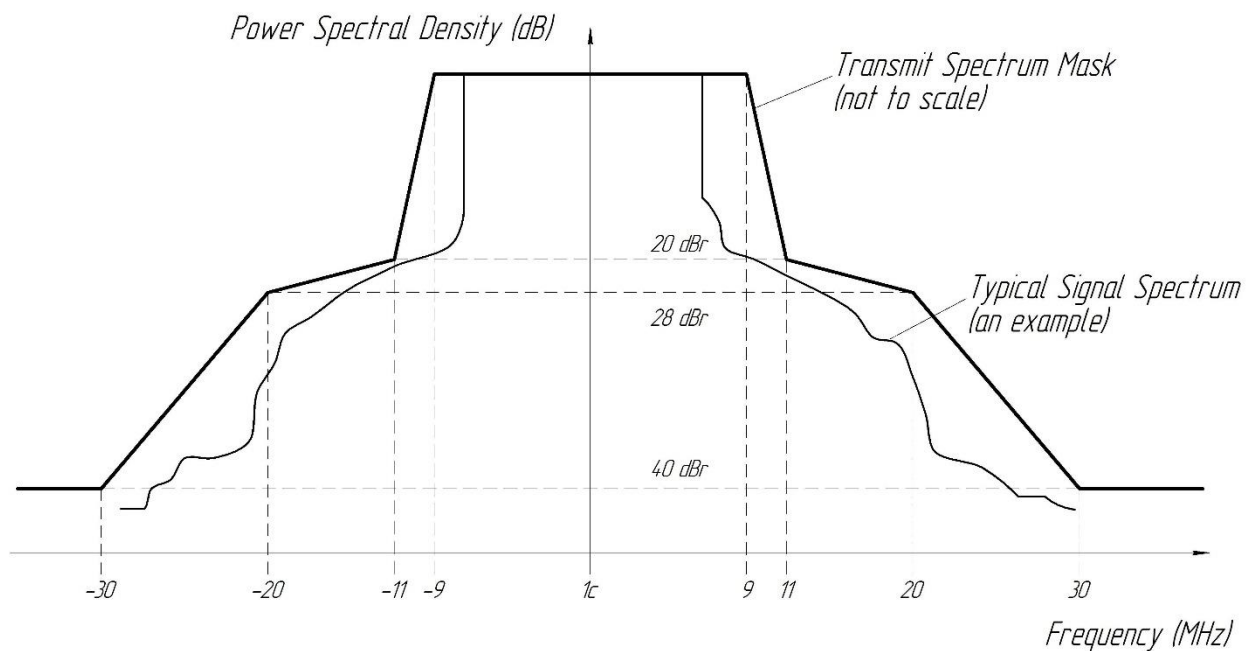


Рис. 2.5. Спектральна маска

Приймач повинен забезпечити максимум $PER = 10\%$ для PSDU довжиною 1000 байт, для максимального вхідного рівня сигналу -30 дБ, виміряного в антені (для будь-якої модуляції) [10].

Вимоги стандарту IEEE 802.11g

Обладнання цього стандарту використовує ту ж смугу частот і ті ж частотні канали, що і стандарт IEEE 802.11b. Максимальний рівень випромінюваної потужності обмежений регулюючими органами і становить $EIRP = 100$ дБ.

Вимоги до спектральної маски визначаються використовуваною модуляцією. Для режимів ERP-OFDM використовується спектральна маска стандарту IEEE 802.11a, для режимів ERP-DSSS і ERP-PBCC спектральна маска стандарту IEEE 802.11b.

У режимах ERP-DSSS мінімальна чутливість визначається так само як і для стандарту IEEE 802.11b [12, 71 - 73].

Для швидкості роботи 22 Мбіт/с (ERP-PBCC-модуляція) при PSDU довжиною 1024 октету. $FER \leq 8 \cdot 10^{-2}$ для вхідного рівня сигналу -76 дБ, виміряного у з'єднувачі антени. Відповідно, чутливість при цих умовах повинна бути менше або дорівнює -76 дБ. Для роботи на швидкості 33 Мбіт/с (ERP-PBCC-модуляція) мінімальна чутливість дорівнює -74 дБ. Сусідні канали визначені, як віддалені один від одного на 25 МГц [72, 73].

Для режимів ERP-OFDM вимоги до мінімальної чутливості, допустиме перевищення рівня перешкоди від сусіднього каналу (різниця в центральних частотах не менше 20 МГц) і допустиме перевищення рівня перехресної перешкоди від сусіднього каналу (різниця в центральних частотах не менше 30 МГц) задаються такі ж, як і для стандарту IEEE 802.11a [10, 11, 72].

Стандарт вимагає, що б в режимах ERP-DSSS і ERP-PBCC приймач забезпечував роботу при рівні перешкоди від сусіднього каналу (різниця в центральних частотах понад 25 МГц), що перевищує рівень сигналу не більше ніж на 35 дБ (при дотриманні вимог до спектральної маски, визначених стандартом) [12, 72].

Приймач повинен забезпечити $FER < 10\%$ для PSDU довжиною 1000 байт, для максимального вхідного рівня сигналу -20 дБ, виміряного в

з'єднувачі антени (для будь-якого підтримуваного типу модуляції, тобто 1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 22, 24, 33, 36, 48, 54 Мбіт/с) [12, 73].

Аналіз АЧХ передавачів стандарту IEEE 802.11b

На рис. 2.7 ... 2.12 наведені результати вимірювань АЧХ різних пристроїв. Всі АЧХ були виміряні на 7 частотному каналі 2442 МГц з використанням спектрального аналізатора Rohde & Schwarz AMIQ-K19 [74].

За паспортними даними виробника потужність випромінювання пристрою Linksys WET11 становить 15 дБ, проте реально цей показник більше.

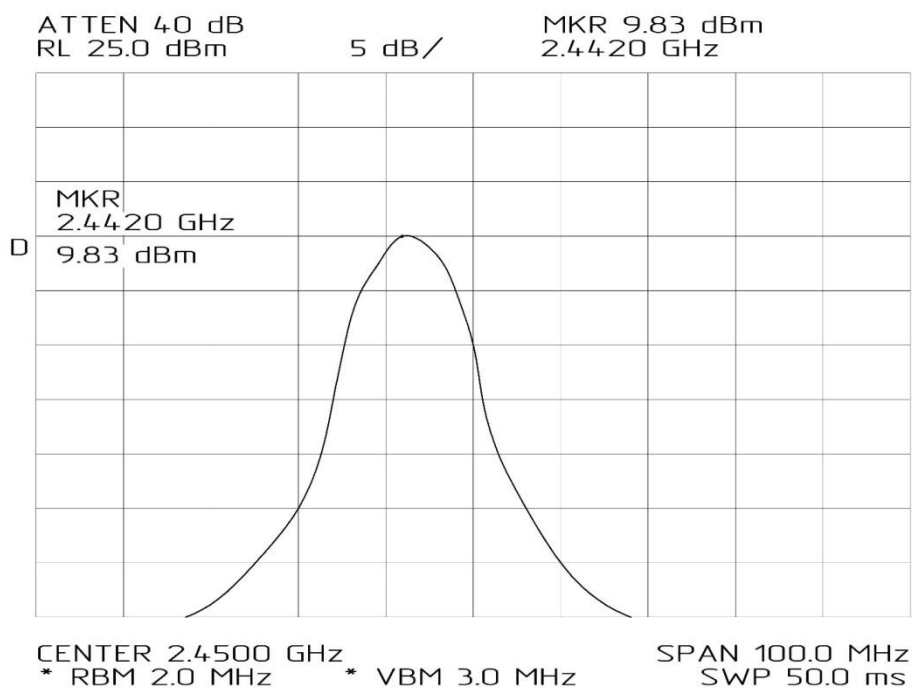


Рис. 2.7. D-Link DWL650

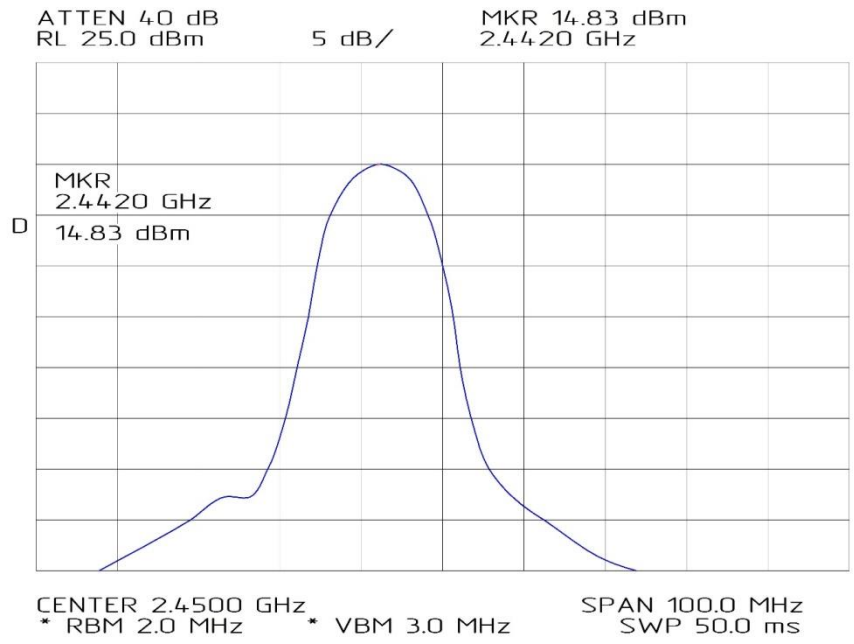


Рис. 2.8. D-Link DWL810

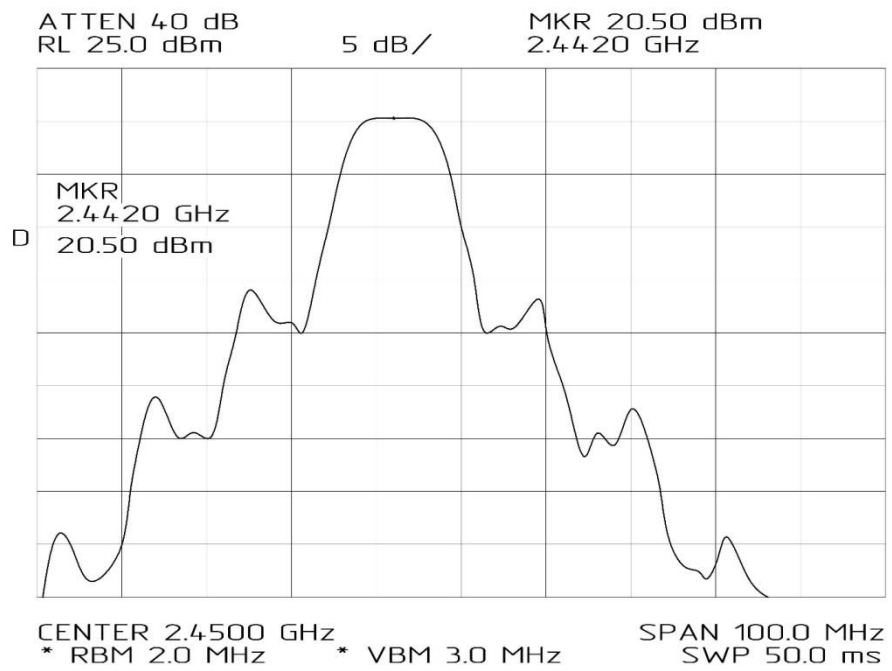


Рис. 2.9. Linksys WET11

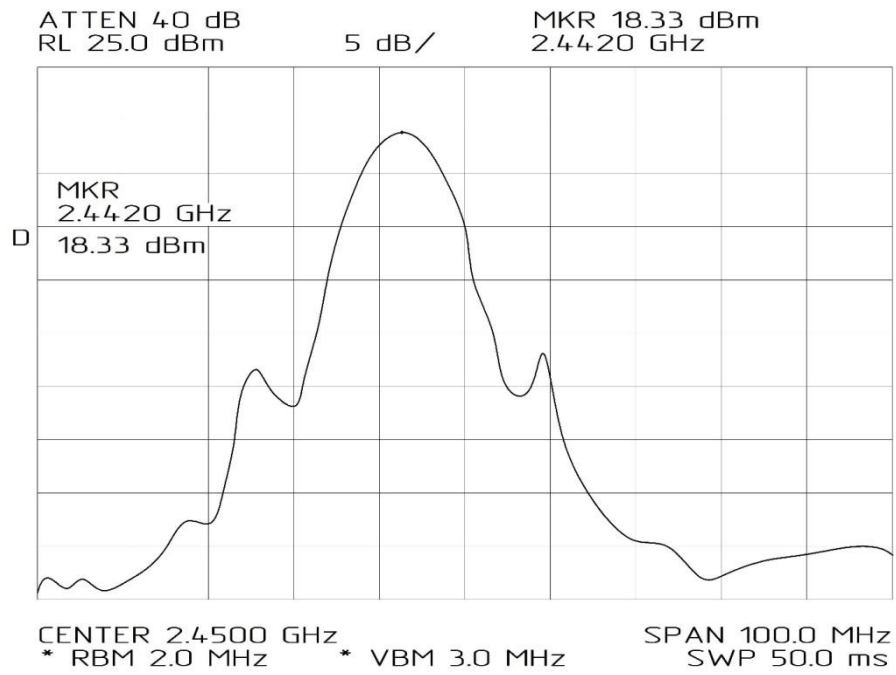


Рис. 2.10. AirBridge

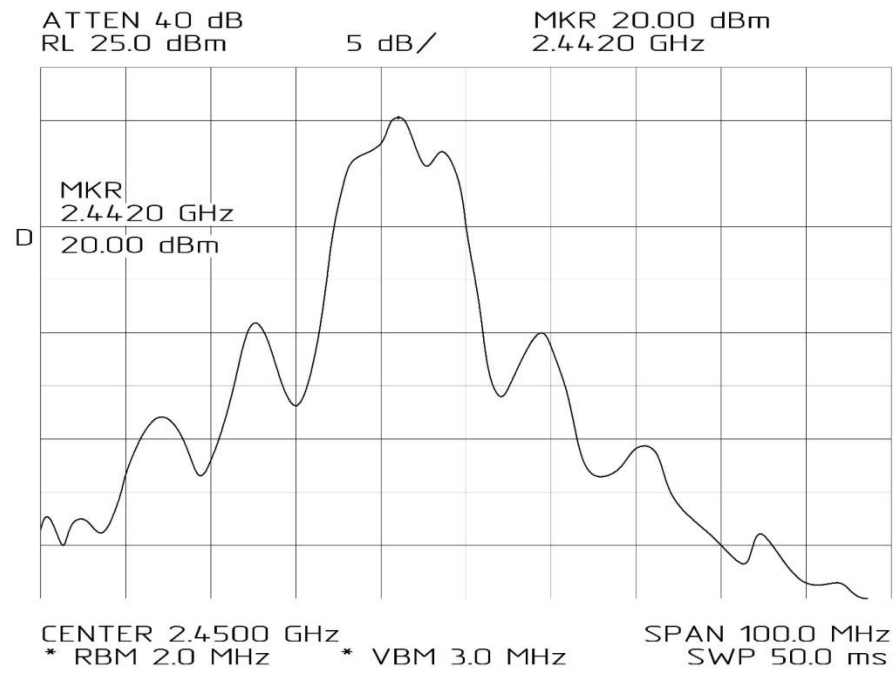


Рис. 2.11. BreezeCom DS.11

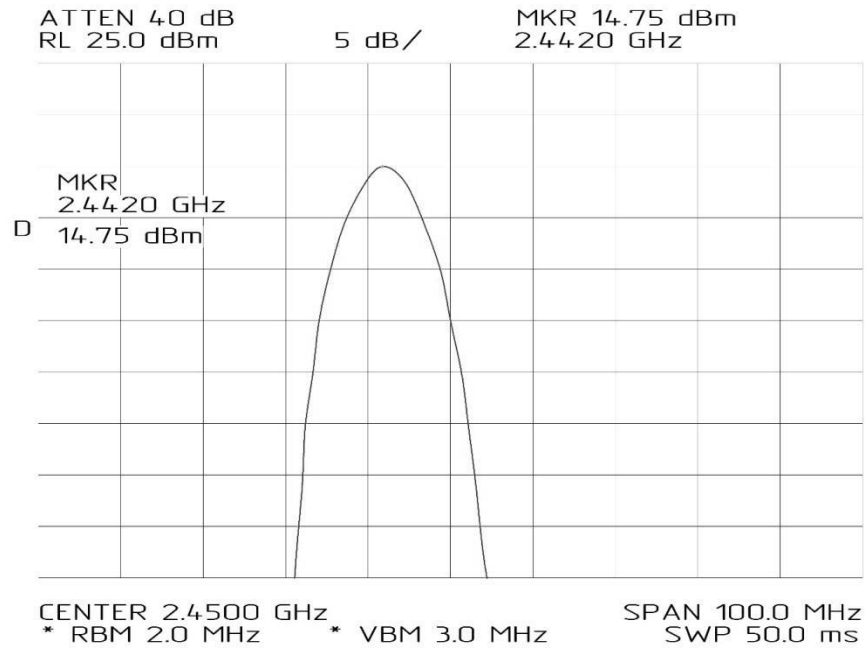


Рис. 2.12. Orinoco

В принципі рівень випромінювання задовольняє вимогам стандарту, але може привести до перевищення вимог до EIRP при використанні спрямованих антен. Рівень позасмугового випромінювання цієї карти вище, ніж у більшості пристроїв. Виробник (Alvarion) заявляє вихідну потужність 14 дБ. Реально її величина становить 20 дБ, причому позасмугове випромінювання даного пристрою перевищує аналогічні показники інших пристроїв. Це може привести до порушення вимог до EIRP при використанні антен з КП більше 0. Радіокarti Orinoco (чіпсет Agere Systems-Lucent Technologies) мають найбільш чистий і вузький спектр в порівнянні з усіма іншими тестованими пристроями. Відповідно, серед перерахованих пристроїв, з точки зору забезпечення ЕМС, обладнання, побудовані на цих чіпсетах, є оптимальним вибором при проектуванні безпроводових мереж.

2.3. Механізм резервування середовища передачі

Для зменшення впливу внутрішньосистемних перешкод від сусідніх стільників, що працюють на одному частотному каналі був розроблений вдосконалений механізм резервування середовища передачі. Існуючий

механізм призначений для резервування середовища передачі (RTS/CTS) призначений для організації безконфліктно радіозв'язку всередині одного стільника. Основна ідея механізму RTS/CTS полягає в передачі точкою доступу керуючого фрейму, що містить в полі тривалості час, протягом якого МС могла б завершити обмін кадрами. Поки не закінчиться зазначений час, інші станції не намагаються отримати доступ до середовища передачі. При наявності незалежних передавачів, що працюють на однаковій частоті з стільником, цей механізм стає неефективний. При наявності в мережі трьох і більше стільників, доводиться повторно використовувати одні і ті ж частотні канали в різних стільниках. Передавачі сусідніх стільників працюють незалежно один від одного, тому створювані ними взаємні перешкоди порушують роботу безпроводової мережі. Для вирішення цієї проблеми пропонується вдосконалений механізм резервування середовища передачі [8, 9, 12, 18, 29, 30, 31].

В WLAN передача може вестися між МС і точкою доступу; між МС джерелом сигналу, точкою доступу (яка виступає, по суті, як ретранслятор) і МС-рецептором сигналу; або між двома МС. Для того, щоб сигнал був правильно прийнятий адресатом, в кожному з рецепторів в цей час має бути відсутня радіоперешкода, яка може пошкодити сигнал. Для резервування середовища передачі пропонується використовувати схему, показану на рис. 2.13 [6, 8, 12, 28, 75, 76].



Рис. 2.13. Процес передачі даних за допомогою вдосконаленого механізму резервування середовища передачі

Крок 1. Фрейм RTS перед передачею повинен пройти процедуру DCF (як і в стандартному механізмі резервування середовища передачі). При цьому генерується таймер випадкової затримки. Фрейм RTS містить сумарний час, необхідний для отримання фрейму резервування середовища приймачем (фрейм CTS); для передачі фрейму даних; для отримання фрейму підтвердження. Точки доступу і МС, що знаходяться в зоні дії станції-відправника, збільшують вектор розподілу (NAV) до цієї величини.

Крок 2. Фрейм CTS, як і в стандартному механізмі резервування середовища передачі, повинен пройти процедуру DCF. Процедура випадкової затримки при цьому не виконується і фрейм CTS надсилається через час, що задається інтервалом SIFS. Фрейм CTS містить час, необхідний для передачі інформації станцією відправником і фрейму підтвердження станцією одержувачем. Може скластись, що станція-одержувач повинна чекати звільнення середовища більше часу, ніж відведено для резервування прийому. В цьому випадку фрейм CTS не посилається. Фрейм CTS отримують всі станції і точки доступу, що знаходяться в зоні дії станції-рецептора. Вони збільшують значення NAV до зазначеного в фреймі CTS. Станція-відправник після отримання фрейму CTS може починати передачу фрейму даних. Якщо станція-відправник з якихось причин не отримала фрейм CTS після закінчення часу, відведеного на резервування середовища в приймачі, то вона не може почати передачу і повинна заново намагатися зарезервувати середовище [75 - 77].

Крок 3. Станція-відправник посилає фрейм даних. Фрейм повинен пройти стандартну процедуру DCF. При цьому виключається процедура випадкової затримки і фрейм даних передається через час, що задається інтервалом SIFS. Якщо минув час, відведений для передачі фрейму даних, то він не передається і станція-відправник повинна заново резервувати середовище.

Крок 4. Після отримання фрейму даних, станція-одержувач відправляє кадр підтвердження. При цьому виключається процедура випадкової затримки і фрейм підтвердження передається через час, що задається інтервалом SIFS. Якщо станція-відправник не одержує фрейм-підтвердження протягом заданого часу, то вона вважає, що дані не доставлені і потрібно їх повторна передача. Всі станції, отримали фрейм підтвердження, знищують інформаційні блоки, пов'язані з цим сеансом передачі. Станції, які отримали фрейм CTS, але не отримали фрейм підтвердження чекають закінчення часу

життя інформаційного блоку, а потім знищують його. Якщо передача ведеться між МС за допомогою точки доступу, то точка доступу може передати кадр резервування середовища передачі разом з фреймом підтвердження.

У вдосконаленому механізмі резервування середовища передачі задіяні такі стандартні фрейми [78, 79]:

- фрейм резервування середовища джерелом, RTS (пріоритет дорівнює 0);
- фрейм резервування середовища одержувачем, CTS (пріоритет дорівнює 1);
- фрейм даних (пріоритет дорівнює 2);
- фрейм-підтвердження доставки даних (пріоритет дорівнює 3).

Керуючі фрейми RTS, CTS, фрейм-підтвердження слід з максимальною потужністю, в режимі, який характеризується найменшими вимогами до відношенню сигнал/перешкода і підтримується всіма станціями-приймачами (швидкість передачі 1 Мбіт/с). Для того щоб заголовки фреймів даних могли прийняти всі приймально-передавальні станції, що знаходяться поблизу, їх бажано передавати способом, аналогічним способу передачі керуючих фреймів.

При використанні вдосконаленого механізму резервування середовища передачі в мережі необхідно, щоб наступні параметри були синхронізовані і рівні для кожного приймача WLAN [8, 9, 12, 79, 80]:

- час очікування фрейму CTS;
- час передачі фрейму CTS;
- час очікування фрейму даних;
- час очікування фрейму підтвердження;
- час передачі фрейму підтвердження.

При прийомі або запиті на передачу фрейму створюється інформаційний блок, що містить наступні дані:

- Ідентифікатор фрейму даних, для передачі якого створений цей інформаційний блок (IDD);

- Ідентифікатор відправника фрейму даних (IDT);
- Ідентифікатор одержувача фрейму даних (IDR);
- Початок відліку часу життя інформаційного блоку (ST);
- Час життя інформаційного блоку (timeout);
- Стан інформаційного блоку (status);
- Дія, що виконується при активізації інформаційного блоку (action).

Вектор розподілу мережі (NAV) визначається з інформаційного блоку, що забороняє передачу і має найбільший час життя.

У табл. 2.2 показані відмінності стандартного і вдосконаленого механізму резервування середовища передачі [79, 80].

У стандартному механізмі резервування середовища, при передачі даних від пункту доступу до МС можливість резервування середовища відсутні. Завдяки використанню фреймів RTS/CTS і в точці доступу і в МС, резервування середовища можливо при передачі даних в будь-якому напрямку. У стандартному механізмі резервування середовища відбувається тільки всередині одного стільника, фрейми RTS/CTS від сусідніх стільників ігноруються. При наявності поблизу стільників, які працюють на перекритих частотних каналах, робота стандартного механізму RTS/CTS блокується. У вдосконаленому механізмі, резервування середовища проводиться у всіх взаємодіючих приймачів WLAN, що працюють на частотних каналах, що перекриваються. Керуючі фрейми RTS, CTS і фрейм підтвердження приймаються всіма взаємодіючими МС і АР. Тому, для охоплення всіх пристроїв WLAN, швидкість передачі береться мінімальної, а потужність передачі дорівнює максимуму, визначеному цього пристрою.

Далі наведені розроблені алгоритми вдосконаленого механізму резервування середовища передачі (рис. 2.14 - 2.24) [75].

Таблиця 2.2. Відмінності стандартного і вдосконаленого механізму резервування середовища передачі

Стандартний механізм резервування середовища передачі	Вдосконалений механізм резервування середовища передачі
Фрейм RTS може бути відправлений тільки від МС до точки доступу.	Фрейм RTS може відправити і МС і точка доступу.
Фрейм CTS може бути відправлений тільки від АР до точки доступу.	Фрейм CTS може відправити і МС і точка доступу.
При передачі даних між МС через АР, фрейм підтвердження спочатку надсилається МС-одержувачем точки доступу, а потім точка доступу пересилає фрейм підтвердження МС-відправнику	При передачі даних між МС через АР, спочатку підтверджується доставка даних до точки доступу, а потім доставка даних від точки доступу МС одержувачу.
Застосовується тільки в топологіях BSS або ESS.	Може застосовуватися в топологіях BSS, ESS або IBSS (працює без точки доступу взагалі).
Для розширення стільники застосовуються АР-повторювачі.	Замість точки АР-повторювача можна встановити повнофункціональну точку доступу, що працює на тому ж частотному каналі і має власне підключення до системи розподілу.

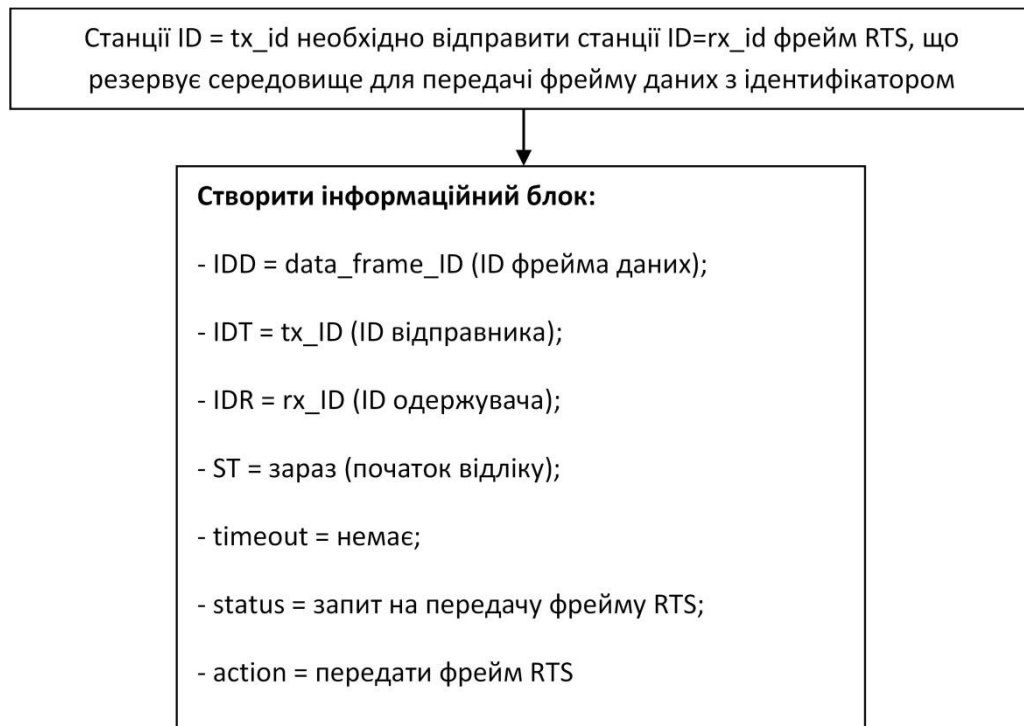


Рис. 2.14. Запит на відправку фрейму RTS

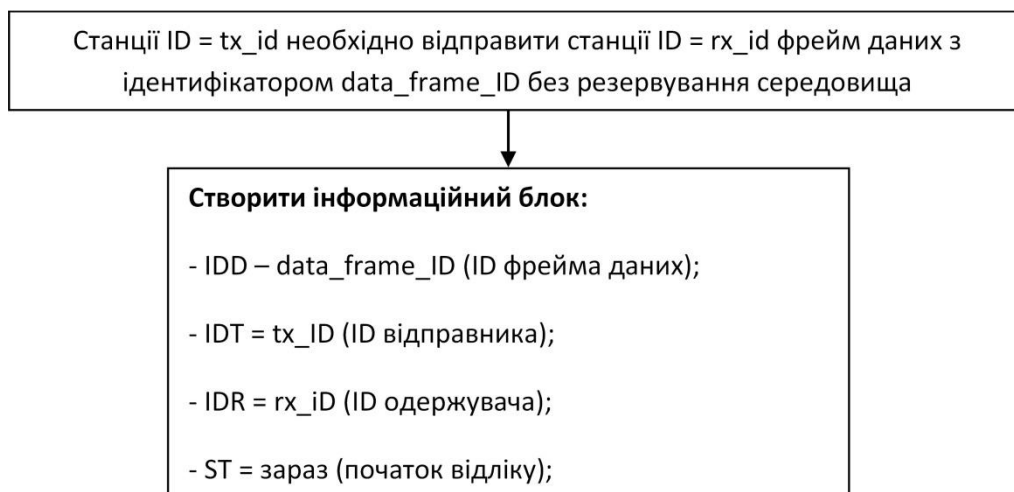


Рис. 2.15. Запит на відправку фрейму даних без попереднього резервування середовища передачі

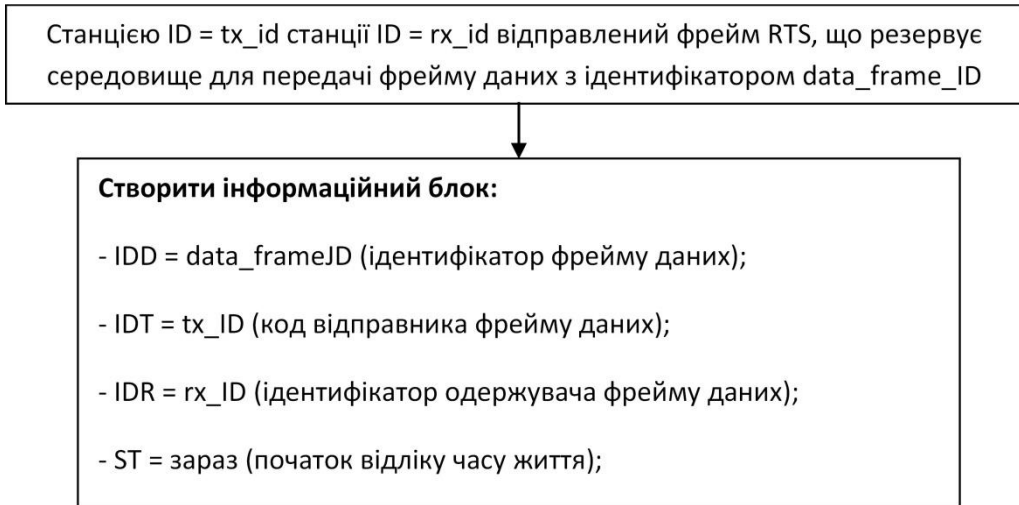


Рис. 2.16. Відправка фрейму RTS

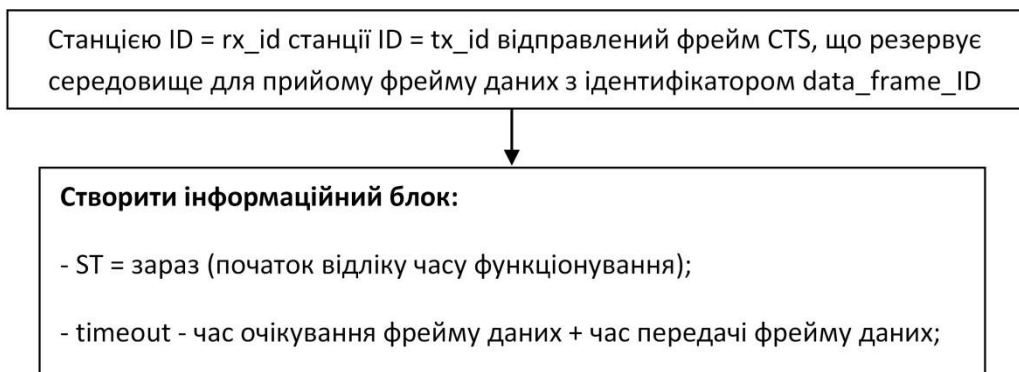


Рис. 2.17. Відправка фрейму CTS

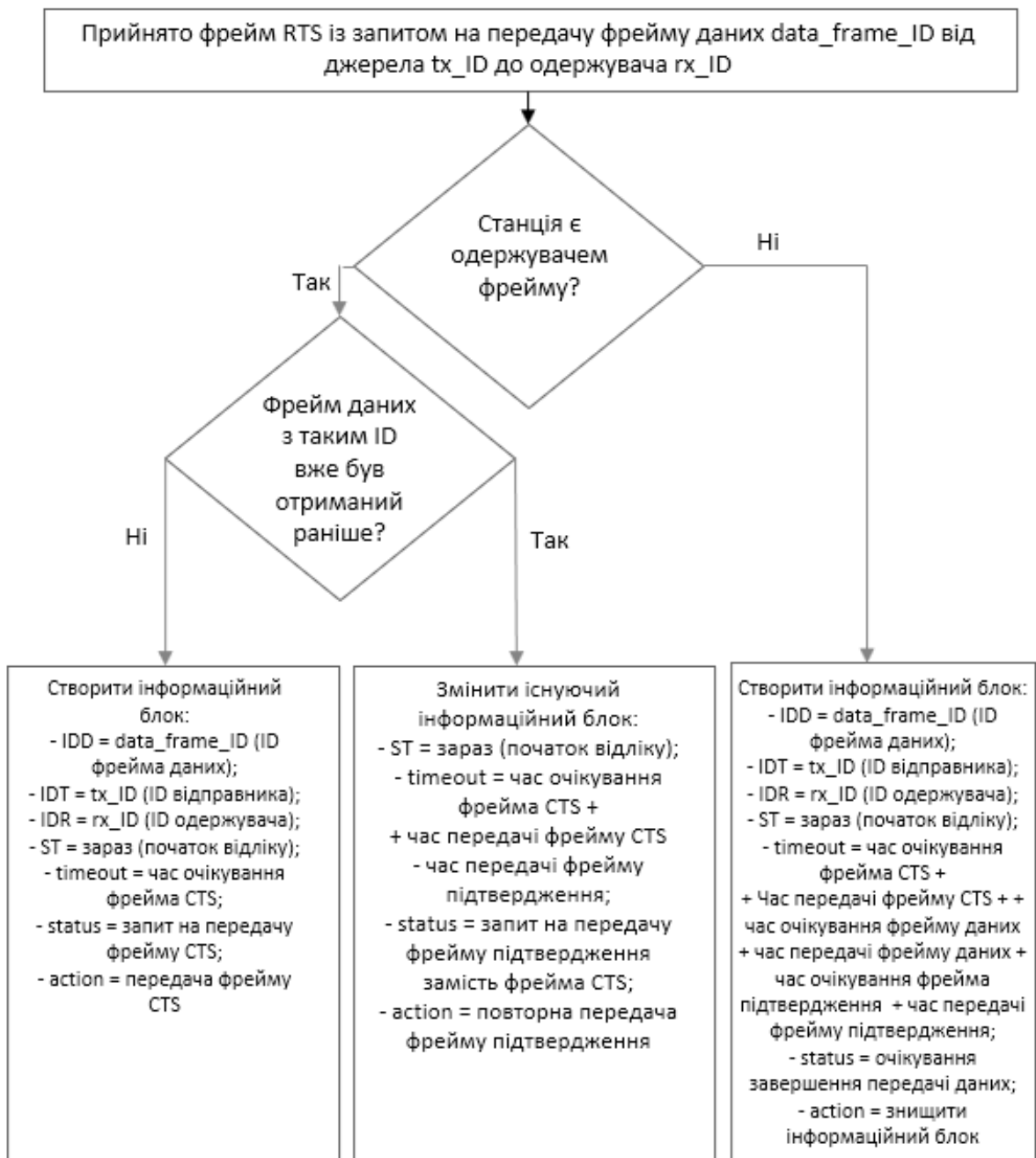


Рис. 2.18. Отримання фрейму RTS

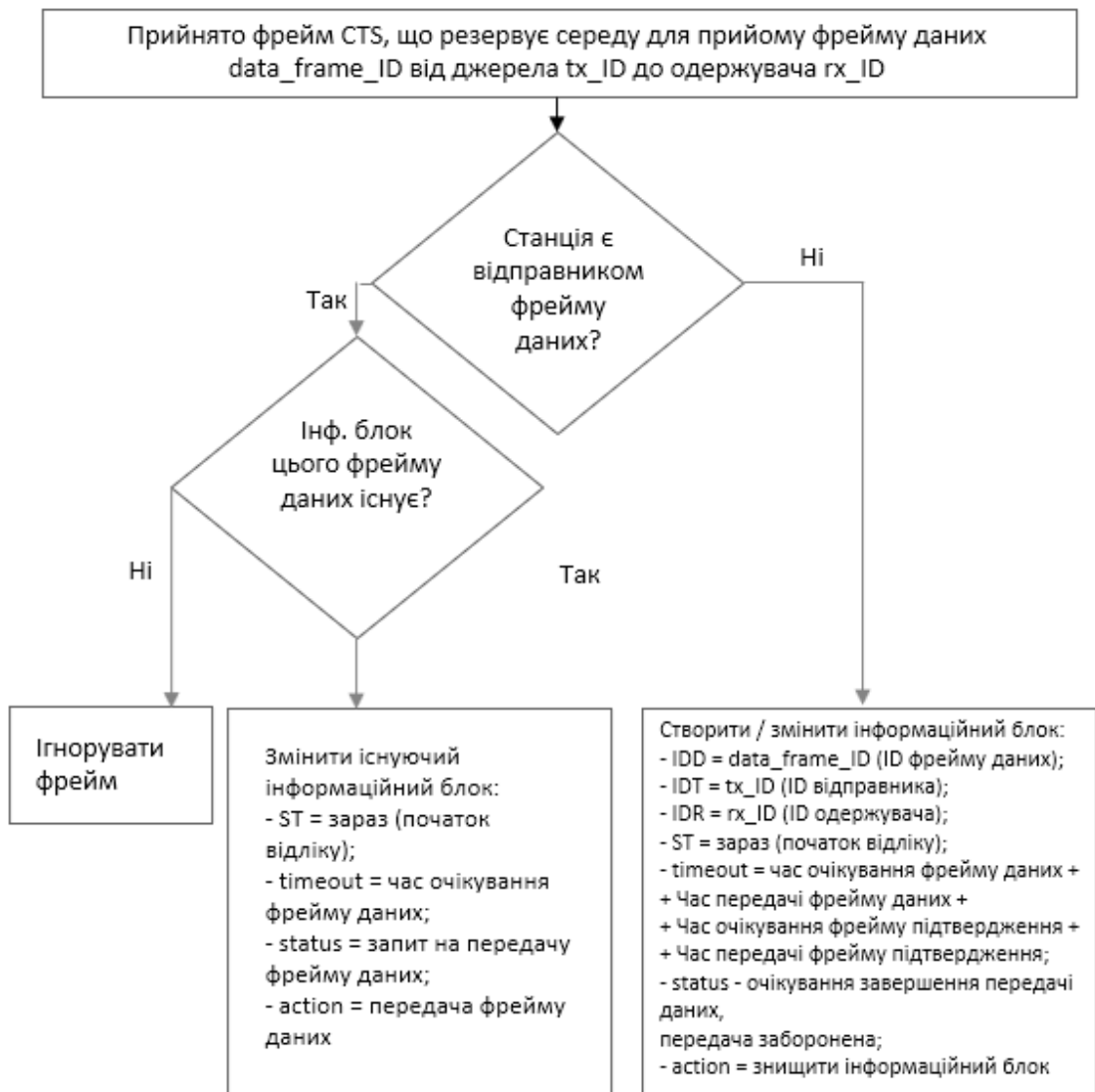


Рис. 2.19. Отримання фрейму CTS

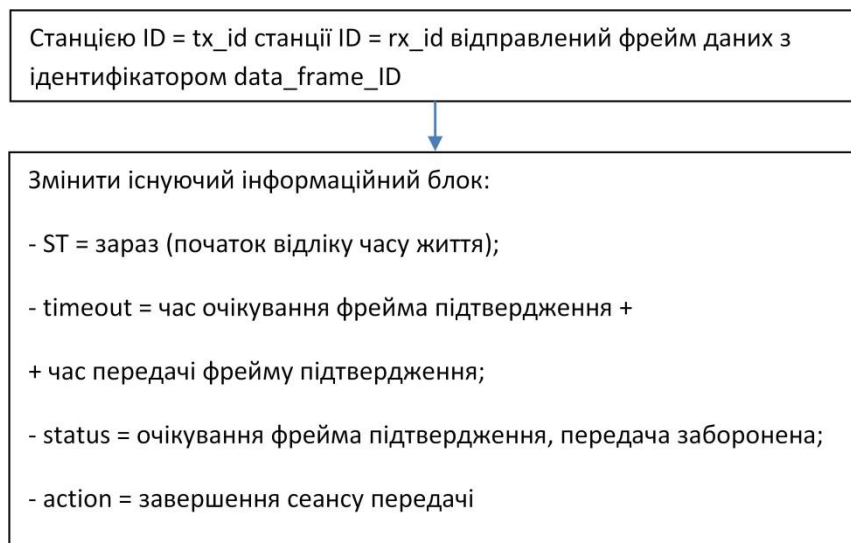


Рис. 2.20. Відправка фрейму даних

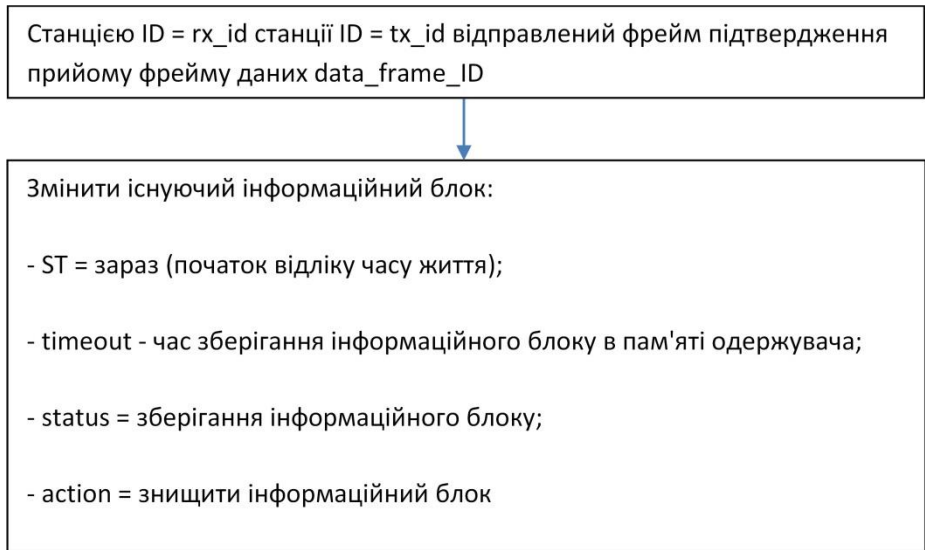


Рис. 2.21. Відправка фрейму підтвердження

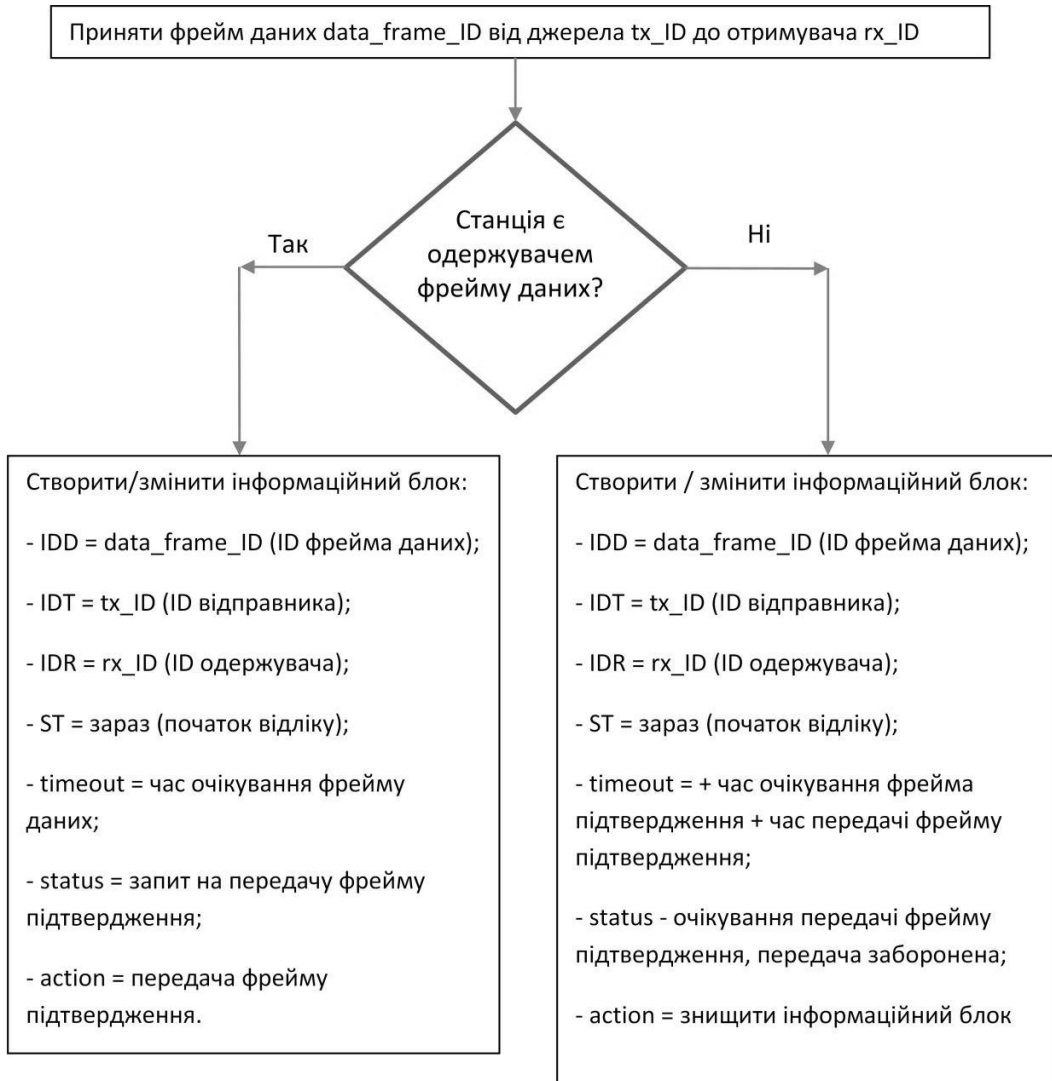


Рис. 2.22. Отримання фрейму даних

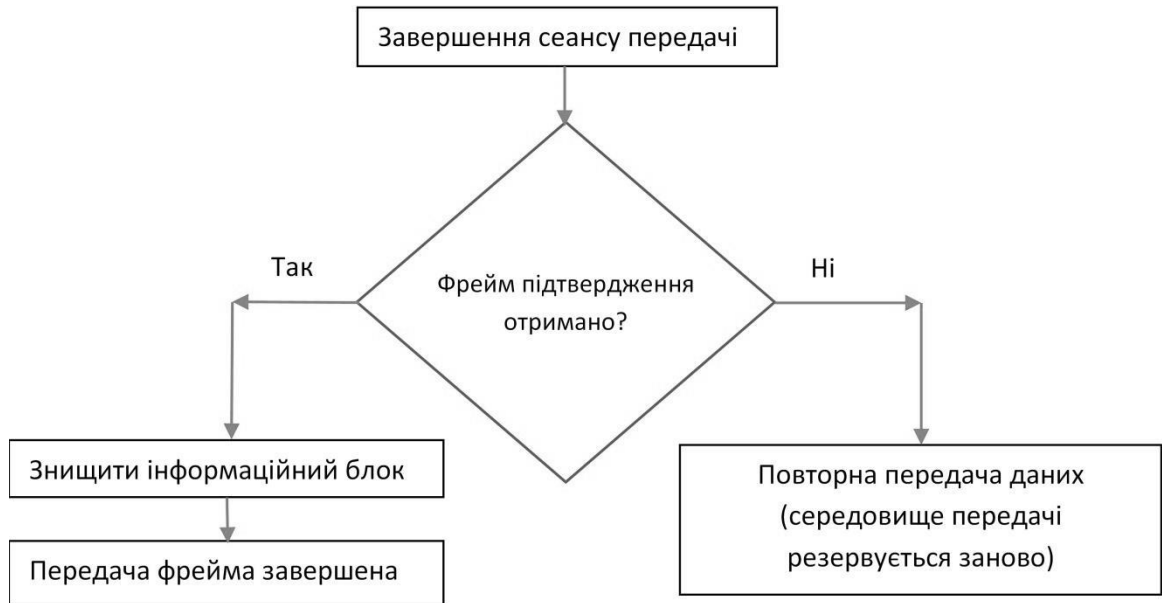


Рис. 2.23. Завершення сеансу передачі

За допомогою передачі додаткової інформації, можна забезпечити автоматичне регулювання потужності, вибір найбільш придатних швидкостей передачі, автоматичний вибір і перехід на інший частотний канал. Потужність випромінювання передавача, різницю між потужністю передавача і приймача, рівень перешкод в рецепторі і завантаженість частотного каналу можна передавати в фреймах RTS/CTS. Чутливість приймача в різних режимах, необхідне відношення сигнал/перешкода на різних швидкостях - це величини постійні. Їх можна передавати в процесі прив'язки МС до точки доступу.

Розроблений механізм резервування середовища передачі покликаний організувати одночасне безконфліктне використання декількома стільниками, що належать одній безпроводовій локальній мережі, одного частотного каналу на одній території. Для його впровадження необхідно оновлення програмного забезпечення точок доступу і клієнтських адаптерів. Заміни апаратної частини не потрібно. На рис. 2.24 показаний механізм доступу до середовища передачі, який реалізує роботу вдосконаленого механізму резервування середовища передачі [6, 75, 76, 79].

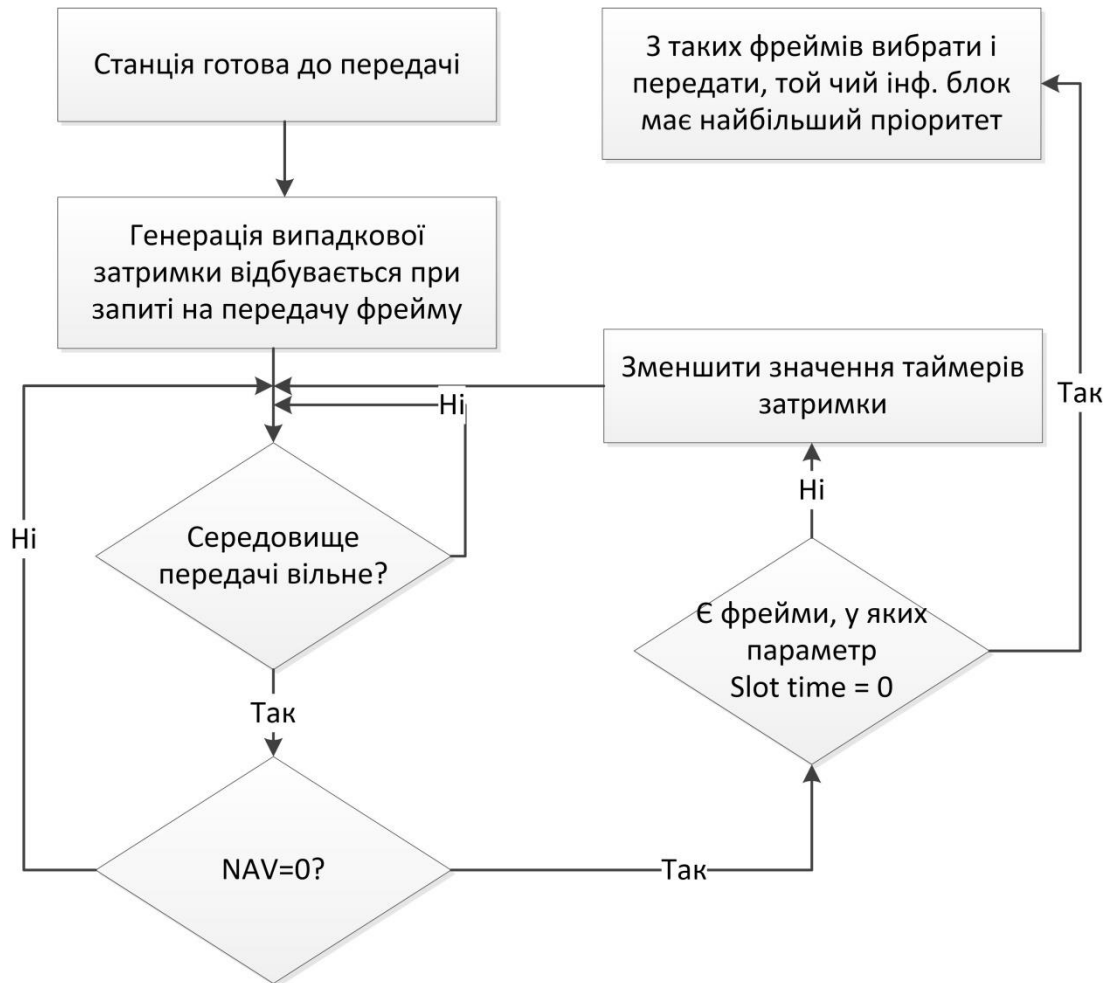


Рис. 2.24. Механізм доступу до середовища передачі, який реалізує роботу вдосконаленого механізму резервування середовища передачі

Контрольні запитання

1. Що таке радіоелектронна сумісність радіоелектронних засобів (РЕЗ)?
2. Що таке задана електромагнітна обстановка (ЕМО)?
3. Що таке критерій забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС)?
4. Опишіть технічні методи забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС)?
5. Опишіть основні кроки при оцінці ЕМС, що вони включають?
6. Як оцінюються втрати на трасі поширення сигналу?

7. Як обчислюється сумарний рівень перешкод в рецепторі
8. Який набір перешкод дії В рецепторах WLAN?
9. Яким вимогам має відповідати обладнання WLAN?
10. В якому діапазоні частот функціонує сучасне обладнання WLAN?
11. Який мінімальний та максимальний дозволений рівень переданої потужності передавача у WLAN?
12. Поясніть стандартний механізм резервування середовища передачі.
13. Поясніть вдосконалений механізм резервування середовища передачі.
14. Які відмінності між стандартним і вдосконаленим механізмом резервування середовища передачі?
15. Скільки частотних каналів використовується на одній території при використанні стандартного механізму резервування, а скільки при вдосконаленому механізмі резервування?

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ З ВРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСТНОСТІ

Метою цього розділу є розробка моделі проектування безпроводових комп'ютерних мереж з урахуванням ЕМС. Проектування WLAN включає в себе вибір частотних каналів, використовуваних в мережі, розташування антен точок доступу і режимів роботи обладнання (потужності передавачів АР і МС, швидкість передачі даних), визначення необхідної кількості точок доступу, моделей приймально-передавальних антен АР, їх орієнтування. Для попередньої оцінки працездатності мережі, а також для вибору оптимальних режимів роботи проводиться розрахунок рівнів сигналів і перешкод у стільниках. Всі компоненти вибираються і налаштовуються з урахуванням розрахованих залежностей та даних міжсистемної ЕМС, отриманих при аналізі ЕМО. При проектуванні WLAN необхідно врахувати [2, 49, 51 - 53]:

- Програми, використовувані безпроводовими клієнтами.
- Особливості протоколу IEEE 802.11.
- Характеристики вибраного обладнання.
- Переміщення мобільних вузлів.
- ЕМО.
- Особливості місцевості (рельєф, забудова).

Модель проектування безпроводових комп'ютерних мереж розділена на кілька стадій, які, в свою чергу, розбиті на етапи (рис. 3.1) [2, 5, 17].

3.1. Визначення базових характеристик Wireless Local Area Network

Етап 1: Визначення та аналіз вимог до WLAN

Залежно від додатків, з якими будуть працювати користувачі безпроводової мережі, визначаються і вимоги до неї. Перш ніж планувати WLAN, важливо сформулювати ці вимоги [6, 7, 63, 78]:

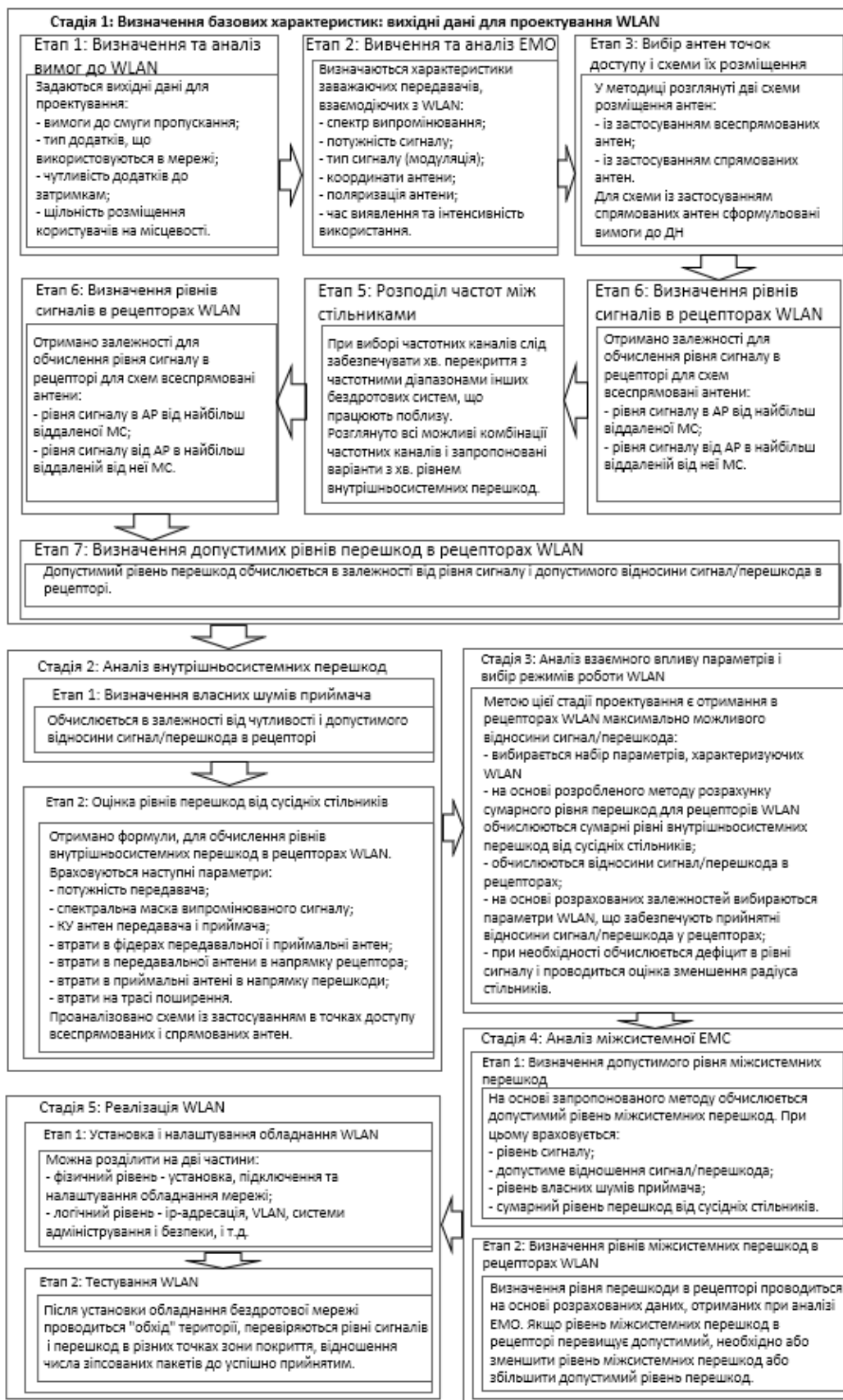


Рис. 3.1. Модель проектування безпроводових комп'ютерних мереж з урахуванням EMC

- вимоги до смуги пропускання (в розрахунку на одного клієнта);
- тип програми: потокове (телефонія, відео) або пульсуюче (пошта, Інтернет);
- QoS (чутливість додатків до затримок).

Зі збільшенням щільності клієнтів, вимоги до сумарної смуги пропускання зростають. У безпроводових мережах досить значна частина смуги пропускання витрачається на прикладні потреби. У стандарті IEEE 802.11b, при швидкості передачі 11 Мбіт/с, реальна продуктивність складає близько 6 Мбіт/с. Для стандартів IEEE 802.11a/g при швидкості передачі 54 Мбіт/с, реальна продуктивність складає приблизно 22 Мбіт/с. Залежно від потреб користувачів WLAN в смузі пропускання, визначається кількість користувачів, що обслуговуються однією точкою доступу [17, 72 - 74].

Типи використовуваних додатків істотно впливають на обсяги переданих даних. Вимоги додатків потокового типу, таких як передача голосу або відео, значно відрізняються від додатків пульсуючого типу, наприклад HTTP або POP3.

Смуга пропускання, яка використовується додатками пульсуючого типу, непостійна і непередбачувана. Як наслідок, дуже важко визначити кількість користувачів, яке має обслуговувати одна точка доступу. Верхньою межею вважається 25 користувачів на одну точку доступу.

Всі станції, як правило, мають однакові права доступу до середовища передачі. Чим більше станцій, тим більше шансів на виникнення колізій, і повторну передачу. Як результат, - виникнення затримок при передачі даних. Для зменшення цього ефекту, розумно вибирати високу щільність розміщення точок доступу.

Існують 2 методи планування розміщення [11, 18, 57, 71, 75]:

- По максимальній зоні обслуговування кожної AP.
- По максимальній пропускну здатності.

Метод, орієнтований на максимальну зону обслуговування спрямований на забезпечення максимального покриття, при мінімально можливій кількості точок доступу. Щільність користувачів в таких мережах становить близько 25 на 1 точку доступу. В цьому випадку зазвичай застосовуються додатки пульсуючого типу з низькою швидкістю передачі даних. Невеликі вимоги до смуги пропускання дозволяють зменшити швидкість роботи до 1-2 Мбіт/с. Подібний варіант WLAN також застосовується для часових мереж.

WLAN з максимальною пропускнуою спроможністю повинні забезпечувати максимальну продуктивність і швидкість передачі пакетів для кожного клієнта. Вони застосовуються в наступних випадках:

- Використовуються програми, що вимагають високої швидкості передачі.
- Використовуються додатки чутливі до затримок.
- Розгортаються підмережі менших масштабів (або декілька підмереж в одній зоні обслуговування).
- У місцях з високою щільністю розміщення користувачів.

Розміри стільників для таких WLAN менше, відповідно кількість використовуваних точок доступу більше. При цьому кожна точка доступу може обслуговувати не більше 12 користувачів.

При впровадженні безпроводової мережі необхідно забезпечити підключення точок доступу до розподільчої системи. Слід врахувати місце (відстань до точки підключення) і технологію підключення (наприклад в технології Ethernet максимальна довжина лінії зв'язку 100 м), віддаленість антен від AP та довжини фідерів (відповідно і втрати в них), доступність електроживлення, IP-адресацію, маршрутизацію, VLAN, смугу пропускання, і т.д [17, 70, 71].

Етап 2: Вивчення та аналіз електромагнітної обстановки

При аналізі ЕМО визначається наявність сигналів, що заважають в місці розгортання мережі.

- Виявляються безпроводові системи, що функціонують в даній місцевості в обраних діапазонах частот.

- Визначається обладнання, чутливе до радіоперешкод, і враховуються його характеристики.

- Проводиться пошук випромінюючих радіоелектронних пристроїв, які потенційно є перешкодами (мікрохвильові печі, медичне обладнання, і т.д.). Для кожної виявленої перешкоди фіксуються тип сигналу (модуляція), потужність, напрям, і поляризація антени, АЧХ, час виявлення (наприклад, в робочі дні з 9-00 до 18-00, цілодобово і т.д.) [52, 54, 57].

Для дослідження ЕМО використовуються спектральні аналізатори, які графічно показують енергію сигналу на різних частотах. Високий рівень сигналу (наприклад 20 дБ або вище) можуть пошкодити аналізатор. Для захисту використовуються вбудований або зовнішній вхідні атенюатори, що зменшують амплітуду сигналів.

За одержуваного на аналізаторі спектра зображення можна визначити рівень сигналу, центральну частоту і ширину частотного каналу, а також тип використовуваної модуляції.

Напрямок на джерело сигналу визначається за допомогою спрямованої антени. Обертаючи її в різних напрямках, фіксують напрямок на джерело сигналу, що збігається з напрямком, в якому приймається максимальний рівень сигналу.

Змінюючи поляризацію антени аналізатора (обертанням) від горизонтальної до вертикальної, можливо визначити поляризацію антени, яка випромінює сигнал.

Модуляцію сигналу можна визначити за формою спектру випромінювання, зафіксованої аналізатором.

Спектр сигналу може змінюватися в часі. Для того, що б краще проаналізувати спектр сигналу, необхідно використовувати режим, в якому

аналізатор фіксує на екрані найбільші значення рівнів випромінювання, що приймається [9, 63, 74].

Більшість сигналів, виявлених в смузі 2,4 ГГц будуть OFDM, DSSS, FHSS-сигнали або їх комбінації (наприклад DSSS + OFDM) [5, 10, 11, 42].

DSSS-сигнал просто визначити, по ширині використовуваного спектра (22 МГц) і формі сигналу. На рис. 3.2 показані два сильних (близько -60 дБ) сигналу DSSS в смузі 2.4 ГГц [74]. Один сигнал випромінюється на 1-му частотному каналі (2412 МГц), а інший на 6-м (2437 МГц). OFDM-сигнал також можна визначити по його спектральній масці [12, 71 - 73].

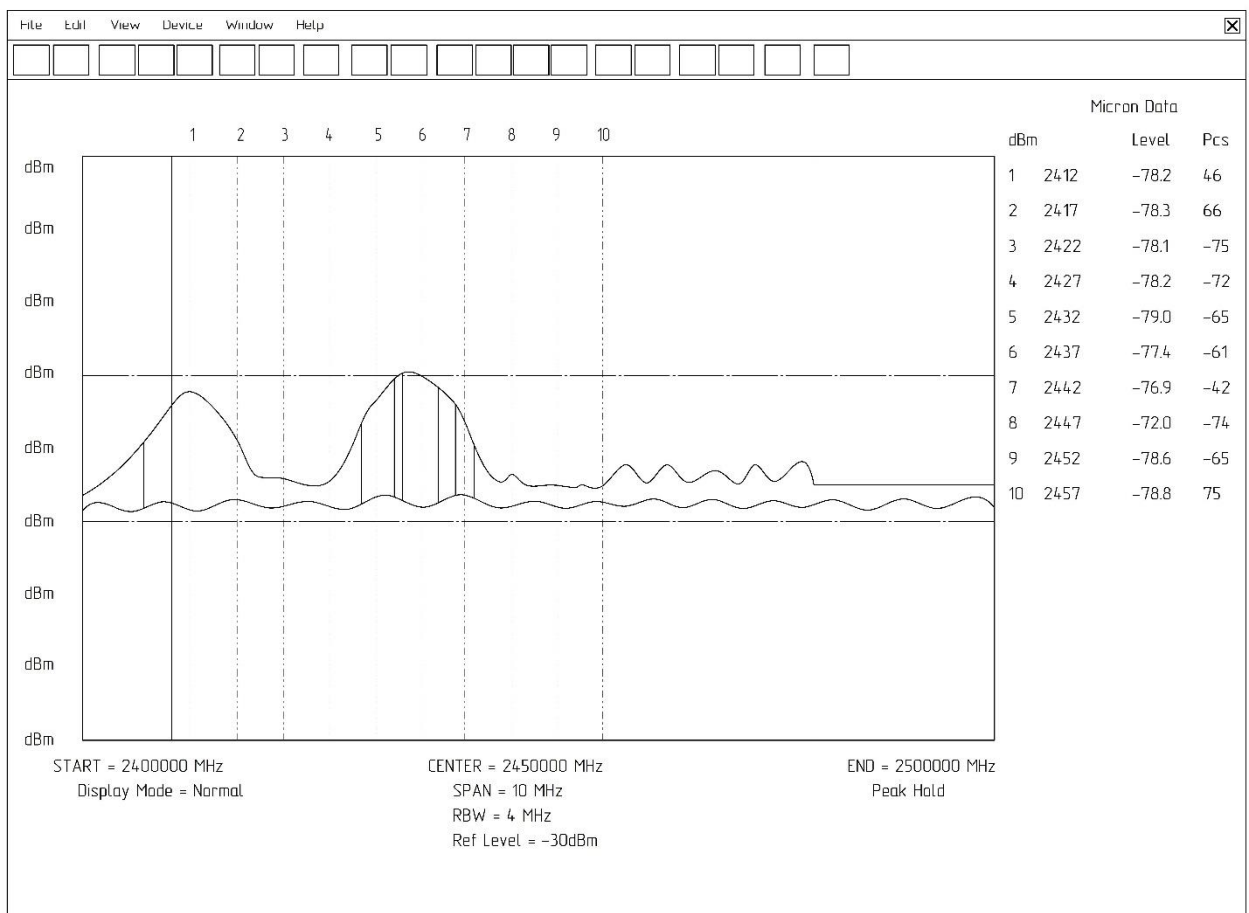


Рис. 3.2. Спектр DSSS-сигналу

Сигнал FHSS можна визначити по безлічі піків: сигнал переходить з каналу на канал через 1 МГц, по всій доступній смузі частот (рис. 3.3) [72 - 74].

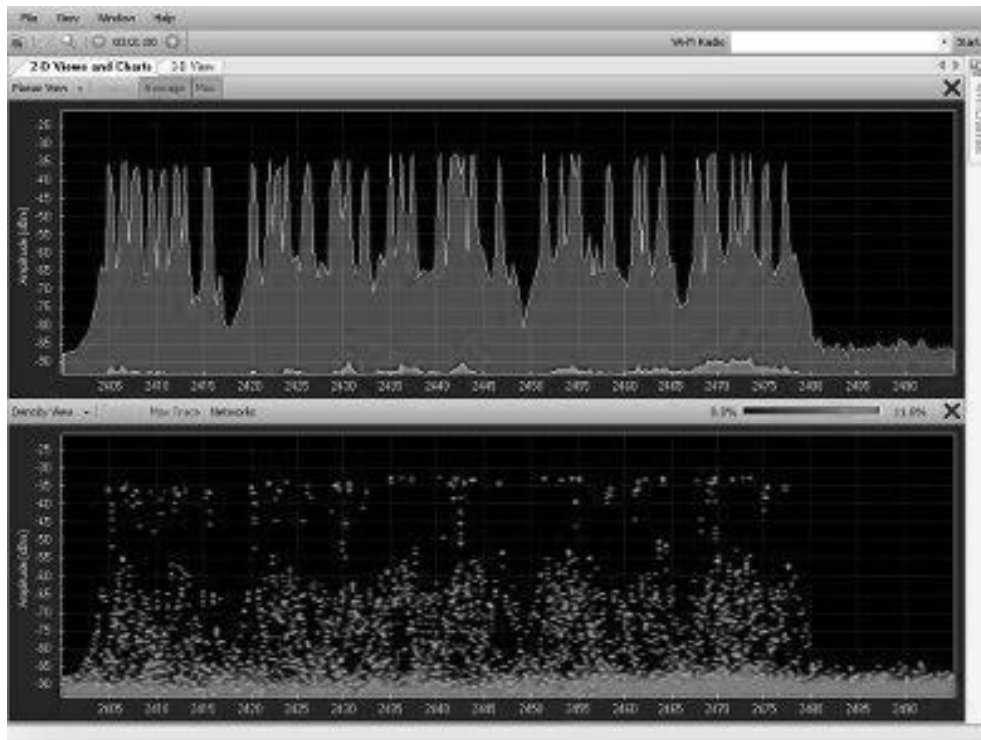


Рис. 3.3. Спектр FHSS-сигнала

Додаткову інформацію за різними параметрами (шифрування, швидкість роботи, інтенсивність трафіку і т.д.) працюють поблизу WLAN можна отримати, використовуючи безпроводові аналізатори протоколів і сніфери.

У результатах аналізу ЕМО повинні бути визначені [70]:

- найбільш підходящі для розгортання безпроводової мережі діапазони частот;
- перелік джерел перешкод в цих діапазонах, їх характеристики (потужність, спектр випромінювання, КП і ДС антени, відстань до передавача і т.д.);
- перелік рецепторів, чутливих до випромінювання в обраних діапазонах, їх характеристики (частота прийому, чутливість, мінімальне відношення

сигнал/перешкода, параметри антени (якщо є), розташування, параметри джерела сигналу та ін.);

- опис характеру місцевості, де буде розгортатися безпроводова мережа, її особливості з точки зору поширення радіохвиль.

Також потрібно проаналізувати принципово можливі шляхи зменшення взаємного впливу з сусідніми радіосистемами (зменшення рівня потужності, установка частотних фільтрів, екранування, перенесення випромінюючого або приймаючого обладнання в інше місто).

Етап 3: Вибір антен точок доступу і схеми їх розміщення

При проектуванні безпроводових комп'ютерних мереж в точках доступу можуть застосовуватися спрямовані або всеспрямовані антени. Типова схема розташування сусідніх стільників показана на рис. 3.4. Різні співвідношення між розмірами стільників показані на рис. 3.5 [41, 49, 65, 66].

Всеспрямовані антени розміщуються в центрах стільників, спрямовані - на кордонах стільника. З позицій забезпечення ЕМС (як міжсистемної, так і внутрісистемної) краще використовувати спрямовані антени.

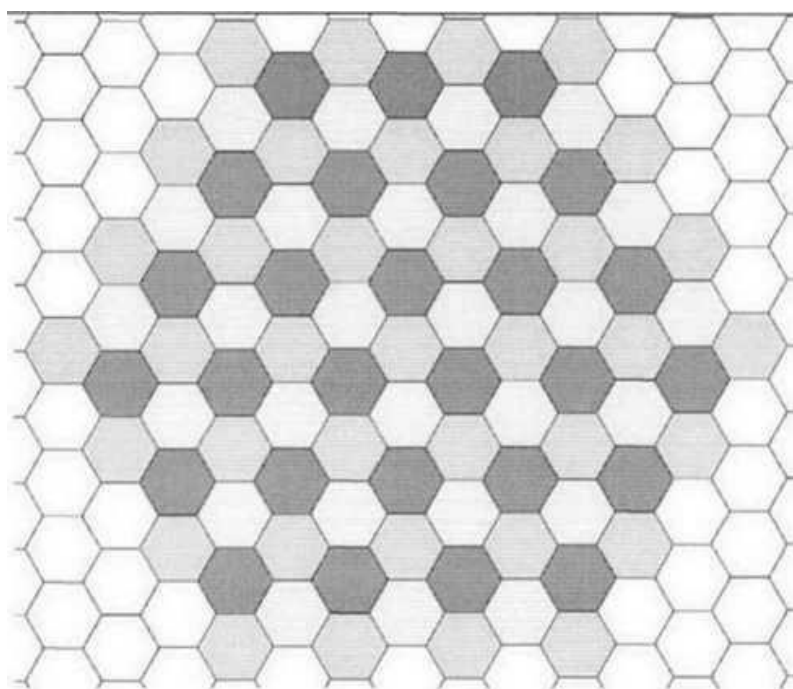


Рис. 3.4. Взаємне розташування стільників

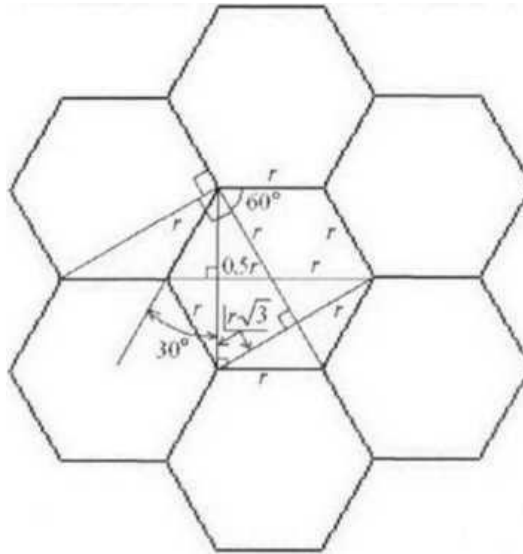


Рис. 3.5. Геометрія стільників

Антенa AP повинна забезпечувати прийом від МС, що знаходиться в будь-якому місці стільника. МС, відповідно, повинна приймати сигнал від AP, також перебуваючи в будь-якій частині стільника. Спрямована антена точки доступу має різні значення КП антени в залежності від напрямку. Незалежно від напрямку антени AP і віддаленості МС і антени AP, сумарні втрати в рівні сигналу на цих параметрах повинні бути не більше, ніж для пари МС-AP, найбільш віддалених одна від одної (відстань між ними дорівнює двом радіусів стільника, рис. 3.6).

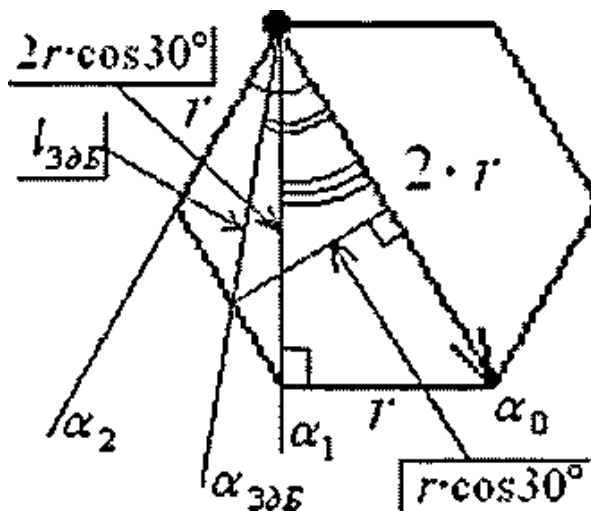


Рис. 3.6. Розташування антени AP і критичних МС

Деякі критичні точки місцезнаходження МС показані на рис. 3.6. Відстані між ними і АР, а також різниця з напрямком основної пелюстки антени АР наведені в табл. 3.1 [63]. Нижче виводяться формули для розрахунку допустимого зменшення КП антени АР в різних напрямках ($X_{об}$) [52, 53].

$$L(2r) = 40,2 + 20\lg(2r); L(l) = 40,2 + 20\lg(l);$$

$$X_{об} = L(2r) - L(l) = 20\lg(2r) - 20\lg(l);$$

$$X_{об} = 20\log\left(\frac{2r}{l}\right);$$

де r - радіус стільники, м;

$L(2r)$ - втрати в рівні сигналу на трасі розповсюдження між АР та МС, найбільш віддаленої від точки доступу, обчислені для випадку прямої видимості між джерелом і рецептором сигналу, дБ;

l - відстань між АР та МС, м;

$L(l)$ - втрати па трасі поширення між АР та МС, дБ;

$X_{об}$ - допустиме зменшення КП антени АР, щодо основної пелюстки ДС, дБ.

Таблиця 3.1. Вимоги до горизонтальної ДС антени АР

Направлення на МС, позначене кутом α , градусів	Відстань між антеною АР і МС, м	Допустиме зменшення КП антени АР, щодо КП основної пелюстки ДС: $X_{об}$, дБ
$\alpha_0 = 0^0$	$2gr$	0
$\alpha_1 = \pm 30^0$	$2gr\cos 30^0 = rg\sqrt{3}$	1,25
$\alpha_2 = \pm 60^0$	R	6,02

Зазвичай для антен задається такий параметр, як ширина ДС (в градусах) на рівні 3 дБ. Необхідну ширину ДС на рівні 3 дБ ($\alpha_{3\text{дБ}}$) можна обчислити таким чином [11, 59, 63]:

$$\sin(\alpha_{3\text{дБ}}) = \frac{r \cos 30^\circ}{l_{3\text{дБ}}};$$

$$20 \log l = 20 \log(2r) - X_{\text{дБ}} = 20 \log(2r) - 20 \left[\frac{X_{\text{дБ}}}{20} \right] \log(10);$$

$$\log l = \log(2r) - \log 10^{\frac{X_{\text{дБ}}}{20}} = \log \left(\frac{2r}{10^{\frac{X_{\text{дБ}}}{20}}} \right);$$

$$l = \frac{2r}{10^{\frac{X_{\text{дБ}}}{20}}};$$

$$\sin(\alpha_{3\text{дБ}}) = \frac{r \cos 30^\circ}{2r(10^{\frac{3}{20}})} = \frac{10^{0,15} \cos 30^\circ}{2} = 0,61;$$

$$\alpha_{3\text{дБ}} = 37,7^\circ;$$

де $l_{3\text{дБ}}$ - відстань між АР та МС, розташованої на кордоні 3 дБ, м;

$\alpha_{3\text{дБ}}$ - необхідна ширина горизонтальної ДС на рівні 3 дБ, градусів.

До вертикальної ДС антени АР висуваються такі вимоги (рис. 3.7) [90 - 93]:

- максимум КП основної пелюстки повинен бути в напрямку найбільш віддаленої МС (β_1);

- основна пелюстка вертикальної ДС антени (зменшення КП до 3 дБ) має охоплювати простір, обмежений кутами $\beta_1 \dots \beta_2$;

- антена повинна забезпечити значне зменшення перешкоди по перекритому каналу в задній пелюстці (простір, обмежений кутами $\beta_3 \dots \beta_4$).

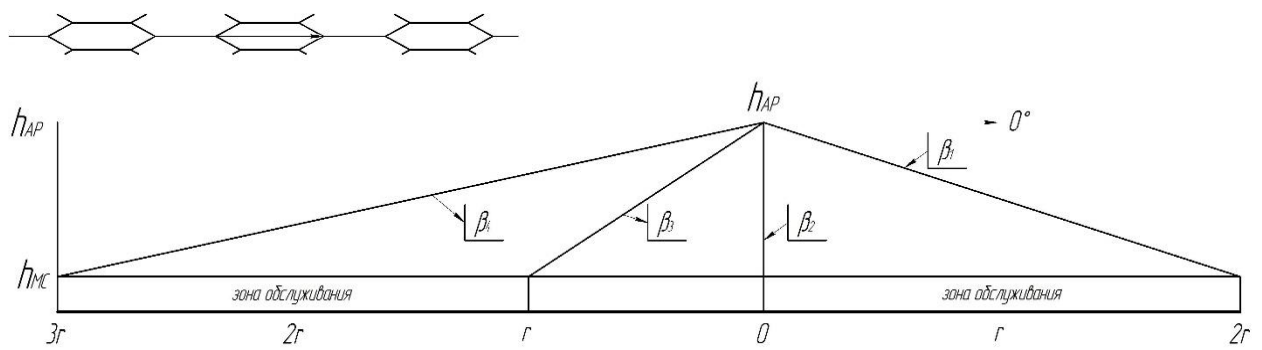


Рис. 3.7. Вимоги до вертикальної ДС антени АР

Кут $\beta_2 = 90^\circ$. Значення кутів $\beta_1, \beta_3, \beta_4$ залежать від різниці в висотах МС і антени АР, а також від радіуса стільників [61, 62, 92, 93]:

$$\operatorname{tg}(90 - \beta_1) = \frac{2r}{h_{AP} - h_{MC}} = \frac{2r}{k_{\square h/r} \square r} = \frac{2}{k_{\square h/r}};$$

$$\operatorname{tg}(\beta_3 - 90) = \frac{r}{h_{AP} - h_{MC}} = \frac{r}{k_{\square h/r}} = \frac{1}{k_{\square h/r}};$$

$$\operatorname{tg}(\beta_4 - 90) = \frac{3r}{h_{AP} - h_{MC}} = \frac{3r}{k_{\square h/r} \square r} = \frac{3}{k_{\square h/r}};$$

$$\text{де } k_{\square h/r} = \frac{h_{AP} - h_{MC}}{r}; \quad \square h_{AP-MC} = h_{AP} - h_{MC} = k_{\square h/r} \square r.$$

Як правило, $k_{\square h/r} = 0,01 \dots 0,5$, тоді $\beta_1 = 3^\circ \dots 15^\circ$, а діапазон $\beta_3 \dots \beta_4 = 150^\circ \dots 180^\circ$.

Етап 4: Вибір розміру стільників [75]

При виборі розміру стільників слід враховувати:

- розмір приміщень;
- щільність розміщення користувачів;
- вимоги до смуги пропускання, доступної для кожного з користувачів, при середньому і максимальному завантаженні безпроводової мережі;
- запас на розвиток мережі: збільшення кількості користувачів і вимог до смуги пропускання:

- витрати на організацію (залежать від числа точок доступу);
- загасання на місцевості (визначають максимально можливий розмір стільника).

Бажано, щоб простір, що охоплюється 1-шою АР, був однорідний (були відсутні стіни, перекриття та інші перешкоди, що ускладнюють передачу радіосигналу). Тобто кордони стільників збігалися зі стінами приміщень, якщо простір неоднорідний - на карті місцевості позначаються втрати, яких зазнає сигнал при їх подоланні (визначається шляхом вимірів або по різних моделях). Зона обслуговування однієї АР повинна вибиратися таким чином, щоб кількість мобільних користувачів, що належать цьому стільнику, не перевищувало максимум, який визначається вимогами до мережі. Якщо максимум користувачів перевищено, то необхідно зменшити простір, що обслуговується однією АР [11].

У неліцензованих безпроводових комп'ютерних мережах максимально можливий радіус стільника може бути до 300 метрів, в залежності від обладнання, необхідної швидкості передачі даних, рівня перешкод між АР та МС.

Етап 5: Розподіл частот між стільниками

В діапазоні 2.4 ГГц для WLAN є три канали, що не перекриваються. Їх можливі поєднання показані в табл. 3.2 4. [5, 41, 43, 64].

Найбільший інтерес представляють 3-тя і 8-ма комбінації, тому що в цих випадках зменшується рівень внутрішньосистемних перешкод між стільниками. У разі використання 3-ї комбінації частот, внутрішньосистемні перешкоди, згідно спектральним маскам, між другим і третім стільником додатково зменшаться на 20 дБ, якщо використовуються технології DSSS, і на 16 дБ, якщо використовуються технології OFDM. У разі застосування 8-ї комбінації частот, внутрішньосистемні перешкоди між другим та третім стільником додатково зменшаться на 20 дБ (DSSS) і на 16 дБ (OFDM).

Таблиця 3.2. Комбінації спільно використовуваних частотних каналів

№ комбінації	Перший стільник		Другий стільник		Третій стільник	
	Номер каналу	Центральна частота	Номер каналу	Центральна частота	Номер каналу	Центральна Частота
1	1	2412 МГц	6	2437 МГц	11	2462 МГц
2	1	2412 МГц	6	2437 МГц	12	2467 МГц
3	1	2412 МГц	6	2437 МГц	13	2472 МГц
4	1	2412 МГц	7	2442 МГц	12	2467 МГц
5	1	2412 МГц	7	2442 МГц	13	2472 МГц
6	2	2417 МГц	7	2442 МГц	12	2467 МГц
7	2	2417 МГц	7	2442 МГц	13	2472 МГц
8	1	2412 МГц	8	2447 МГц	13	2472 МГц
9	2	2417 МГц	8	2447 МГц	13	2472 МГц
10	3	2422 МГц	8	2447 МГц	13	2472 МГц

В діапазоні 5,8 ГГц (стандарт IEEE 802.11a) різниця між сусідніми частотними каналами становить 20 МГц [10, 67, 68]. Виходячи з цього, можна припустити, що, при використанні технології OFDM в діапазоні 2,4 ГГц, сусідні канали, що не перекриваються можна розносити на 20 МГц. У цьому випадку існує комбінація, в якій присутні 4 канали, що не перекриваються: 1-й (2412 МГц), 5-й (2432 МГц), 9-й (2452 МГц) і 13-й (2472 МГц) [65, 66].

Розподіл частот має, в першу чергу, забезпечити міжсистемну ЕМС. Тому слід вибирати частотні канали з урахуванням міжсистемних перешкод, забезпечуючи мінімальне перекриття з робочими частотними діапазонами інших систем, що функціонують на прилеглих територіях.

Етап 6: Визначення рівнів сигналів в рецепторах WLAN

Рівні сигналів в стільниках визначаються (табл. 3.3) в точці доступу (сигнал від найбільш віддаленої МС) і в граничній МС, найбільш віддаленої від АР (сигнал від точки доступу).

Таблиця 3.3. Визначення рівня сигналу

Порядковий номер стільника	<i>i</i>	
	АР <i>i</i> -го стільника	МС <i>i</i> -го стільника
Джерело сигналу	АР <i>i</i> -го стільника	МС <i>i</i> -го стільника
Рецептор стільника	МС <i>i</i> -го стільника	АР <i>i</i> -го стільника
Траса	Пряма траса АР => МС	Зворотна траса МС => АР
Потужність передавача, дБ	$P_{TX_AP(i)}$	$P_{TX_MP(i)}$
КУ антени передавача, дБі	$G_{TX_AP(i)}$	G_{MX}
Втрати в фідері передавача, дБ	$\phi_{TX_AP(i)}$	0
КП приймальної антени, дБі	G_{MX}	$G_{RX_AP(i)}$
Втрати у фідері прийомної антени, дБ	0	$\phi_{RX_AP(i)}$
Втрати в передавальній антені у напрямку рецептора, дБ	$\square G_{TX_AP(i) \rightarrow MC(i)}$	0
Втрати в напрямку рецептора в приймальній антені, дБ	0	$\square G_{RX_MC(i) \rightarrow AP(i)}$
Втрати в просторі, дБ	$L_{AP(i) \rightarrow MC(i)}$	$L_{MC(i) \rightarrow AP(i)}$
Додаткові втрати на трасі, дБ	$A_{дод. AP(i) \rightarrow MC(i)}$	$A_{дод. MC(i) \rightarrow AP(i)}$
Запас на завмирання, дБ	σ	
Рівень сигналу в рецепторі, дБ	$P_{RX_MC(i)}$	$P_{RX_AP(i)}$

Ефективна ізотропна-випромінювана потужність в антені АР на і-му стільнику ($EIRP_{AP(i)}$) обчислюється таким чином [11, 59, 63]:

$$EIRP_{AP(i)} = P_{TX_AP(i)} + G_{TX_AP(i)} - \phi_{TX_AP(i)} \quad (3.5)$$

де $P_{TX_AP(i)}$ - потужність передавача АР на і-му стільнику, дБ;

$G_{TX_AP(i)}$ - КП передавальної антени АР на і-му стільнику, дБі;

$\phi_{TX_AP(i)}$ - втрати в фідері передавальної антени АР в і-му стільнику, дБ.

Втрати у антенному фідері визначаються втратами безпосередньо в самому кабелі і в сполучних роз'ємах. Втрати в сполучних роз'ємах можна вважати рівними 0,5 дБ на одне з'єднання [11]. Питомі втрати у кабелі залежать від частоти і повинні вказуватися постачальником в специфікації кабелю. Наприклад, кабель типу LMR-400 довжиною 30,48 м має втрати 10,5 дБ на частоті 5,3 ГГц і 6,5 дБ на частоті 2,4 ГГц [11]. Зменшити втрати в фідері можна двома шляхами: обрати кабель з меншим питомим загасанням і/або зменшити його довжину. Для внутрішньоофісних мереж антени, як правило, підключаються безпосередньо до приймально-передавального тракту. Таким чином, втрати в антенних фідерах зменшуються до втрат на сполучних роз'ємах.

Середньоквадратичне відхилення повільних завмирань (σ) зазвичай береться рівним 3,5-17 дБ для радіотрас на відкритому просторі і 6-20 дБ для радіотрас в приміщеннях [71 - 73]. Розробники безпроводового обладнання при розрахунку максимальної дальності радіозв'язку беруть запас на завмирання рівним 10 дБ.

Ефективна ізотропно-випромінювана потужність в антені МС на і-му стільнику ($EIRP_{MC(i)}$) обчислюється таким чином (втрати в фідері нульові):

$$EIRP_{MC(i)} = P_{TX_MC(i)} + G_{MC}, \quad (3.6)$$

де $P_{TX_MC(i)}$ - потужність передавача AP на i -му стільнику, дБ;

G_{MC} - КП антени MC, дБі.

Рівень сигналу в MC визначається наступним чином:

$$P_{RX-MC(i)} = EIRP_{AP(i)} - VG_{TX_AP(i) \rightarrow MC(i)} + G_{MC} - L_{AP(i) \rightarrow MC(i)} - A_{\text{од.}AP(i) \rightarrow MC(i)} - \sigma, \text{ дБм}; \quad (3.7)$$

Рівень сигналу в AP визначається наступним чином:

$$P_{RX-AP(i)} = EIRP_{MC(i)} - G_{RX_AP(i)} + VG_{RX_AP(i) \rightarrow MC(i)} - L_{MC(i) \rightarrow AP(i)} - A_{\text{од.}MC(i) \rightarrow AP(i)} - \sigma, \text{ дБм}. \quad (3.8)$$

Рівень сигналу на кордоні стільника можна регулювати, змінюючи параметри антен, рівні випромінюваної потужності, параметрів антенних фідерів і т.д.

При використанні всеспрямованих антен, точка доступу розміщується в центрі стільника. Відповідно, відстань між AP та граничної MC буде дорівнює радіусу стільника [61, 62]:

$$d(r) = \sqrt{r^2 + Vh_{AP-MC}^2} = rg\sqrt{1 + k_{Vh/r}^2}, \text{ м} \quad (3.9)$$

Якщо в точках доступу застосовуються всеспрямовані антени, то вирази, за якими обчислюються рівні сигналів спрощуються.

$$\square G_{TX_AP \rightarrow MC(i)} = 0 \text{ дБ}; \quad \square G_{RX_AP \rightarrow MC(i)} = 0 \text{ дБ};$$

$$P_{RX-MC(i)} = EIRP_{AP(i)} - \square G_{MC} - L_{AP(i) \rightarrow MC(i)} - A_{\text{од.}AP(i) \rightarrow MC(i)} - \sigma, \text{ дБ}; \quad (3.10)$$

$$P_{RX-AP(i)} = EIRP_{MC(i)} - G_{RX_AP(i)} - L_{MC(i) \rightarrow AP(i)} - A_{\text{од.}MC(i) \rightarrow AP(i)} - \sigma, \text{ дБ}. \quad (3.11)$$

При застосуванні спрямованих антен, точка доступу зазвичай розміщується на кордоні стільника, відстань між граничною МС і АР в цьому випадку буде дорівнює діаметру стільника (або двом радіусів):

$$d(r) = \sqrt{(2r)^2 + Vh_{AP-MS}^2} = rg\sqrt{4 + k_{\sqrt{h/r}}^2}, \text{ м.} \quad (3.12)$$

Слід зауважити, що рівень сигналу в граничній МС при використанні такого розміщення антен зменшується на 6 дБ (втрати у відкритому просторі) в порівнянні з розміщенням в центрі стільника.

Якщо в точках доступу планується застосовувати одну загальну антену і на прийом і на передачу, то:

$$\square G_{TX_AP \rightarrow MC(i)} = \square G_{RX_AP} = G_{AP(i)};$$

$$\Phi_{TX_AP(i)} = \Phi_{RX_AP(i)} = \Phi_{AP(i)};$$

$$\square G_{TX_AP \rightarrow MC(i)} = \square G_{RX_AP \rightarrow MC(i)} = \square G_{AP(i) \rightarrow MC(i)};$$

$$EIRP_{AP(i)} = P_{TX-AP(i)} + G_{AP(i)} - \phi_{AP(i)};$$

$$P_{RX-MC(i)} = EIRP_{AP(i)} - VG_{AP(i) \rightarrow MC} - L_{AP(i) \rightarrow MC(i)} - A_{\text{од.}AP(i) \rightarrow MC(i)} - \sigma, \text{ дБм} \quad (3.13)$$

$$P_{RX-AP(i)} = EIRP_{MC(i)} + G_{AP(i)} - VG_{AP(i) \rightarrow MC(i)} - L_{MC(i) \rightarrow AP(i)} - A_{\text{од.}MC(i) \rightarrow AP(i)} - \sigma, \text{ дБм} \quad (3.14)$$

При передачі інформації безпосередньо між МС, рівень сигналу (при невеликих відстанях між МС) дещо збільшується через зменшення втрат поширення.

Етап 7: Визначення допустимих рівнів перешкод в рецепторах WLAN

Допустимий рівень перешкоди $a_{\text{од.}}$ в рецепторі обчислюється таким чином [18, 45, 46, 57]:

$$a_{\text{од.}} = P_{RX}(i) - \rho, \text{ дБ} \quad (3.15)$$

де $P_{RX}(i)$ - рівень сигналу в рецепторі, дБ;

ρ - допустиме відношення сигнал / перешкода в рецепторі при необхідній швидкості передачі даних, дБ.

Виробники обладнання, як правило, не вказують допустиме відношення сигнал/перешкода. Тому доводиться користуватися розрахованими значеннями [73, 74].

Допустимий рівень перешкоди для МС (пряма траса) і АР (зворотна траса) будуть відрізнятися.

3.2. Види внутрішньосистемних перешкод в мережах стандарту IEEE 802.11

Етап 1: Визначення рівня власних шумів приймача

Як вже зазначалося раніше, виробники обладнання зазвичай вказують тільки чутливість приймача, що дає інформацію про рівень власних шумів приймача і рекомендоване відношення сигнал / перешкода. Ці три величини пов'язані між собою в такий спосіб [18, 46]:

$$K = F + \rho, \text{ дБ}, \quad (3.16)$$

де K - чутливість приймача, дБ;

F - рівень власних шумів приймача, дБ;

ρ - допустиме відношення сигнал / перешкода в приймальнику, дБ.

Якщо відомі чутливість і допустиме відношення сигнал/перешкода, можна обчислити рівень власних шумів приймача:

$$F = K - \rho, \text{ дБ}. \quad (3.17)$$

Рівень власних шумів приймача визначається характеристиками обладнання. Для МС і точки доступу його величина може відрізнятись, тому при проектуванні необхідно визначати рівень шуму приймача для МС і АР.

Етап 2. Оцінка рівнів перешкоду від сусідніх стільників

При аналізі внутрішньосистемних перешкод необхідно отримати залежності, щоб відображають взаємозв'язок різних параметрів WLAN и рівнем перешкод між стільниками (рис. 3.8).

У разі вибору радіуса стільника моделі АР і МС, антени АР і спосіб їх розміщення і орієнтування, комбінація використовуваних частотних каналів, то можна оцінити рівні міжсистемних перешкод у стільнику. У роботі розглянуті перешкоди від 0-го та 1-го кола стільників. Перешкоди 2, 3 і наступних кіл, ще більше збільшують внутрішньосистемні перешкоди.

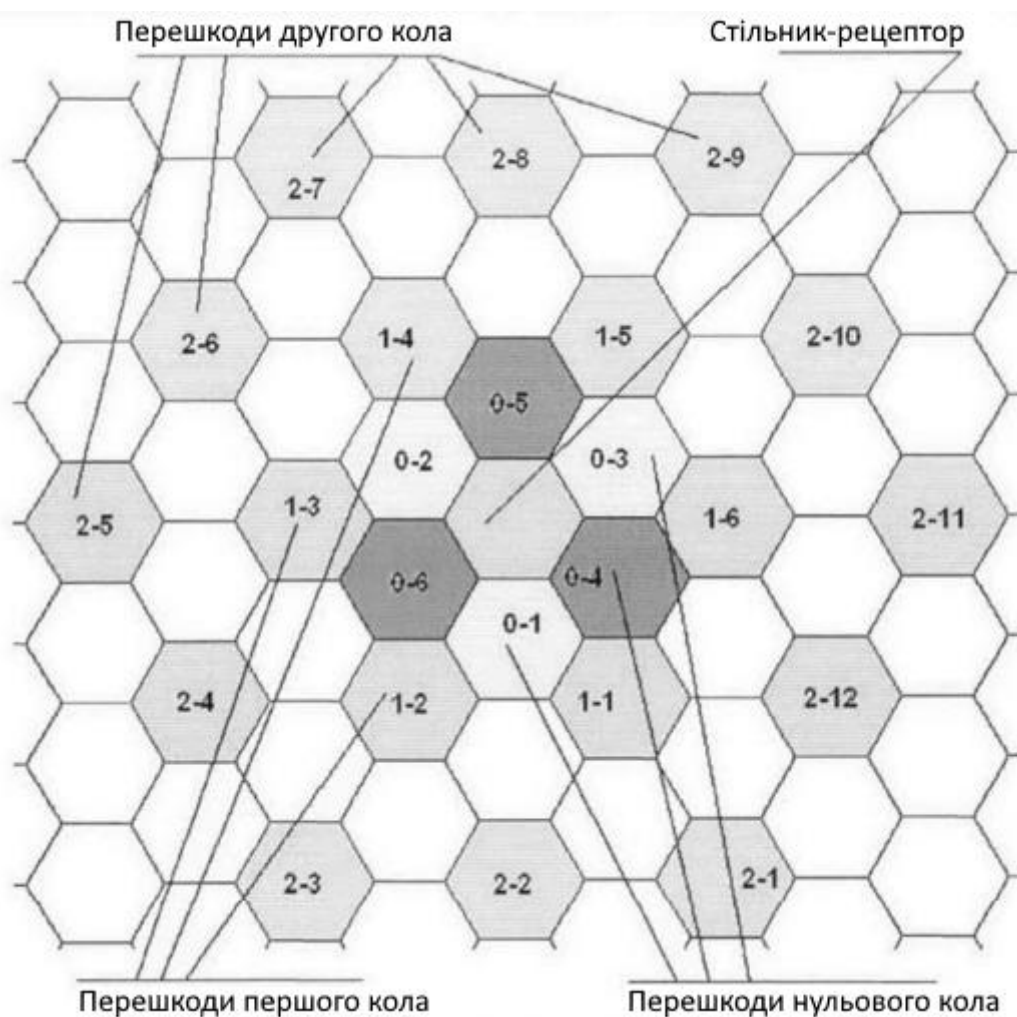


Рис. 3.8. Перешкоди від стільників різних кіл

Рівні перешкод в МС обчислюються наступним чином (табл. 3.4):

$$a_{лев/пр. RX_MC(j) \rightarrow MC(i)} = P_{TX_MC(j)} + 2G_{MC} - L_{MC(j) \rightarrow MC(i)} - A_{дод. MC(j) \rightarrow MC(i)} - ch_{лев./пр.}(f_j, f_i); \quad (3.18)$$

$$a_{лев/пр. RX_AP(j) \rightarrow MC(i)} = P_{TX_AP(j)} + G_{TX_AP(j)} - \phi_{TX_AP(j)} + G_{MC} - G_{TX_AP(j) \rightarrow MC(i)} - L_{AP(j) \rightarrow MC(i)} - A_{дод. AP(j) \rightarrow MC(i)} - ch_{лев./пр.}(f_j, f_i); \quad (3.19)$$

Рівні перешкод в АР обчислюються наступним чином (див. табл. 3.5):

$$a_{лев/пр. RX_MC(j) \rightarrow AP(i)} = P_{TX_MC(j)} + G_{MC} + G_{RX_AP(i)} - \phi_{RX_AP(i)} - G_{RX_MC(j) \rightarrow AP(i)} - L_{MC(j) \rightarrow AP(i)} - A_{дод. MC(j) \rightarrow AP(i)} - ch_{лев./пр.}(f_j, f_i); \quad (3.20)$$

Таблиця 3.4. Визначення рівня перешкод в МС і-го стільника від j-го стільника

Порядковий номер стільника джерела / рецептора перешкоди		<i>j/i</i>	
Рецептор		гранична МС	
Джерело перешкоди		гранична МС j-го стільника	АР j-го стільника
Траса		МС => МС	АР => МС
Зменшення перешкоди в лівій або правій половині спектра частотного каналу рецептора, дБ.	лів.	$ch_{лев.}(f_j, f_i)$	
	прав.	$ch_{пр.}(f_j, f_i)$	
Потужність передавача, дБ		$P_{TX_MC(j)}$	$P_{TX_AP(j)}$
КП антени передавача, дБі		G_{MC}	$G_{TX_AP(j)}$
Втрати в фідері передавача, дБ		0	$\phi_{TX_AP(j)}$
КП приймальні антени, дБі		G_{MC}	

Втрати в фідері приймальної антени, дБ		0	
Втрати передавальної антени в напрямку рецептора, дБ		0	$\square G_{TX_AP(j) \rightarrow MC(i)}$
Втрати в напрямку перешкоди в приймальній антені, дБ		0	0
Втрати у вільному просторі, дБ		$L_{MC(j) \rightarrow MC(i)}$	$L_{AP(j) \rightarrow MC(i)}$
Додаткові втрати на трасі, дБ		$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
Рівень перешкоди в рецепторі, дБ	лів.	$a_{\text{лів.}RX_MC(j) \rightarrow MC(i)}$	$a_{\text{лів.}RX_AP(j) \rightarrow MC(i)}$
	прав.	$a_{\text{пр.}RX_MC(j) \rightarrow MC(i)}$	$a_{\text{пр.}RX_AP(j) \rightarrow MC(i)}$

Таблиця 3.5. Визначення рівнів перешкод в AP і-го стільника від j-го стільника

Порядковий номер стільника джерела / рецептора перешкоди		j/i	
Рецептор		AP і-го стільника	
Джерело перешкоди		гранична MC j-го стільника	AP j-го стільника
Траса		MC => AP	AP => AP
Зменшення перешкоди в лівій або правій половині спектра частотного каналу рецептора, дБ	лів.	$ch_{\text{лів.}}(f_j, f_i)$	
	прав.	$ch_{\text{пр.}}(f_j, f_i)$	
Потужність передавача, дБ		$P_{TX_MC(j)}$	$P_{TX_AP(j)}$
КП антени передавача, дБі		G_{MC}	$G_{TX_AP(j)}$
Втрати в фідері передавача, дБ		0	$\phi_{TX_AP(j)}$
КП приймальної антени, дБі		$G_{RX_AP(i)}$	
Втрати у фідері приймальної антени, дБ		$\Phi_{RX_AP(i)}$	

Втрати передавальної антени в напрямку рецептора, дБ	0	$\square G_{TX_AP(j) \rightarrow AP(i)}$
Втрати в напрямку перешкоди в приймальній антени, дБ	$\square G_{RX_MC(j) \rightarrow AP(i)}$	$\square G_{RX_AP(j) \rightarrow AP(i)}$
Втрати у вільному просторі, дБ	$L_{MC(j) \rightarrow AP(i)}$	$L_{AP(j) \rightarrow AP(i)}$
Додаткові втрати на трасі, дБ	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow AP(i)}$	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
Рівень перешкоди в рецепторі, дБ	лів	$a_{\text{лів.}RX_MC(j) \rightarrow AP(i)}$
	прав	$a_{\text{прав.}RX_MC(j) \rightarrow AP(i)}$

$$\begin{aligned}
a_{\text{лів/прав.}RX_AP(j) \rightarrow AP(i)} = & P_{TX_AP(j)} + G_{TX_AP(j)} + G_{RX_AP(i)} - \\
& - \phi_{RX_AP(i)} - \sqrt{V} G_{TX_AP(j) \rightarrow AP(i)} - \sqrt{V} G_{RX_AP(j) \rightarrow AP(i)} - \\
& - L_{AP(j) \rightarrow AP(i)} - A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow AP(i)} - ch_{\text{лев./прав.}}(f_j, f_i)
\end{aligned} \quad ; \quad (3.21)$$

Складові, за якими обчислюється рівень міжсистемної перешкоди можна розділити на дві групи: однакові для всіх стільників і індивідуальні для кожного стільника.

Якщо прийняти значення потужності ($P_{TX_AP(j)}$) величину втрат в фідерах ($\phi_{TX_AP(j)}$), КП і ДС антен АР (G_{TX_AP}) всіх стільників однаковими, то можна значно спростити розрахунок внутрішньосистемних перешкод. Параметри МС (G_{TX_MC} , P_{TX_MC} , ϕ_{TX_MC}) спочатку беруться однаковими для всіх стільників. тому одні і ті ж МС можуть переміщатися між стільниками.

Значення КП приймальної антени ($G_{RX_AP/MC}$) і втрати в фідері приймальної антени ($\phi_{RX_AP/MC}$) залежать тільки від типу рецептора (АР або МС) і однакові для будь-якої з перешкод.

Втрати у фідерах обчислюються так само, як при розрахунку рівня сигналу (див. 6-й етап 1-й стадії проектування).

До групи індивідуальних параметрів потрібно включити такі характеристики:

- втрати в передавальній антені в напрямку рецептора VG_{TX} ;
- втрати в приймальній антені в напрямку перешкоди VG_{RX} ;
- втрати у вільному просторі L ;
- додаткові втрати на трасі $A_{\text{доо}}$.

Характеристики спектральної маски залежать від використовуваного обладнання (мінімальні вимоги задані стандартами) [69, 71]. З іншого боку, зменшення рівня позасмугового випромінювання (ch) залежить від різниці між робочими частотами стільників. Цей параметр потрібно враховувати при складанні рівнів перешкод від передавачів сусідніх стільників, що працюють на різних частотних каналах.

На основі отриманих формул (2.5), (3.18) ... (3.21) була створена табл. 3.6, де

$$EIRP_{\text{перешкоди}} = P_{TX} + G_{TX} - \phi_{TX},$$

а характеристики МС і АР визначають параметри відповідних рецепторів і джерел перешкоди.

Таблиця 3.6. Складові перешкоди

Один частотний канал	
Підсумовування однотипних перешкод (тільки від МС або тільки від АР)	$b = EIRP_{перешкоди} + G_{RX} - \phi_{RX}$ $c = \square G_{TX} + \square G_{RX} + L + A_{дод.}$
Підсумовування різнотипних перешкод (підсумовування перешкод від МС і від АР)	$b = EIRP_{AP} + G_{RX} - \phi_{RX}$ $c = (EIRP_{AP} - EIRP_{перешкоди}) + \square G_{TX} + \square G_{RX} + L + A_{дод.}$
Різні частотні канали	
Підсумовування однотипних перешкод (тільки від МС або тільки від АР)	$b = EIRP_{перешкоди} + G_{RX} - \phi_{RX}$ $c = \square G_{TX} + \square G_{RX} + L + A_{дод.} + ch$
Підсумовування різнотипних перешкод (підсумовування перешкод від МС і від АР)	$b = EIRP_{AP} + G_{RX} - \phi_{RX}$ $c = (EIRP_{AP} - EIRP_{перешкоди}) + \square G_{TX} + \square G_{RX} + L + A_{дод.} + ch$

Зменшення рівнів позасмугового випромінювання визначено по спектральним маскам, наведеними в стандартах [2, 5, 10, 12]. Для реального обладнання отримані значення можуть уточнюватися [73, 74].

З табл. 3.7 видно, що вимоги до рівня позасмугового випромінювання для технології DSSS набагато жорсткіші, ніж до технології OFDM. Це означає, що рівень внутрішньосистемних перешкод при використанні DSSS нижче, ніж при використанні OFDM [5, 10, 11, 42, 74].

Параметр d_{\min} - мінімальна відстань між заважаючими МС сусідніх стільників, м. Його значення можна оцінити за пропонованим методом. Площа стільника дорівнює $S_{стільника} = \pi r^2$, м². Якщо розбити стільник на ділянки однакової площі по числу МС в одному стільнику (n , шт.), то площа, яка припадає на кожну МС ($S_{МС}$, м²) буде дорівнювати:

$$S_{MC} = S_{\text{стільника}} / n = \pi g r^2 / n.$$

Таблиця 3.7. Зменшення рівня позасмугового випромінювання відповідно до спектральної маски стандартів IEEE 802.11, IEEE 802.11b і IEEE 802.11g

Тип перешкоди		Перешкода по перекр. каналу: $Vf < 25 \text{ МГц}$	Перешкода по сусідньому каналу: $25 \geq Vf < 35 \text{ МГц}$	Перехресна перешкода: $Vf \geq 35 \text{ МГц}$
Зменшення рівня перешкоди відповідно до спектральної маскою	IEEE 802.11 IEEE 802.11b IEEE 802.11g RBCC	0 дБ	30 дБ	50 дБ
	IEEE 802.11g OFDM	0 дБ	24 дБ	40 дБ

Розрахуємо радіус кола, відповідний площі, що припадає на одну МС (r_{MC} , м):

$$r_{MC} = \sqrt{S_{MC} / \pi} = \sqrt{(\pi r^2 / n)} = \frac{r}{\sqrt{n}}; \quad (3.23)$$

Зробимо допущення, що МС знаходиться в центрі кола, обмеженого площею S_{MC} . Тоді відстань між граничними МС різних стільників, розташованими в безпосередній близькості один від одного, буде визначатися

відстанню між центрами кіл, обмежених відповідними S_{MC} . Відстань між центрами дотичних кіл дорівнює сумі їх радіусів:

$$d_{\min} = r_{1_MC} + r_{2_MC} = \frac{r_1}{\sqrt{n_1}} + \frac{r_2}{n_2}; \quad (3.24)$$

де d_{\min} - мінімальна відстань між заважаючими МС сусідніх стільників, м;

r_1 та r_2 , - радіуси відповідних стільників, м;

n_1 та n_2 - число МС у відповідних стільниках, м;

r_{1_MC} та r_{2_MC} - радіус кола, відповідний площі, що припадає на одного користувача для відповідних стільників, м.

Якщо радіуси і число користувачів сусідніх стільників рівні ($r_1 = r_2 = r$, $n_1 = n_2 = n$), мінімальна відстань між взаємодіючими МС сусідніми стільниками можна обчислити таким чином:

$$d_{\min} = r_{MC} + r_{MC} = \frac{r}{\sqrt{n}} + \frac{r}{\sqrt{n}} = \frac{2gr}{\sqrt{n}}; \quad (3.25)$$

WLAN, організовані із застосуванням всеспрямованих антен

Для WLAN, що використовують всеспрямовані антени, характерний високий рівень взаємних перешкод між стільниками. Тому всеспрямовані антени рекомендується застосовувати у разі, коли число стільників не перевищує трьох.

Як і для сигналу, якщо в точках доступу застосовуються всеспрямовані антени, то вирази, за якими обчислюються рівні перешкод, кілька спрощуються:

$$VG_{TX_AP(i) \rightarrow MC(i)} = 0 \text{ дБ}; \quad VG_{RX_AP(i) \rightarrow MC(i)} = 0 \text{ дБ}.$$

Точки доступу розміщуються в центрах стільників. Відстані між джерелами і рецепторами перешкоди в цьому випадку показані в наведених далі таблицях.

У наведених таблицях (табл. 3.8, 3.9, 3.10, 3.11) представлений розрахунок рівнів перешкод у разі, якщо додаткові втрати в антенному фідері ϕ_{AP} і втрати на трасі $A_{\text{доод.}}$ нульові, а $k_{\square h/r}^2 = 0,05 \dots 1$ (для гіршого випадку беремо найменше значення).

Таблиця 3.8. Перешкоди в граничній МС по сусідньому каналу (0-е коло, всеспрямовані антени)

Номери стільників і в джерел перешкоди	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Додаткові втрати на трасі, $A_{\text{доод.}}$, дБ	Примітки
0-1 МС	$d(r) = d_{\min} = 1 \dots 3$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg d_{\min} = 40,2 + (0 \dots 9)$	$A_{\text{доод.МС}(j) \rightarrow AP(i)}$	При виконанні нерівностей $EIRP_{AP} - EIRP_{МС} \leq 20$ та $r \geq 8,9$ м, то перешкода буде визначатися граничною МС стільника
0-1 АР	$d(r) = \sqrt{0,75 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(0,75 + k_{\square h/r}^2)$	$A_{\text{доод.АР}(j) \rightarrow AP(i)}$	Перешкоди від стільників визначаються по АР, якщо $EIRP_{AP} - EIRP_{МС} \geq 3,68$ дБ, в іншому випадку по МС
0-2 МС	$d(r) = \sqrt{3} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(3 + k_{\square h/r}^2)$	$A_{\text{доод.МС}(j) \rightarrow AP(i)}$	
0-2 АР	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{\square h/r}^2)$	$A_{\text{доод.АР}(j) \rightarrow AP(i)}$	

Таблиця 3.9. Перешкоди в АР по сусідньому каналу (0-е коло, всеспрямовані антени)

Номери стільників джерел перешкоди	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі:	Додаткові втрати на трасі, $A_{\text{дод.}}$, дБ	Примітки
0-1...0-3 МС	$d(r) = \sqrt{0,75 + k_{\sqrt{h/r}}^2} gr$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(0,75 + k_{\sqrt{h/r}}^2)$	$A_{\text{дод.МС}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$	Перешкоди від стільників визначаються по АР, якщо
0-1...0-3 АР	$d(r) = \sqrt{3} gr$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	$A_{\text{дод.АР}(j) \rightarrow \text{АР}(i)}$	$EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 6,02$ дБ, в іншому випадку по

Таблиця 3.10. Перешкоди у граничній МС (1-е коло, всеспрямовані антени)

Номери стільників джерел перешкоди	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Додаткові втрати на трасі, $A_{\text{дод.}}$, дБ	Примітки
1	2	3	4
1-1 МС	$d(r) = r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r$	$A_{\text{дод.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	Перешкоди від стільників визначаються по АР, якщо
1-1 АР	$d(r) = \sqrt{4 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(4 + k_{\square h/r}^2)$	$A_{\text{дод.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	$EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 6,02$ дБ, в іншому випадку по МС

Продовження таблиці 3.10. Перешкоди у граничній МС (1-е коло, всіспрямовані антени)

1	2	3	4
1-2, 1-6 МС	$d(r) = \sqrt{3}r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	$A_{\text{од.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	Перешкоди від стільників визначаються по АР, якщо
1-2, 1-6 АР	$d(r) = \sqrt{7 + k_{h/r}^2}r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{h/r}^2)$	$A_{\text{од.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	$EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 3,68$ дБ, в іншому випадку по МС
1-3, 1-5 МС	$d(r) = \sqrt{7}r$ $L(d(r)) = 48,65 + 20\lg r$	$A_{\text{од.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	Перешкоди від стільників визначаються по АР, якщо
1-3, 1-5 АР	$d(r) = \sqrt{13 + k_{h/r}^2}r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(13 + k_{h/r}^2)$	$A_{\text{од.АР}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	$EIRP_{\text{АР}} - EIRP_{\text{МС}} \geq 2,69$ дБ, в іншому випадку по МС
1-4 МС	$d(r) = 3r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	$A_{\text{од.МС}(j) \rightarrow \text{МС}(i)}$	Перешкоди від стільників визначаються по АР, якщо

1-4 AP	$\sqrt{16 + k_{\square h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(16 + k_{\square h/r}^2)$	$A_{\text{доод. AP}(j) \rightarrow \text{MC}(i)}$	$EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 2,5$ дБ, в іншому випадку по MC
-----------	--	---	---

Таблиця 3.11. Перешкоди в AP, по каналу що перекривається (1-е коло, всеспрямовані антени)

Номери стільників джерел перешкоди	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Додаткові втрати на трасі, $A_{\text{доод.}}$, дБ	Примітки
1-1 ... 1-6 MC	$d(r) = \sqrt{4 + k_{\square h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(4 + k_{\square h/r}^2)$	$A_{\text{доод. MC}(j) \rightarrow \text{AP}(i)}$	Перешкоди від стільників визначаються по AP, якщо $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 3,5$
1-1 ... 1-6 AP	$d(r) = 3r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	$A_{\text{доод. AP}(j) \rightarrow \text{AP}(i)}$	дБ, в іншому випадку по MC

WLAN, організовані із застосуванням спрямованих антен

Для WLAN, що використовують направлені антени, характерний як менший рівень перешкод між стільниками, так і міжсистемні перешкоди, в порівнянні зі всеспрямованими антенами [2, 5, 10, 12]. Недоліком такого розміщення антен є те, що рівень сигналу (в граничній MC і в AP) знижується на 6 дБ за рахунок збільшення максимальної відстані між ними у 2 рази.

Деякий вигравш у відношенні сигнал/перешкода може дати можливість регулювання потужності випромінювання МС.

На рис. 3.9 показаний один із способів розміщення та орієнтування антен АР, що працюють на одному частотному каналі. Перевагою запропонованої схеми є можливість досить простого розширення мережі.

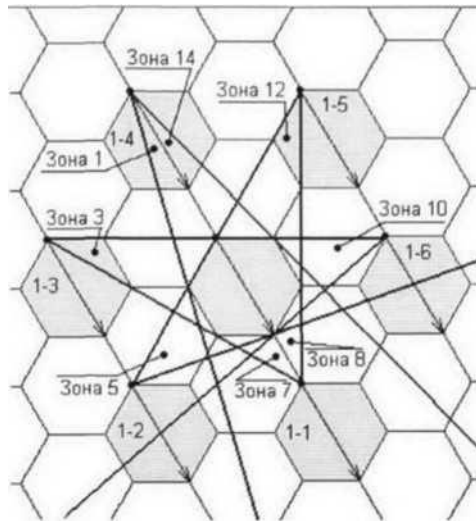


Рис. 3.9. Направлення на різні стільники для передавальних антен АР

Розміщувати точки доступу, що працюють на каналах, що не перекриваються, зберігаючи здатність безпроводової мережі до масштабування, можна використовуючи одну з запропонованих нижче схем розміщення і орієнтування антен АР (рис. 3.10, 3.11).

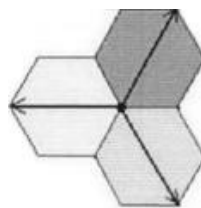


Рис. 3.10. Основні пелюстки ДС антен точок доступу розходяться з однієї точки

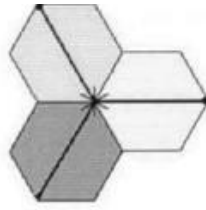


Рис. 3.11. Основні пелюстки ДС антени точок доступу сходяться в одній точці

В роботі розглянуті тільки ці варіанти розміщення антен AP (табл. 3.12 - 3.18) [11, 66]. При проектуванні можна обрати інші варіанти розміщення і орієнтування антен AP і провести аналіз за запропонованою методикою.

Таблиця 3.12. Перешкоди в граничній МС по сусідньому каналу (0-е коло, спрямовані антени, ДС розходяться з однієї точки)

Номери стільників джерела перешкод	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Відхилення від основної пелюстки антенах		Додаткові втрати на втрасі
		Пер. антена	Пр. антена	
0-1 0-4 МС	$d(r) = d_{\min} = 1...3$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg d_{\min} = 40,2 + (0...9)$	0	0	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-1 0-4 АР	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\sqrt{h/r}}^2} gr$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(1 + k_{\sqrt{h/r}}^2)$	30°...90° 270°...330°	0	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
0-2 0-5 МС	$d(r) = \sqrt{3} gr$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$

0-2 0-5 AP	$d(r) = \sqrt{4 + k_{vh/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(4 + k_{h/r}^2)$	180°...300° 60°...180°	0	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
0-3 0-6 MC	$d(r) = r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-3 0-6 AP	$d(r) = \sqrt{7 + k_{vh/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{h/r}^2)$	319,11°...0° 0°...40,89°	0	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$

Таблиця 3.13. Перешкоди в граничній МС по сусідньому каналу (0-е коло, спрямовані антени, ДС сходяться в одній точці)

Номери стільників джерела перешкод и	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Відхилення від основної пелюстки в антенах		Додаткові втрати на трасі
		Пер. антена	Пр. антенна	
0-1 0-4 MC	$d(r) = d_{\min} = 1...3$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg d_{\min} = 40,2 + (0...9)$	0	0	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-1 0-4 AP	$d(r) = \sqrt{4 + k_{h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(2 + k_{h/r}^2)$	319,11°...0° 0°...40,89°	0	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$

0-2 0-5 МС	$d(r) = \sqrt{3}r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-2 0-5 АР	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\square h/r}^2}r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{\square h/r}^2)$	30°..90° 270°...330°	0	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
0-3 0-6 МС	$d(r) = r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-3 0-6 АР	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\square h/r}^2}r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(1 + k_{\square h/r}^2)$	180°...300° 60°... 180°	0	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$

Таблиця 3.14. Перешкоди в АР по сусідньому каналу (0-е коло, спрямовані антени, ДС розходяться з однієї точки)

Номери стільників в джерела перешкоди	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Відхилення від основної пелюстки в антенах		Додаткові втрати на трасі
		Пер. антена	Пр. антена	
0-1 0-4 МС	$d(r) = \sqrt{3 + k_{\square h/r}^2}r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(3 + k_{\square h/r}^2)$	0	0°...40,89°319,11°.. .0°	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-1 0-4 ЛР	$d(r) = \sqrt{9}r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	300° 0	0° 60°	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$

0-2 0-5 МС	$d(r) = \sqrt{k_{\square h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 20\lg k_{\square h/r}$	0	60°... 180° 180°...300°	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-2 0-5 АР	$d(r) = d_{\min} = 1...3$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg d_{\min} = 40,2 + (0$	210° 150°	150° 210°	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
0-3 0-6 МС	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\square h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(1 + k_{\square h/r}^2)$	0	270°...330° 30°...90°	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-3 0-6 АР	$d(r) = \sqrt{9} \cdot r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	0° 300°	60° 0°	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$

Таблиця 3.15. Перешкоди в АР по сусідньому каналу (0-е коло, направлені антени, ДС сходиться в одній точці)

Номери стільників джерела перешкоди	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ	Відхилення від основної пелюстки в антенах		Додаткові втрати на трасі
		Пер. антена	Пр. антена	
0-1 0-4 МС	$d(r) = \sqrt{3 + k_{\square h/r}^2} \cdot r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(3 + k_{\square h/r}^2)$	0	0°...40,89° 319,11°...0°	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-1 0-4 АР	$d(r) = \sqrt{12} \cdot r$ $L(d(r)) = 50,99 + 20\lg r$	330° 30°	30° 330°	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$

0-2 0-5 МС	$d(r) = \sqrt{k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 20\lg k_{\square h/r}^2$	0	60°... 180° 180°...300°	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-2 0-5 АР	$d(r) = \sqrt{3} r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	30° 330°	90° 270°	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
0-3 0-6 МС	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(1 + k_{\square h/r}^2)$	0	270°...330° 30°...90°	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
0-3 0-6 АР	$d(r) = \sqrt{3} r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	270° 90°	330° 30°	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$

Таблиця 3.16. Перешкоди в граничній МС (1-е коло спрямовані антени)

Номери стільників джерела перешкоди	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ	Відхилення від основної пелюстки в антенах		Додаткові втрати на трасі
		Пер. антена	Пр. антена	
1-1 МС	$d(r) = r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
1-1 АР	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(1 + k_{\square h/r}^2)$	150°...210°	0	$A_{\text{дод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
1-2, 1-6 МС	$d(r) = \sqrt{3} r$ $L(d(r)) = 44,97 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{дод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$

1-2, 1-6 AP	$d(r) = \sqrt{7 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{\square h/r}^2)$	240°... 280,9° 79,1°...120°	0	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
1-3, 1-5 MC	$d(r) = \sqrt{7} r$ $L(d(r)) = 48,65 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
1-3, 1-5 AP	$d(r) = \sqrt{19 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(19 + k_{\square h/r}^2)$	300°...330° 30°...60°	0	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$
1-4 MC	$d(r) = 3r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	0	0	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow MC(i)}$
1-4 AP	$d(r) = \sqrt{25 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(25 + k_{\square h/r}^2)$	346,1°... 13,9°	0	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow MC(i)}$

Таблиця 3.17. Перешкоди в AP (1-е коло, спрямовані антени)

Номер и стільни ків джерел а перешк оди	Відстань між джерелом перешкоди і рецептором: $d(r)$, м; Втрати в просторі: $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg(d)$, дБ.	Відхилення від основної пелюстки в антенах		Додаткові втрати на трасі
		Пер. антенн а	Пр. антенна	
1-1 MC	$d(r) = \sqrt{1 + k_{\square h/r}^2} r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(1 + k_{\square h/r}^2)$	0	346,1°...13,9°	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow AP(i)}$
1-1 AP	$d(r) = \sqrt{9} r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	180°	0	$A_{\text{доод.}AP(j) \rightarrow AP(i)}$
1-2,	$d(r) = \sqrt{3 + k_{\square h/r}^2} r$	0	30°...60°	$A_{\text{доод.}MC(j) \rightarrow AP(i)}$

1-6 MC	$L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(3 + k_{h/r}^2)$		300°... 330°	
1-2, 1-6 AP	$d(r) = \sqrt{9}r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	240° 120°	60° 300°	$A_{\text{од.}AP(j) \rightarrow AP(i)}$
1-3, 1-5 MC	$d(r) = \sqrt{7 + k_{h/r}^2}r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{h/r}^2)$	0	79,1°... 120° 240°.. 280,1°	$A_{\text{од.}MC(j) \rightarrow AP(i)}$
1-3, 1-5 AP	$d(r) = \sqrt{9}r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	300° 60°	120° 240°	$A_{\text{од.}AP(j) \rightarrow AP(i)}$
1-4 MC	$d(r) = \sqrt{9 + k_{h/r}^2}r$ $L(d(r)) = 40,2 + 20\lg r + 10\lg(9 + k_{h/r}^2)$	0	150°... 210°	$A_{\text{од.}MC(j) \rightarrow AP(i)}$
1-4 AP	$d(r) = \sqrt{9}r$ $L(d(r)) = 49,74 + 20\lg r$	0	180°	$A_{\text{од.}AP(j) \rightarrow AP(i)}$

3.3. Взаємний вплив параметрів і вибір режимів роботи безпроводової комп'ютерної мережі стандарту IEEE 802.11

На цій стадії проектування на підставі отриманих залежностей рівнів сигналів і перешкод в стільниках необхідно остаточно вибрати режими роботи WLAN [10, 12, 17]:

- швидкість роботи;
- робочі частотні канали;
- обладнання з необхідними характеристиками (моделі точок доступу, антени AP і антенні фідери, моделі MC);
- рівні потужностей передавачів AP і MC;
- радіус стільників;

- розташування, орієнтири і висоту установки антен AP у стільниках.

Параметри WLAN необхідно обрати таким чином, що б забезпечити максимальне відношення сигнал/перешкода в рецепторах WLAN. Для оцінки відношення сигнал/перешкода необхідно обчислити сумарну внутрішньосистемну перешкоду (a_{AP_INT} та a_{MC_INT}), яка складається з перешкод від сусідніх стільників (a_{AP} та a_{MC}) і рівня власних шумів приймача (F_{AP} та F_{MC}). Перешкодою від сусіднього стільника вважається найбільша перешкода від AP або MC стільника. У табл. 3.18 показані різні методи, що дозволяють досягти найбільшого відношення сигнал/перешкода в рецепторах WLAN.

При використанні розроблених алгоритмів механізму резервування середовища передачі виключаються внутрішньосистемні перешкоди між стільниками, що працюють на одному частотному каналі. Тому, при розрахунку сумарного рівня перешкод, будуть діяти тільки перешкоди від сусідніх стільників, які працюють на частотних каналах, що не перекриваються (0-е коло). Для зменшення падіння пропускну здатності через розподіл її між сусідніми стільниками, необхідно домагатися мінімальної потужності випромінювання мобільних станцій і точок доступу [73, 74].

У МС і АР рівні перешкод можуть відрізнятись, також різними будуть і допустимі рівні перешкод ($P_{AP_дод.рів.перешкод}$ та $P_{МС_дод.рів.перешкод}$). Якщо рівень сумарної внутрішньосистемної перешкоди (в АР або МС) перевищує допустимий, то зв'язку з прийнятною якістю між АР та граничною МС не буде. В цьому випадку необхідно оцінити зменшення радіуса зони обслуговування.

Наступним кроком буде обчислення дефіциту в рівні сигналу в МС і АР:

$$\partial P_{МС} = a_{МС_INT} - P_{МС_дод.рів.перешкод}; \quad \partial P_{АР} = a_{АР_INT} - P_{АР_дод.рів.перешкод}; \quad (3.26)$$

де $\partial P_{МС}$ - дефіцит рівня сигналу в МС, дБ;

$\partial P_{АР}$ - дефіцит рівня сигналу в АР, дБ;

$a_{МС_INT}$ та $a_{АР_INT}$ - сумарні рівні внутрішньосистемних перешкод в МС і АР, дБ;

$P_{МС_дод.рів.перешкод}$ та $P_{АР_дод.рів.перешкод}$ - допустимі рівні перешкод в МС і АР, дБ.

Далі по дефіциту в рівні сигналу обчислюється зменшення зони обслуговування. При цьому також необхідно врахувати зменшення додаткових втрат на трасі поширення між МС і АР:

$$\partial P: \quad \Delta A_{дод.}(n); \quad (3.27)$$

де ∂P - дефіцит рівня сигналу, дБ;

n - зменшення радіусу стільників, раз;

$\Delta A_{дод.}(n)$ - зменшення додаткових втрат на трасі поширення сигналу в залежності від зменшення радіуса стільників, дБ.

Якщо $\Delta A_{дод.}(n) = 0$, то можна обчислити зменшення радіуса стільників:

$$\partial P = 20 \log(n);$$

$$20 \log 10^{\partial P/20} = 20 \log(n);$$

$$n = 10^{\partial P/20}. \quad (3.28)$$

Як приклади можна привести відповідності: при $\partial P = 6$ дБ, $n = 2$ або 50%, при $\partial P = 12$ дБ, $n = 4$ або 75%, $\partial P = 0,8$ дБ, $n = 1,1$ або 9%. Зону, обмежену параметром n , можна назвати зоною гарантованого зв'язку.

Якщо сумарна внутрішньосистемна перешкода визначається перешкодами від сусідніх стільників, то зменшення радіуса стільників означає, що сусідні стільники утворюють єдиний колізійний домен, розділяючи смугу пропускання між собою. У незавантаженої безпроводової мережі - це, як мінімум, може привести до деякого зменшення реальної пропускної здатності. У завантаженої WLAN високі внутрішньосистемні перешкоди, швидше за все, приведуть до повної непрацездатності мережі поза зоною гарантованої зв'язку.

У табл. 3.19 - 3.24 наведено розрахунок сумарного рівня перешкод від сусідніх стільників для WLAN, в яких до точок доступу підключені всеспрямовані антени [11, 66].

Таблиця 3.19. Сумарна внутрішньосистемна перешкода по сусідньому каналу у граничній МС (0-е коло, всеспрямовані антени)

Тип перешкоди	Втрати в рівні сумарної перешкоди на трасі, перешкоди, напрямку, дБ	Висновки
Перешкоди від МС	$40,2 + 20\lg d_{\min}$	Якщо $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 3,68$ то $r \geq 8,9$ м
Перешкоди від AP	$40,2 + 20\lg r + 10\lg(7 + k_{Vh/r}^2) - 10\lg 2 =$ $= 45,64 + 20\lg r$	

Оскільки втрати у рівні перешкоди (рецептор - МС) від AP по сусідньому каналу значно більше, ніж втрати в рівні перешкоди від AP по каналу, що перекривається (при $ch = 24$ дБ, різниця складе $45.64 - 41.44 + 24 =$

28.2 дБ), то перешкодами від АР, які працюють на сусідніх каналах можна знехтувати.

Таблиця 3.20. Сумарна внутрішньосистемна перешкода по каналу, що перекривається у граничній МС (1-е коло, всеспрямовані антени)

Тип перешкоди	Втрати в рівні сумарної перешкоди на трасі, перешкоди, напрямку, дБ	Висновки
Перешкоди від АР	$52,24 + 20\lg r - 10\lg \left(10^{\frac{6,02}{10}} + 2 \cdot 10^{\frac{3,59}{10}} + 2 \cdot 10^{\frac{0,09}{10}} + 10^0 \right) =$ $= 52,24 + 20\lg r - 10\lg(12,03) = 41,44 + 20\lg r$	<p>Якщо</p> $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02$ <p>дБ</p>

Таблиця 3.21. Сумарна внутрішньосистемна перешкода у граничній МС (всеспрямовані антени)

Тип перешкоди	Втрати в рівні сумарної перешкоди на трасі, перешкоди, напрямку, різниці в робочих частотах, дБ	Висновки
Перешкоди від МС	$40,2 + ch + 20\lg d_{\min}$	Якщо $r \geq 8,9$
Перешкоди від АР	$41,44 + 20\lg r$	<p>Якщо</p> $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02 \text{ дБ}$

Виходячи з отриманих значень (табл. 3.19 - 3.21), можна розрахувати залежність сумарного рівня перешкод в граничних значень $EIRP_{AP}$ та $EIRP_{MC}$

$$a_{RX_MC} = G_{MC} + 10\lg \left(10^{\frac{(EIRP_{MC} - 40,2 - ch - 20\lg d_{\min})}{10}} + 10^{\frac{(EIRP_{AP} - 41,44 - 20\lg r)}{10}} \right);$$

$$\begin{aligned}
a_{RX_MC} &= G_{MC} + 10\lg \left(10^{\frac{(EIRP_{MC}-40,2-ch-20\lg(2r/\sqrt{n}))}{10}} + 10^{\frac{(EIRP_{AP}-41,44-20\lg r)}{10}} \right); \\
a_{RX_MC} &= G_{MC} + 10\lg \left(10^{\frac{(EIRP_{MC}-40,2-ch-20\lg r-20\lg(2)+20\lg\sqrt{n})}{10}} + 10^{\frac{(EIRP_{AP}-41,44-20\lg r)}{10}} \right); \\
a_{RX_MC} &= G_{MC} - 40,2 - 20\lg r + \\
&+ 10\lg \left(10^{\frac{(EIRP_{MC}-ch-6,02+10\lg n)}{10}} + 10^{\frac{(EIRP_{AP}-1,24)}{10}} \right), \text{дБм} \quad (3.29)
\end{aligned}$$

Розрахунок сумарного рівня перешкод в АР (табл. 3.22 - 3.24) проводиться аналогічно. Оскільки втрати в рівні перешкод від АР по сусідньому каналу значно більше, ніж втрати в рівні перешкоди від АР по каналу, що перекривається (при $ch = 24$ дБ; різниця складе $40,2-41,96 + 24 = 22,24$ дБ), то перешкодами від АР, що працюють на сусідніх каналах можна знехтувати.

Таблиця 3.22. Сумарна внутрішньосистемна перешкода в АР (0-е коло, всеспрямовані антени)

Тип перешкоди	Втрати в рівні сумарної перешкоди на трасі, перешкоди, напрямку, дБ	Висновки
Перешкоди від АР	$44,97 + 20\lg r - 10\lg(3\lg 0^0) = 40,2 + 20\lg r$	Якщо $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02$ дБ

Таблиця 3.23. Сумарна внутрішньосистемна перешкода в АР (1-е коло, всеспрямовані антени)

Тип перешкоди	Втрати в рівні сумарної перешкоди на трасі, перешкоди, напрямку, дБ	Висновки
Перешкоди від АР	$49,74 + 20\lg r - 10\lg(6\text{дБ}) = 41,96 + 20\lg r$	Якщо $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 3,51$ дБ

Таблиця 3.24. Сумарна внутрішньосистемна перешкода в АР (всеспрямовані антен)

Тип перешкоди	Втрати в рівні сумарної перешкоди на трасі, перешкоди, напрямку, різниці в робочих частот, дБ	Висновки
Перешкоди від АР	$41,96 + 20\lg r$	Якщо $EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02$

Рівень внутрішньосистемної перешкоди в АР обчислюється таким чином:

$$a_{RX_AP} = EIRP_{AP} + G_{AP} - 41,96 + 20\lg r, \text{ дБ.} \quad (3.30)$$

Якщо мережа складається з 2-х або 3-х стільників, працюючих на частотних каналах, що не перекриваються, то рівень внутрішньосистемних перешкод обчислюється по 0-му колу з урахуванням зменшення рівня позасмугового випромінювання [11, 66]:

$$a_{RX_MC} = EIRP_{MC} + G_{MC} - 40,2 - 20\lg rd_{\min} - ch;$$

$$a_{RX_MC} = EIRP_{MC} + G_{MC} - 40,2 - 20\log(2\sqrt{r} / \sqrt{n}) - ch;$$

$$a_{RX_MC} = EIRP_{MC} + G_{MC} - 40,2 - 20\log(2) - 20\log r + 20\log \sqrt{n} - ch;$$

$$a_{RX_MC} = EIRP_{MC} + G_{MC} - 46,22 - 20\log r + 10\log n - ch, \text{ дБ}; \quad (3.31)$$

$$a_{RX_AP} = EIRP_{AP} + G_{AP} - 40,2 - 20\log r - ch, \text{ дБ}. \quad (3.32)$$

Якщо в рецепторах WLAN рівні власних шумів приймачів і рівні міжсистемних перешкод значно менше сумарного рівня перешкод від сусідніх стільників, то відношення сигнал / перешкода можна оцінити за формулами, отриманими з (2.3), (2.5), (2.6), (3.10), (3.11), (3.13), (3.14), (3.25), (3.29) - (3.32).

Відношення сигнал/перешкода в МС (з урахуванням перешкод 0-го та 1-го кола):

$$P_{RX-MC} - a_{RX_MC} = EIRP_{AP} - \sigma - 10\lg\left(10^{\frac{EIRP_{MC}-ch-6,02+10\log n}{10}} + 10^{\frac{EIRP_{AP}-1,24}{10}}\right);$$

$$P_{RX-MC} - a_{RX_MC} = -\sigma - G_{MC} - 10\lg\left(10^{\frac{EIRP_{MC}-EIRP_{AP}-ch-6,02+10\log n}{10}} + 0,75\right), \text{ дБ}; \quad (3.33)$$

$$P_{RX-AP} - a_{RX_AP} = EIRP_{MC} - EIRP_{AP} - \sigma + 1,76, \text{ дБ}; \quad (3.34)$$

Для мережі, що складається з 2-х або 3-х стільників, які працюють частотних каналах, що не перекриваються отримуємо наступні залежності:

$$P_{RX-MC} - a_{RX_MC} = EIRP_{AP} - EIRP_{MC} - 20\log r - \sigma + 20\lg d_{\min} + ch;$$

$$P_{RX-MC} - a_{RX_MC} = EIRP_{AP} - EIRP_{MC} - \sigma + 6,02 - 10\log n + ch, \text{ дБ}; \quad (3.35)$$

$$P_{RX-AP} - a_{RX_AP} = EIRP_{MC} - EIRP_{AP} - \sigma + ch, \text{ дБ}. \quad (3.36)$$

Необхідно відзначити, що наведені формули (3.29) - (3.36) отримані для випадків, заданим відношенням:

$$EIRP_{AP} - EIRP_{MC} \geq 6,02 \text{ дБ} \quad (3.37)$$

Докладний аналіз рівнів внутрішньосистемних перешкод в безпроводових мережах, де використовують спрямовані антени, не проведений через громіздкість обчислень. Однак за допомогою розробленої програми для розрахунку WLAN можна отримати різні залежності, що допомагають раціонально вибрати параметри і режими роботи WLAN.

3.4. Критерії міжсистемної електромагнітної сумісності

Етап 1: Визначення допустимого рівня міжсистемних перешкод

Допустимий рівень міжсистемних перешкоди можна обчислити так [41]:

$$\begin{aligned}
 a_{\text{доп.}} &= 10 \lg P_{\text{доп.}}; \quad a_{\text{INT}} = 10 \lg P_{\text{INT}}; \quad a_{\text{EXT}} = 10 \lg P_{\text{EXT}}; \\
 P_{\text{доп.}} &= 10^{\frac{a_{\text{доп.}}}{10}}; \quad P_{\text{INT}} = 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}}; \quad P_{\text{EXT}} = 10^{\frac{a_{\text{EXT}}}{10}} \\
 P_{\text{INT}} + P_{\text{EXT}} + F_{\text{мВм}} &\leq P_{\text{доп.}}; \\
 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} + 10^{\frac{a_{\text{EXT}}}{10}} + 10^{\frac{F}{10}} &\leq 10^{\frac{a_{\text{доп.}}}{10}}; \\
 10^{\frac{a_{\text{EXT}}}{10}} &\leq 10^{\frac{a_{\text{доп.}}}{10}} - 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} - 10^{\frac{F}{10}}; \\
 \lg \left(10^{\frac{a_{\text{EXT}}}{10}} \right) &\leq \lg \left(10^{\frac{a_{\text{доп.}}}{10}} - 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} - 10^{\frac{F}{10}} \right); \\
 10^{\frac{a_{\text{доп.}}}{10}} - 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} - 10^{\frac{F}{10}} &> 0; \\
 a_{\text{EXT}} &\leq 10 \lg \left(10^{\frac{a_{\text{доп.}}}{10}} - 10^{\frac{a_{\text{INT}}}{10}} - 10^{\frac{F}{10}} \right)
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

Де $a_{\text{доп.}}$ - допустимий рівень перешкод в рецепторі, дБ

a_{INT} - рівень внутрішньосистемних перешкод від сусідніх стільників, дБ;

F - рівень власних шумів приймача, дБ;

a_{EXT} - допустимий рівень міжсистемних перешкод в рецепторі, дБ;

$P_{\text{доп.}}$ - допустимий рівень перешкод в рецепторі, мВт;

P_{INT} - рівень внутрішньосистемних перешкод від сусідніх стільників, мВт;

F_{MBM} - рівень власних шумів приймача, мВт;

P_{EXT} - допустимий рівень міжсистемних перешкод в рецепторі, мВт.

З використанням отриманих раніше залежностей виведені формули для розрахунку допустимих рівнів міжсистемних перешкод в рецепторах WLAN

$$a_{EXT-MC} \leq 10 \cdot \log \left(10^{\frac{EIRP_{AP}+G_{MC}-40,2-20\log r-\sigma-\rho_{MC}}{10}} - 10^{\frac{EIRP_{MC}+G_{MC}-46,22-20\log r+10\log n-ch}{10}} - 10^{\frac{EIRP_{AP}+G_{MC}-41,44-20\log r}{10}} - 10^{\frac{F_{MC}}{10}} \right) \quad (3.39)$$

$$a_{EXT-AP} \leq 10 \lg \left(10^{\frac{EIRP_{MC}+G_{RX_AP}-40,2-20\log r-\sigma-\rho_{AP}}{10}} - 10^{\frac{EIRP_{AP}+G_{AP}-41,96-20\log r}{10}} - 10^{\frac{F_{AP}}{10}} \right). \quad (3.40)$$

Для трьох стільників, що використовують в AP всеспрямовані антени і працюють на частотних каналах, що перекриваються, на підставі формул (2.3), (2.5), (2.6), (3.10), (3.11), (3.13), (3.14), (3.15), (3.17), (3.25), (3.31), (3.32), (3.37), (3.38) отримані наступні залежності:

$$a_{EXT-MC} \leq 10 \cdot \log \left(10^{\frac{EIRP_{AP}+G_{MC}-40,2-20\log r-\sigma-\rho_{MC}}{10}} - 10^{\frac{EIRP_{MC}+G_{MC}-46,22-20\log r+10\log n-ch}{10}} - 10^{\frac{F_{MC}}{10}} \right); \quad (3.41)$$

$$a_{EXT-AP} \leq 10 \lg \left(10^{\frac{EIRP_{MC}+G_{RX_AP}-40,2-20\log r-\sigma-\rho_{AP}}{10}} - 10^{\frac{EIRP_{AP}+G_{AP}-40,2-20\log r-ch}{10}} - 10^{\frac{F_{AP}}{10}} \right). \quad (3.42)$$

Етап 2: Визначення рівнів міжсистемних перешкод в рецепторах WLAN

Визначення рівня перешкод в рецепторі проводиться на основі даних, отриманих при аналізі ЕМО. Краще, якщо аналіз ЕМО проводився спектральним аналізатором з антенами, які потім були використані при організації мережі. Тоді визначення рівня міжсистемних перешкод в рецепторі (AP або MC) зводиться до того, що з виміряного рівня перешкоди

віднімаються втрати у антенному фідері рецептора (для МС дорівнюють нулю) і втрати в приймальній антени у напрямку джерела перешкоди (для МС також дорівнюють нулю) [51, 54, 58, 74].

Якщо вимірювання проводилися з іншого антеною, то їх можна повторити, приєднавши аналізатор спектру до антени АР (більш кращий варіант), або врахувати різницю в КП антени АР і антени за допомогою якої проводилися вимірювання. У другому випадку додатково необхідно врахувати втрати через відмінності в поляризації антен.

Якщо вимірювання з яких-небудь причин не проводилися, але відомі параметри заважаючого передавача, то можна оцінити очікуваний рівень перешкоди в приймачі, заповнивши табл. 3.25.

Рівень перешкоди в АР дорівнюватиме [55]:

$$\begin{aligned}
 a_{RX_перешкоди \rightarrow AP(i)} = & P_{TX_перешкоди} - ch(f_i, f_{перешкоди}) - \phi_{TX_перешкоди} + \\
 & + G_{TX_перешкоди} - V G_{TX_перешкоди \rightarrow AP(i)} - L_{перешкоди \rightarrow AP(i)} - \\
 & - A_{дод._перешкоди \rightarrow AP(i)} + G_{RX_AP(i)} - \\
 & - V G_{RX_перешкоди \rightarrow AP(i)} - \partial G_{RX_перешкоди \rightarrow AP(i)} - \phi_{RX_AP(i)}
 \end{aligned} \tag{3.43}$$

Рівень перешкоди в АР дорівнюватиме:

$$\begin{aligned}
 a_{RX_перешкоди \rightarrow MC(i)} = & P_{TX_перешкоди} - ch(f_i, f_{перешкоди}) - \\
 & - \phi_{TX_перешкоди} + G_{TX_перешкоди} - V G_{TX_перешкоди \rightarrow MC(i)} - \\
 & - L_{перешкоди \rightarrow MC(i)} - A_{дод._перешкоди \rightarrow MC(i)} + G_{MC} - \partial G_{RX_перешкоди \rightarrow MC(i)}
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

Зменшення рівня перешкоди через розбіжності смуги частот (ch) залежить від того, що потрапляє в смугу приймача: основне або позасмугове випромінювання, яке заважає передавачу. Відповідно, рівень перешкоди в приймачі необхідно скорегувати з урахуванням спектральної маски впливаючої перешкоди, що застосовується в приймачі модуляції і методу кодування.

Втрати через різницю в поляризації антен джерела і рецептора перешкоди можна оцінити за допомогою табл. 3.26.

В цілому, методи оцінки міжсистемних і внутрішньосистемних перешкод практично ідентичні. Якщо на рецептор діє кілька зовнішніх перешкод, то необхідно або виміряти їх сумарний рівень, або підсумувати з урахуванням їх спектральних масок аналогічно внутрішньосистемні перешкоди.

Таблиця 3.25. Визначення рівня міжсистемної перешкоди в рецепторі

Рецептор	АР	МС
Джерело перешкоди	Міжсистемна перешкода	
Траса	Перешкода => АР	Перешкода => МС
Потужність передавача, дБ	$P_{TX_перешкоди}$	
Зменшення рівня перешкоди через розбіжності смуги частот, дБ	$ch(f_i, f_{перешкоди})$	
Втрати в фідері передавача, дБ	$\Phi_{TX_перешкоди}$	
КП антени передавача, дБі	$G_{TX_перешкоди}$	
Втрати в передавальній антені в напрямку рецептора, дБ	$\square G_{TX_перешкоди \rightarrow AP(i)}$	$\square G_{TX_перешкоди \rightarrow MC(i)}$
Втрати в просторі, дБ	$L_{перешкоди \rightarrow AP(i)}$	$L_{перешкоди \rightarrow MC(i)}$
Додаткові втрати на трасі, дБ	$A_{дод._перешкоди \rightarrow AP(i)}$	$A_{дод._перешкоди \rightarrow MC(i)}$
КП приймальні антени, дБі	$G_{RX_AP(i)}$	$G_{МС}$
Втрати в напрямку перешкоди в приймальній антені, дБ	$\square G_{RX_перешкоди \rightarrow AP(i)}$	0
Втрати через різницю в поляризації антен джерела і рецептора перешкоди, дБ	$\partial G_{RX_перешкоди \rightarrow AP(i)}$	$\partial G_{RX_перешкоди \rightarrow MC(i)}$

Втрати в фідері приймальної антени, дБ	$\phi_{RX_AP(i)}$	0
Рівень перешкоди в рецепторі, дБ	$a_{RX_перешкоди \rightarrow AP(i)}$	$a_{RX_перешкоди \rightarrow MC(i)}$

Якщо рівень міжсистемних перешкод в рецепторі перевищує допустимий, то необхідно або зменшити рівень міжсистемних перешкод (екранування, територіальний, частотне рознесення, використання частотних фільтрів і т.д.), або збільшити допустимий рівень перешкод (зменшуючи радіус стільників, збільшуючи потужність передавачів МС і/або АР, зменшуючи швидкість передачі даних, вибравши іншу антену АР або обладнання з меншим вимогою до відношенню сигнал/перешкода і т.д.) [51, 54, 58, 74].

Таблиця 3.26. Втрати через різницю в поляризації антен джерела і рецептора перешкоди

Поляризація антени приймача	Поляризація антени приймача				
	Горизонтальна		Вертикальна		Кругова
	$G < 10$ дБі	$G \geq 10$ дБі	$G < 10$ дБі	$G \geq 0$ дБі	
Горизонтальна, $G < 10$ дБі	0	0	-16	-16	-3
Горизонтальна, $G > 10$ дБі	0	0	-16	-20	-3
Вертикальна, $G < 10$ дБі	-16	-16	0	0	-3
Вертикальна, $G > 10$ дБі	-16	-20	0	0	-3
Кругова	-3	-3	-3	-3	0

3.5. Реалізація безпроводової мережі

Реалізація безпроводової мережі складається з двох основних етапів: встановлення та налаштування обладнання; тестування.

Етап 1: Встановлення і налаштування обладнання WLAN

Процес встановлення і настройки обладнання можна розділити співвідносно з рівнями моделі OSI [6, 7, 63, 78]:

1. Фізичний рівень - установка, підключення та налаштування обладнання мережі:
 - a. установка безпроводового обладнання (точок доступу, мостів і т.д.);
 - b. установка антен, антенних кабелів, і кріплень;
 - c. установка підсилювачів потужності (якщо використовуються).
2. Логічний рівень - управління IP-адресацією, настройка VLAN, систем безпеки, адміністрування і т.д.

Розміщення точок доступу в приміщеннях здійснюється в місцях, визначених як оптимальні в результаті дослідження, що передує установці. При монтажі поза приміщеннями важливо забезпечити надійну герметизацію роз'ємів. Крім того, обладнання що монтується на вулиці повинно працювати при температурах від -50 до +50 градусів. У разі значного віддалення місця кріплення антени від приміщень на вулиці доводиться розміщувати і активне обладнання. У цьому випадку або вибирається модель всепогодного виконання, або обладнання поміщається в термостатований контейнер, який забезпечує робочий діапазон температур.

Важливим фактором також є організація безперебійного живлення в необслуговуваних точках, заземлення, громовідводи.

Етап 2. Тестування WLAN

Тестування (випробування) - необхідний крок при введенні в експлуатацію безпроводової мережі. Випробування повинні гарантувати надійне безпроводове з'єднання.

Після установки обладнання безпроводової мережі необхідно провести "обхід" території, перевірити рівні сигналів і перешкод в різних точках зони покриття, відношення числа зіпсованих пакетів до успішно прийнятим і т.д.

Як інструмент для тестування можна використовувати різні аналізатори спектра та/або звичайний ноутбук з безпроводовою картою і встановленим відповідним програмним забезпеченням. Існує безліч різних програм, платних і безкоштовних, що дозволяють перевірити роботу безпроводової мережі. У даній роботі використана програма [74, 75].

Для діагностики WLAN також можна користуватися стандартним програмним забезпеченням, що надається виробником безпроводового обладнання. Його можливості, як правило, обмежені і забезпечують мінімальний набір інформації про роботу WLAN.

Для отримання більш повної інформації про мережевий трафік можна додатково використовувати сніфери і аналізатори протоколів, які дозволять отримати інформацію про переданих в мережі даних [17, 49, 50].

Контрольні запитання

1. Що включає в себе проектування WLAN?
2. На які стадії можна розділити процес проектування WLAN?
3. Які етапи в себе включає кожна з стадій проектування?
4. На якій саме стадії проектування і як визначаються власні шуми радіоприймача?
5. При проектуванні безпроводових комп'ютерних мереж в точках доступу які можуть бути застосовані антени?
6. Антени якого типу найкраще використовувати при проектуванні WLSN?
7. Що необхідно враховувати при виборі розміру стільника?
8. Як ви розумієте термін «оптимальна комбінація частот»? ?
9. В який спосіб пов'язані чутливість приймача, рівень власних шумів приймача і рекомендоване відношення сигнал / завада&
10. Чим визначається рівень власних шумів приймача?
11. Поясніть термін завади або «перешкоди нульового кола».

12. Поясніть термін завади або «перешкоди першого кола».
13. Поясніть термін завади або «перешкоди третього кола».
14. На які групи можна розділити складові за якими обчислюється рівень міжсистемної перешкоди?
15. На які параметри слід орієнтуватися при виборі режиму роботи WLAN?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The importance of terrestrial wireless communications [Електронний ресурс] Mario Maniewicz // International Telecommunication Union – Режим доступу: https://www.itu.int/en/itu-news/Documents/2019/2019-04/2019_ITU_News04-en.pdf (дата звернення 25.06.2020)

2. IEEE 802.11, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications» [Електронний ресурс] IEEE // Режим доступу: DOI:10.1109/ieeestd.2016.7786995 (дата звернення 26.06.2020)

3. Wi-Fi global economic value to reach \$5 trillion in 2025 [Електронний ресурс] Wi-Fi Alliance // Режим доступу: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-global-economic-value-to-reach-5-trillion-in-2025> (дата звернення 26.06.2020)

4. Європейський інститут телекомунікаційних стандартів [Електронний ресурс] ETSI // Режим доступу: <https://www.etsi.org> (дата звернення 26.06.2020)

5. IEEE 802.11b, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band» [Електронний ресурс] IEEE // Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9721833> (дата звернення 26.06.2020)

6. Лемешко А.В. Розробка удосконаленого алгоритму контролю чутливості зони обслуговування точок доступу стандарту IEEE 802.11ax / А.В. Лемешко, А.О. Макаренко, Н.В. Руденко, О.М. Ткаченко, Г.Я. Кіс // Зв'язок. - 2020. - №4. – С.50-56.

7. Лемешко А.В. Аналіз проблем ЕМС з метою розробки ефективної моделі проектування БЛМ на базі інформаційних систем з урахуванням електромагнітних завад / А.В. Лемешко, О.М. Ткаченко, А.О. Макаренко, О.М. Ткаченко, Д.В. Сорокін // Зв'язок. - 2020. - №5. – С.16-21.

8. Лемешко А.В. Алгоритм контролю чутливості зони обслуговування точок доступу технології Wi-Fi 6 / А.В. Лемешко, О.М. Ткаченко О.А.

Макаренко // XI міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасний рух науки». – Дніпро.: САУ, 8-9 жовтня, 2020. - Т.1. - С. 384-385.

9. Лемешко А. В. Регулювання перекриття зон обслуговування точок доступу технології Wi-Fi 6 / А.В. Лемешко, О.М. Ткаченко, О.А. Макаренко // Всеукраїнська наукова конференція «Актуальні проблеми кібербезпеки» – К.: ДУТ, 22 жовтня, 2020 – С. 10-11.

10. IEEE 802.11a, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band» [Електронний ресурс] IEEE // Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/815305> (дата звернення 26.06.2020)

11. Tanenbaum A.S. Computer Networks / A.S. Tanenbaum, D.J. Wetherall. – 5-th Ed. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 p.

12. IEEE 802.11g, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band» [Електронний ресурс] IEEE // Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1210624> (дата звернення 26.06.2020)

13. Bellalta B. IEEE 802.11 ax: High-efficiency WLANs / Boris Bellalta / IEEE Wireless Communications. - 2016. - №23(1). - P. 38–46

14. Texas Instruments Accelerates Wireless Ethernet Industry With Royalty-Free Licenses for IEEE 802.11g High-Rate Technology [Електронний ресурс] Texas Instruments // Режим доступу: – <https://www.ti.com/sc/docs/news/2001/01014.htm> (дата звернення: 23.07.2020)

15. Shahwaiz Afaqui M. IEEE 802.11 ax: Challenges and requirements for future high efficiency WiFi / M. Shahwaiz Afaqui, E.G.Villegas, E.L. Aguilera / IEEE Wireless Communications. – 2016.- №99. – P. 2–9

16. Survey and Performance Evaluation of the Upcoming Next Generation WLAN Standard-IEEE 802.11 ax [Електронний ресурс] Qiao Qu, Bo Li, Mao Yang et al./ – Режим доступу: – <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1806/1806.05908.pdf> (дата звернення: 23.07.2020)

17. Ткаченко О.М. Особливості створення мережевої інфраструктури великого підприємства / О.М. Ткаченко, А.В. Лемешко, Д.В. Кращенко, Р.С. Кадюк, Т.М. Стельмах // Наукові записки УНДІЗ. – 2019. – №3(55). – С.12-18.
18. Рошан П. Основы построения локальных сетей стандарта IEEE 802.11 / П. Рошан, Д. Лиэри; Пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс». 2004. – 304 с.
19. Khorov E. A Tutorial on IEEE 802.11 ax High Efficiency WLANs / E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, G.Bianchi // IEEE Communications Surveys & Tutorials. V.21. - №1, 2019. - P. 197–216
20. Potential and pitfalls of multi-armed bandits for decentralized spatial reuse in WLANs [Електронний ресурс] Francesc Wilhelmi, Sergio Barrachina-Munoz, Boris Bellalta et al. / – Режим доступу: – <https://arxiv.org/pdf/1805.11083.pdf> (дата звернення: 20.07.2020)
21. Shen Z. Research and Performance Evaluation of Spatial Reuse Technology for Next Generation WLAN / Zhao Shen, Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, Xiaobo Li, Yi Jin//International Wireless Internet Conference.-2019.- P.41–51.
22. Performance impairments of Bluetooth systems in EMI environment specified by WLAN transmissions [Електронний ресурс] T. Iamsinthorn, S. Pradidkwan, S. Malisuwan, J. Sivaraks / IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility – Режим доступу: – <https://ieeexplore.ieee.org/document/1429163> (дата звернення: 20.07.2020)
23. Barrachina-Munoz S. Wireless Network Simulator for Next-Generation High-Density WLANs / Sergio Barrachina-Munoz, Francesc Wilhelmi, Ioannis Selinis, Boris Bellalta // IEEE 2019 Wireless Days (WD). – 2019.- P.1–8
24. Jamil I. Novel learning-based spatial reuse optimization in dense WLAN deployments / Imad Jamil, Laurent Cariou, Jean-François Hélarde / EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. - 2016. - №1. - P. 184
25. Chi-Kin Chau. Effective static and adaptive carrier sensing for dense wireless CSMA networks / Chi-Kin Chau, Ivan WH Ho, Zhenhui Situ, Soung Chang

Liew, Jialiang Zhang // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2017.- №16(2). – P. 355–366

26. Shahwaiz Afaqui M. Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for IEEE 802.11 ax / Shahwaiz Afaqui, Eduard Garcia-Villegas, Elena Lopez-Aguilera, Graham Smith, Daniel Camps // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – 2015.- P.1060–1065

27. The combination of QoS, aggregation and RTS/CTS in Very High Throughput IEEE 802.11ac networks [Электронный ресурс] Oran Sharona and Yaron Alpert / – Режим доступа: <https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.phycom.2015.01.003> (дата звернення: 12.10.2020)

28. Kulkarni P. Taming the densification challenge in next generation wireless LANs: An investigation into the use of dynamic sensitivity control / Parag Kulkarni, Fengming Cao // Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2015 IEEE 11th International Conference on. - 2015.- P. 860–867

29. Enhanced backoff scheme in CSMA/CA for IEEE 802.11 [Электронный ресурс] Wen-Kuang Kuo, C.-C.J. Kuo / IEEE 58th Vehicular Technology Conference. // Режим доступа: - <https://ieeexplore.ieee.org/document/1286113> (дата звернення: 20.07.2020)

30. Performance analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA medium access control protocol [Электронный ресурс] Tien-Shin Ho, Kwang-Cheng Chen / IEEE Xplore // Режим доступа: - https://www.researchgate.net/publication/3678323_Performance_analysis_of_IEEE_80211_CSMACA_medium_access_control_protocol (дата звернення: 20.07.2020)

31. Simulation-based evaluation of OBSS PD based SR default parameters [Электронный ресурс] Matthew Fischer // Режим доступа: – [https://mentor.ieee.org/IEEE 802.11/dcn/16/11-16-1161-01-00ax-simulation-based-evaluation-of-obss-pd-based-sr-default-parameters.pptx](https://mentor.ieee.org/IEEE%20802.11/dcn/16/11-16-1161-01-00ax-simulation-based-evaluation-of-obss-pd-based-sr-default-parameters.pptx) (дата звернення: 12.11.2020)

32. IEEE 802.11e for QoS - the new standard to provide Quality of Service, QoS for IEEE 802.11 Wi-Fi applications [Электронный ресурс] Electronics Notes // Режим доступа: – <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/802-11e-qos-quality-of-service.php> (дата звернення: 12.11.2020)

33. Dynamic Channel Bonding in Spatially Distributed High-Density WLANs [Электронный ресурс] Sergio Barrachina-Munoz, Francesc Wilhelmi, Boris Bellalta / - Режим доступа: - <https://arxiv.org/pdf/1801.00594.pdf> (дата звернення: 20.07.2020)

34. To Overlap or not to Overlap: Enabling Channel Bonding in High-Density WLANs [Электронный ресурс] Sergio Barrachina-Munoz, Francesc Wilhelmi, Boris Bellalta / - Режим доступа:- <https://arxiv.org/pdf/1803.09112.pdf> (дата звернення: 21.07.2020)

35. IEEE Std IEEE 802.11h-2003 [Электронный ресурс] IEEE // Режим доступа: – <https://www.sis.se/api/document/preview/907801/> (дата звернення: 12.11.2020)

36. IEEE Std IEEE 802.11k-2008 [Электронный ресурс] IEEE // Режим доступа: – <https://ieeexplore.ieee.org/document/4544755> (дата звернення: 12.11.2020)

37. Стеклов В.К. Теорія електричного зв'язку. Підручник / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. - К.: Техніка, 2006. - 548 с.

38. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов / В. А. Галкин. - М.: Горячая линия-Телеком, 2007. - 432 с.

39. Витерби А.Д. Принципы цифровой связи и кодирования / А. Д. Витерби, Д. К. Омура. - М. : Радио и связь, 1982. - 536 с.

40. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. - М. : Техносфера, 2005. - 320 с.

41. Ткаченко О.М. Оцінка працездатності каналу зв'язку / О.М. Ткаченко, Г.О. Гринкевич, Н.Л. Перепелиця, Б.В. Цімура, А.О. Яворський // Наукові записки УНДІЗ. – 2016. – № 3(43). – С. 30–36.

42. Сато Ю. Обработка сигналов / Ю. Сато. – Изд.: Додэка, 2002.– 176 с.

43. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с.

44. TGax Simulation Scenarios. doc. IEEE 802.11- 14/0980r16 [Електронний ресурс] Simone Merlin, Gwen Barriac, Nemanth Sampath, et al // Режим доступу: – https://mentor.ieee.org/IEEE_802.11/dcn/14/11-14-0980-16-00ax-simulation-scenarios.docx (дата звернення: 12.11.2020)

45. NetAlly AirMagnet Survey [Електронний ресурс] NetAlly // Режим доступу: – <https://www.netally.com/products/airmagnet-survey-pro/> (дата звернення: 12.11.2020)

46. AirMagnet Survey PRO: Wireless Site Survey Software [Електронний ресурс] Full Control Networks // Режим доступу: – <https://www.fullcontrolnetworks.co.uk/wp-content/uploads/2020/07/NA-AirMagnet-SurveyPRO-with-AirMapper-Datasheet.pdf> (дата звернення: 12.11.2020)

47. Закон України “Про радіочастотний ресурс України” [Електронний ресурс] Верховна Рада України // Режим доступу: – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1770-14#Text> (дата звернення: 12.11.2020)

48. Быховский М.А. Управление электромагнитным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем: учеб. пособ; под. ред. проф. М.А. Быховского. - М.: ЭКО Трендз, 2006. 376 с.

49. Бадалов А.Л. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: справочник / А.Л. Бадалов, А.С. Михайлов. - М.: Радио и связь, 1990. - 272 с.

50. Электромагнитная совместимость [Електронний ресурс] Schneider-Electric // Режим доступу: – <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=>

downfile&id=2517 (дата звернення: 12.11.2020)

51. Виноградов Е.М. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Виноградов Е.М., Винокуров В.И., Харченко И.П. – Л.: Судостроение, 1986. – 264 с.

52. Концепція оцінювання втрат передачі для радіоліній // Рекомендації сектору радіозв'язку МСЕ-R P.341.

53. Процедура прогнозування для оцінки мікрохвильових завад між станціями, які знаходяться на поверхні Землі, на частотах вище за 0,1 ГГц // Рекомендації сектору радіозв'язку МСЕ-R P.452.

54. Постанова “Про затвердження Технічного регламенту з електромагнітної сумісності обладнання” [Електронний ресурс] / Постанова Кабінету Міністрів України // – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/npas/248735971> (дата звернення: 12.11.2020)

55. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. - 640 с.

56. Рішення “Про затвердження Переліку радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв, для експлуатації яких не потрібні дозволи на експлуатацію” [Електронний ресурс] Верховна Рада України // Режим доступу: – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0345-14#Text> (дата звернення: 12.11.2020)

57. Олифер В. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник / В. Олифер, Н. Олифер. - СПб: Питер. - 2017. - 992 с.

58. MikroTik Wireless Networks [Електронний ресурс] / MikroTik // – Режим доступу: https://wiki.mikrotik.com/wiki/Testwiki/MikroTik_Wireless_Networks (дата звернення: 12.11.2020)

59. WLAN Radio Frequency Design Considerations [Електронний ресурс] / Cisco // – Режим доступу: <https://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob30dg/RFDDesign.html> (дата звернення: 12.11.2020)

60. Range Extension in IEEE 802.11ah Systems Through Relaying [Електронний ресурс] Enis Kocan, Vojan Domazetovic, Milica Pejanovic-Djurisi / Wireless Pers Commun // – Режим доступу: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.06731.pdf> (дата звернення: 12.11.2020)

61. Обладнання радіодоступу (радіоінтерфейс передачі даних з використанням шумоподібних сигналів за стандартами IEEE Std IEEE 802.11a/b/g (IEEE Std IEEE 802.11-2007)). Додаток 3 до рішення НКРЗ від 23.10.2008 р. № 1174 [Електронний ресурс] В.Ф. Ждан / НКРЗІ // – Режим доступу: <https://nkrzi.gov.ua/images/upload/71/3206/r1174dod3.pdf> (дата звернення: 12.11.2020)

62. Enterprise Mobility 4.1 Design Guide: WLAN Radio Frequency Design Considerations [Електронний ресурс] / Cisco // – Режим доступу: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob41dg/emob41dg-wrapper/ch3_WLAN.pdf (дата звернення: 12.11.2020)

63. IEEE 802.11 Wireless LAN Fundamentals [Електронний ресурс] Pejman Roshan, Jonathan Leary / Cisco Press // – Режим доступу: https://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_50/ourdev_710864EATWTE.pdf (дата звернення: 12.11.2020)

64. WiLink 8 WLAN Features [Електронний ресурс] / Texas Instruments Incorporated // – Режим доступу: https://www.ti.com/lit/ug/swru423a/swru423a.pdf?ts=1612519767389&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252F (дата звернення: 12.11.2020)

65. WLAN Guide: PSA Series Spectrum Analyzers [Електронний ресурс] / Agilent Technologies // – Режим доступу: <https://hibp.ecse.rpi.edu/~connor/RF/Tomography/Agilent%20Spectrum%20Analyzer%20/files/e4440280.pdf> (дата звернення: 12.11.2020)

66. WLAN Tests: According to Standard IEEE 802.11a/b/g [Електронний ресурс] / Rohde & Schwarz GmbH & Co. K // Режим доступу: <https://cdn.rohde->

schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma69/1MA69_2e.pdf (дата звернення: 12.11.2020)

67. Savchenko V. Ensuring Information Availability in a Mobile MESH Network with Connectivity Restrictions / Vitalii Savchenko, Serhii Kostiuhenko, Andriy Lemeshko, Volodymyr Cherneha, Serhii Prokopov, Oleksandr Pliushch // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. V.8. - №7, 2020 P. 3979 - 3985.

68. Карапа І.В. Проблеми переходу на інтернет-протокол IPv6 / І.В. Карапа, А.В. Лемешко // Науково-практична конференція «Проблеми комп'ютерної інженерії». – К.: ДУТ, 2 грудня, 2020. - С. 113 -115.

69. IEEE 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide [Електронний ресурс] / O'Reilly // Режим доступу: <https://www.oreilly.com/library/view/80211-wireless-networks/0596100523/ch04.html> (дата звернення: 12.11.2020)

70. Effectiveness of RTS/CTS in IEEE 802.11 wireless adhoc network in light of order dependent capture [Електронний ресурс] Kulsum I. Patel, Mayur M. Vegad / IEEE // Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6726536> (дата звернення: 12.11.2020)

71. Лемешко А. В. Збільшення кількості паралельних передач в IEEE 802.11ax WLAN / А.В. Лемешко // Науково-практична конференція «Проблеми комп'ютерної інженерії». – К.: ДУТ, 2 грудня, 2020. - С. 129-130.

72. Novel MIMO-UWB based RTS/CTS Collaboration with Scalable Rate Prediction for Industrial WSNs [Електронний ресурс] Williams-Paul Nwadiugwu, Dong-Seong Kim / 2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS) // Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8758032> (дата звернення: 12.11.2020)

73. High Density Wi-Fi Deployments [Електронний ресурс] Cisco Meraki // Режим доступу: https://documentation.meraki.com/Architectures_and_Best_Practices/Cisco_Meraki_Best_Practice_Design/Best_Practice_Design_-_MR_Wireless/High_Density_Wi-Fi_Deployments (дата звернення: 12.11.2020)

74. Recommended number of clients per access point [Електронний ресурс] Cisco Meraki // Режим доступу: <https://community.spiceworks.com/topic/1187561-recommended-number-of-clients-per-access-point> (дата звернення: 12.11.2020)

75. Лемешко А.В. Інноваційний підхід до традиційних методів проектування безпроводових комп'ютерних мереж / А.В. Лемешко, А.О. Макаренко, Н.В. Руденко, А.В. Березнюк // Наукові записки УНДІЗ. – 2020. – №2 (58). – С.5-11. (Google scholar, Crossref)

76. Sure P. A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising strategies / P. Sure, C. M. Bhuma / Eng. Sci. Technol. Int. J. V.20. - №2, 2017 - P. 629-636

77. White paper: IEEE 802.11ac In-Depth [Електронний ресурс] Aruba Networks // Режим доступу: – https://www.arubanetworks.com/assets/wp/WP_80211acInDepth.pdf (дата звернення: 12.11.2020)

78. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: Монографія. – К.: ПП «Золоті ворота», 2011. – 300 с.

79. Sur S. Practical MU-MIMO user selection on IEEE 802.11ac commodity networks / S. Sur, I. Pefkianakis, X. Zhang, K. Kim, H. Kim // Proc. ACM MobiCom. – 2016. – P. 122-134

80. Толубко В.Б. Побудова ультращільних мобільних мереж п'ятого покоління 5G на базі багатовимірних сигналів / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков, Є. П. Гороховський // Зв'язок. - 2017. - № 1. - С. 3-7.