

Лекція 4 з дисципліни:

„Мережі та системи цифрового радіозв'язку і радіодоступу нового покоління”.

Тема: «WiMAX»

Сучасний світ не може без інформації. Інформаційні магістралі сьогодні не поступаються по важливості транспортним, вони всюди – і на суші, і на дні океану, і в космосі. На сьогоднішній момент визначено три основних вимоги до мережевих з'єднань: висока пропускна здатність, надійність, мобільність.

З'єднати всі три основних критерії може тільки покоління бездротових технологій WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), стандарт IEEE 802.16.

WiMAX – це система далекої дії, що покриває кілометри простору, яка зазвичай використовує ліцензовані спектри частот (хоча можливо і використання не ліцензованих частот) для надання з'єднання із інтернетом типу точка-точка провайдером кінцевому користувачеві. Різні стандарти сімейства 802.16 забезпечують різні види доступу, від мобільного (схожий з передачею даних із мобільних телефонів) до фіксованого (альтернатива провідникового доступу, при якому бездротове обладнання користувача прив'язане до розташування).

У загальному вигляді WiMAX мережі складаються з наступних основних частин – базових і абонентських станцій, а також обладнання, що зв'язує базові станції між собою, з постачальником Інтернету.

Для з'єднання базової станції з абонентською використовується високочастотний діапазон радіохвиль від 1,5 до 11 ГГц. В ідеальних умовах швидкість обміну даними може досягати 70 Мбіт / с, при цьому не вимагається забезпечення прямої видимості між базовою станцією і приймачем.

WiMAX застосовується як для вирішення проблеми надання доступу в Інтернет офісним та районним мережам.

Між базовими станціями встановлюються з'єднання (прямої видимості), що використовують діапазон частот від 10 до 66 ГГц, швидкість обміну даними може досягати 120 Мбіт/с. При цьому, принаймні одна базова станція підключається до мережі провайдера з використанням класичних дротових з'єднань. Однак, чим більше число БС підключено до мереж провайдера, тим вища швидкість передачі даних і надійність мережі в цілому.

Структура мереж сімейства стандартів IEEE 802.16 схожа із традиційними GSM мережами (базові станції діють на відстанях до десятків кілометрів, для

їх встановлення не обов'язково будувати вежі – допускається установка на дахах будинків при дотриманні умови прямої видимості між станціями).

1. Історія розвитку WiMAX

Перша версія стандарту IEEE 802.16–2001 була прийнята в грудні 2001 року, у стандарті споконвічно була відведена робоча смуга 10–66 ГГц. Стандарт IEEE 802.16 описував архітектуру широкосмугового бездротового зв'язку, організованої по топології «точка – багато точок» й орієнтувався на створення стаціонарних бездротових мереж масштабу міста (WirelessMAN). Тому що, в стандарті IEEE 802.16–2001 на фізичному рівні передбачалося використання всього однієї частоти, названий він був – WirelessMAN-SC (Single Carrier). Для частот у діапазоні 10–66 ГГц характерно швидке загасання сигналу й робота можлива тільки в зоні прямої видимості між передавачем і приймачем. Проте вирішується одна з головних проблем радіозв'язку – багатопроменеве поширення сигналу. У Стандарті було рекомендовано використати модуляцію типу QPSK, 16-QAM або 64-QAM. У радіоканалах шириною 20, 25 й 28 МГц швидкість передачі даних досягала 32–134 Мбіт, і дальність передачі становила 2.5 км. Пізніше, в 2002 році в стандарті 802.16–2001 минулого виявлені погрішності, і з'явився додаток 802.16z-2002, що розширювало профілі й коректувало їх. Через труднощі побудови бездротової мережі в зоні прямої видимості пристрою стандарту 802.16 так і не одержали широкого поширення й уже в січні 2003 року випустили розширення 802.16a-2003, що описувало використання частотного діапазону від 2 до 11 ГГц. У цьому стандарті передбачалося створення фіксованих бездротових мереж масштабу мегаполіса й планувалося, що надалі він стане альтернативою наземним рішенням широкополосного доступу для організації «останньої милі» замість xDSL, кабельних модемів і каналів T1/E1. Крім того, передбачалося, що для формування глобальної мережі бездротового доступу в Інтернет до базової мережі стандарту 802.16a зможуть підключатися точки доступу стандарту 802.11a/b/g.

Основна відмінність стандарту 802.16a – це робота в частотному діапазоні 2–11 ГГц, для якого не потрібна наявність прямої видимості між приймачем і передавачем. У виді цього зона покриття бездротових мереж 802–16a значно ширше, ніж у мереж стандарту 802.16. Використання частотного діапазону 2–11 ГГц зажадало й істотного перегляду техніки кодування й модуляції сигналу на фізичному рівні. Устаткування 802.16a повинне було працювати з модуляцією QPSK, 16QAM, 64QAM й 256QAM, підтримувати швидкість передачі інформації 1–75 Мбіт/з на сектор однієї базової станції на відстані від 6 до 9 км у радіоканалах зі змінюваною смугою пропускання від 1.5 до 20 МГц. Типова базова станції мала від 4 до 6 секторів.

У стандарті 802.16a зберегли режим роботи на одній несучої, котрий дозволяв працювати як в умовах прямої видимості (LOS), так і поза її (NLOS). Але основним тут стала можливість роботи із сигналом на основі технології OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) –

ортогонального частотного мультиплексування з 256-ю що піднесуть і режим OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) – технологія багато станційного доступу з ортогональним частотним поділом каналів з 2048 у режимі, що дозволяють підключення відразу з декількома абонентами OFDM. Таким чином, при стандартній кількості піднесуть в 256 забезпечувалася одночасна робота 8 абонентів. У липні 2004 року був прийнятий стандарт IEEE 802.16–2004, відомий також як 802.16d або фіксований WiMAX, що й об'єднав всі ці нововведення. Але говорити в той час про повну сумісність устаткування не представлялося можливим. Через наявність різних режимів мультиплексування SC, OFDM й OFDMA з різною шириною радіоканалів, а також тимчасового й частотного режиму дуплексування FDD й TDD і ряду інших вимог устаткування кожного виробника так і залишилося унікальним, а вартість абонентських пристроїв була дуже високою. У зв'язку з цим устаткування фіксованого доступу стандарту IEEE 802.16–2004 використовується в мінімальному застосуванні, там, де традиційні методи побудови мереж абонентського доступу не ефективні або попросту неможливі.

Наприкінці 2005 року був прийнятий стандарт IEEE 802.16e, відомий так само як IEEE 802.16–2005 або мобільний WiMAX. Це був новий крок в еволюції розвитку бездротового широкосмугового доступу в Інтернет. Основна увага тут приділена питанням підтримки мобільних абонентів, і зокрема хендверу, і роумінгу між мережами, побудованими на різних бездротових стандартах. Роумінг дозволяє при пересуванні абонента на швидкості до 120 км/ч «бесшовно» перемикатися між базовими станціями (точно так само як це відбувається в мережах стільникового зв'язку). У мобільному WiMAX застосовується Scalable OFDMA – масштабований OFDM-доступ і можлива робота як в умовах прямої видимості так у її відсутність. Для мереж Mobile WiMAX виділяються частотні діапазони: 2,3–2,5; 2,5–2,7; 3,4–3,8 ГГц.

На сьогоднішній день у світі реалізовані й успішно функціонують бездротові широкосмугові мережі на основі Mobile WiMAX. Конкурентами 802.16e є всі мобільні технології третього покоління 3G, наприклад, EV-DO. І якщо стандарт IEEE 802.16d є протоколом операторського класу, то мобільний WiMAX орієнтований на кінцевих користувачів, і в цьому випадку він являє собою альтернативу стандартам 802.11 a/b/g. Маючи ноутбук або КПК із вбудованим WiMAX модемом, користувач зможе підключившись до мережі, постійно залишатися на зв'язку в будь-якій точці міста, де забезпечується зона покриття WiMAX мережі. Базова станція Mobile WiMAX здатна підтримувати до 1000 абонентів одночасно!

На додаток до основних стандартів, робоча група IEEE 802.16 розробила ряд інших документів, де розглядаються інші досить важливі питання. Це такі доповнення, як:

– 802.16f-2005 – Інформаційна база керування (Management Information Base);

- 802.16g-2007 – Процедури й сервіси рівня керування (Management Plane Procedures and Services);
- 802.16k-2007 – Виправлення до 802.16 (Bridging of 802.16).

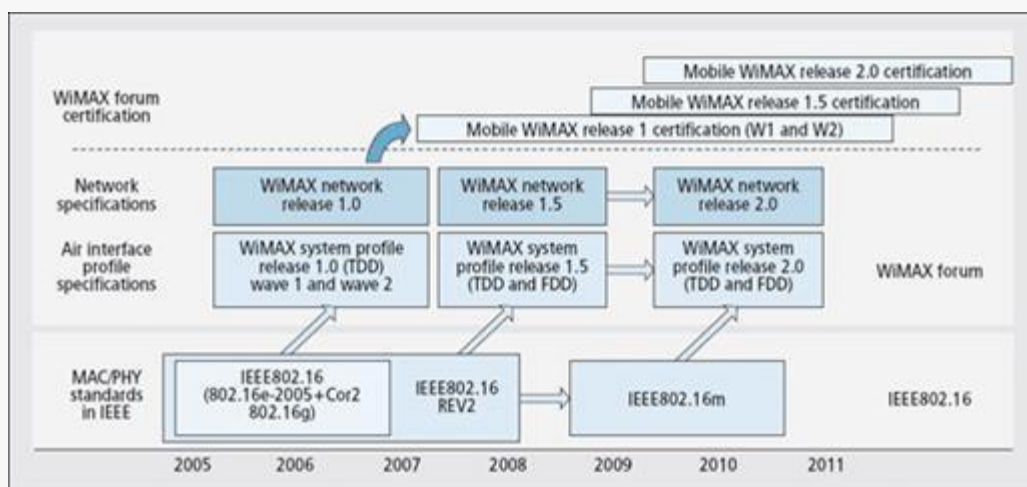


Рисунок 1. Схема розвитку технології WiMAX

У стадії розробки перебувають:

- 802.16h – Поліпшений механізму співіснування при безліцензійній роботі (Improved Coexistence Mechanisms for License-Exempt Operation);
- 802.16i – Інформаційна база керування для мобільних мереж (Mobile Management Information Base);
- 802.16j – Специфікація багатопрогонових ретрансляційних систем (Multihop Relay Specification);
- 802.16m – Поліпшений бездротової інтерфейс (Advanced Air Interface).

Часто, говорячи про стандарт IEEE 802.16, мають на увазі WiMAX. Абревіатура WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) розшифровується як: протокол всесвітньої мережі широкосмугового радіозв'язку. Назва придумана в міжнародній організації WiMAX-форум, у ряди якої входять провідні телекомунікаційні компанії й виробники устаткування, такі як: Alvarion, Cisco, Intel, Airspan Networks, Fujitsu, Samsung, Huawei, Proxim Corporation й ін.). Однак не слід забувати, що насправді WiMAX, розглядає тільки частину режимів стандарту IEEE 802.16.

У червні 2008 року було оголошено про створення нового стратегічного консорціуму – Open Patent Alliance (OPA), у який увійшли такі гіганти широкосмугової індустрії, як: Cisco, Alcatel-Lucent, Intel, Clearwire, Samsung й Sprint. Ціль створення альянсу – просування подальшої стандартизації в області технологій WiMAX, зниження вартості на послуги й устаткування, а також розширення їхнього різноманіття. Набагато пізніше до них приєдналися Alvarion й Huawei. За цей час був створений так званий патентний пул – угода про взаємне використання межу учасниками патентів, який зможе скористатися кожною зі членів альянсу за передбачуваною ціною.

Одним з найбільш активних членів альянсу WiMAX Forum є компанія Intel, що бере участь у всіх його починаннях – від постановки завдання,

закінчуючи ратифікацією стандартів і розробкою кінцевого встаткування. Зараз Intel співробітничає з компаніями, що вже розгорнули попередньо стандартизовані ширококутні бездротові мережі WiMAX більш ніж в 125 країнах. Вони забезпечують широкий діапазон варіантів – від стаціонарних систем бездротового доступу до двох токової систем передачі масштабу підприємства. Зараз Intel співробітничає з компаніями, що вже розгорнули попередньо стандартизовані ширококутні бездротові мережі WiMAX більш ніж в 125 країнах. Вони забезпечують широкий діапазон варіантів – від стаціонарних систем бездротового доступу до двох токової систем передачі масштабу підприємства [4].

2. Принцип роботи WiMAX

2.1 Фізичний рівень базового стандарту IEEE 802.16

Стандарт IEEE 802.16 описує роботу в діапазоні 10–66 ГГц систем з архітектурою «точка – багато точка». Це – двонаправлена система, тобто передбачені спадний і висхідний потоки. При цьому канали ширококутні, а швидкості передачі – високі. Тракт обробки даних і формування вихідного сигналу для передачі через радіоканал у стандарті IEEE 802.16 досить звичайний для сучасних телекомунікаційних протоколів і практично однаковий для висхідних і спадних з'єднань. Вхідний потік даних скремблюється – піддається рандомізації, тобто на нього накладається псевдовипадкова послідовність, вироблювана за допомогою лінійного регістра зрушення довжини 15 з характеристичним багаточленом і початковим заповненням. Далі скрембльовані дані кодують за допомогою завадостійких кодів. При цьому використовується одна із чотирьох схем: код Рида-Соломона, код Рида-Соломона з додатковим надточним кодом (швидкість), код Рида-Соломона з додатковим контролем парності і блоковий турбокод. Розмір кодованого інформаційного блоку й число надлишкових біт не фіксовані – ці параметри можна задавати залежно від умов середовища й вимог до якості надання послуг. Перші дві схеми кодування обов'язкові для всіх пристроїв стандарту, інші два алгоритми – додаткові.



Рисунок 2 – Тракт формування вихідного сигналу в стандарті IEEE 802.16



Рисунок 3 – Схема кодирования надточным кодом

У діапазоні 10–66 ГГц стандарт IEEE 802.16 передбачає схему з модуляцією однієї несучої (у кожному частотному каналі). Стандарт допускає три типи квадратурної амплітудної модуляції: чотирьохпозиційну QPSK й 16-позиційну 16-QAM (обов'язкові для всіх пристроїв), а також 64-QAM. Кодовані блоки перетворюються в модуляційні символи (кожні 2/4/6 біт визначають один символ QPSK/16-QAM/64-QAM) відповідно до наведеного в стандарті таблицями – кожній групі з 2/4/6 біт ставиться у відповідність синфазна і квадратурна координати. Далі послідовність дискретних значень у каналах перетвориться за допомогою так названого синус-квадратного фільтра (square-root raised cosine filter) у безперервні (згладжені) сигнали. Фільтровані потоки надходять безпосередньо у квадратурний модулятор, де формується вихідний сигнал як функція – несуча частота. Далі сигнал підсилюється й передається в ефір. На прийомній стороні все відбувається у зворотному порядку.

Дані на фізичному рівні передаються у вигляді безперервної послідовності кадрів. Кожен кадр має фіксовану тривалість – 0,5; 1 й 2 мс, тому його інформаційна ємність залежить від символної швидкості й методу модуляції. Кадр складається із преамбули (синхропослідовності довжиною 32 QPSK-символу), що управляє секції й послідовності пакетів з даними. Оскільки обумовлена стандартом IEEE 802.16 система двонаправлена, необхідний дуплексний механізм. Він передбачає як частотний (FDD), так і тимчасовий (TDD) поділ висхідного й спадного каналів.

При тимчасовому дуплексуванні каналів кадр ділиться на спадний і висхідний субкадрі (їхнє співвідношення в кадрі може гнучко мінятися в процесі роботи, залежно від потрібної смуги пропускання для спадних і висхідних каналів), розділені спеціальним інтервалом. При частотному дуплексуванні висхідний і спадний канали транслюються кожний на своїй несучій.



Рисунок 4 – Структура кадру в стандарті IEEE 802.16 для систем з тимчасовим (а) і частотним (б) дуплексуванням каналів

У спадному каналі інформація від базової станції передається у вигляді послідовності пакетів (метод тимчасового мультимплексування – TDM) (Рисунок 5). Для кожного пакета можна задавати метод модуляції й схему кодування даних – тобто вибрати між швидкістю й надійністю передачі. TDM-пакети передаються одночасно для всіх абонентських станцій, кожна з них приймає весь інформаційний потік і вибирає «свої» пакети (декодуючи заголовки пакетів і визначаючи адресу призначення). У спадному субкадрі пакети вибудовуються в чергу так, що самі перешкодо-захищені передаються першими (керуюча секція завжди передається за допомогою QPSK-модуляції). Якщо цього не зробити, абонентські станції з поганими умовами прийому, яким призначаються найбільш захищені пакети, можуть втратити синхронізацію чекаючи своєї порції інформації.

Пакети в спадному субкадрі впливають один за одним без інтервалів й їхніх заголовків, що випереджають. Щоб абонентські станції могли відрізнити один пакет від іншого, у керуючій секції передаються карти спадного (DL-MAP) і висхідного (UL-MAP) каналів. У карті спадного каналу зазначена тривалість кадру, номер кадру, число пакетів у спадному субкадрі, а також точка початку й тип профілю кожного пакета. Точка початку відраховує в так званих фізичних слотах, кожен фізичний слот дорівнює чотирьом модуляційним символам.

Профіль пакета – це список його параметрів, включаючи метод модуляції, тип FEC-кодування (з параметрами схем кодування), а також діапазон значення відносини сигнал/шум у прийомному каналі конкретної станції, при якому даний профіль може застосовуватися. Список профілів у вигляді спеціальних керуючих повідомлень (дескрипторів спадного й висхідного каналного, DCD/UCD) транслюється базовою станцією з періодом в 10 мс, кожному профілю привласнюється номер, що і використовується в карті спадного каналу.

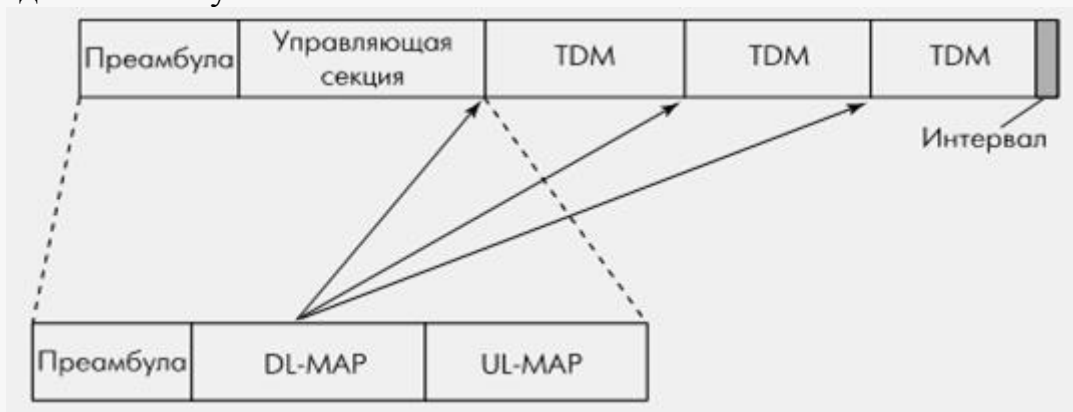


Рисунок 5 – Структура спадного каналу

Абонентські станції одержують доступ до середовища передачі за допомогою механізму тимчасового поділу каналів (TDMA – Time division multiple access) (структура висхідного каналу представлена на мал. 3.6). Для цього у висхідному каналі субкадрі кожної передавальної АС (абонентської

станції) базова станція резервує спеціальні тимчасові інтервали – слоти. Інформація про розподіл слотів між АС записується в карті висхідного каналу UL-MAP, трансльованої в кожному кадрі. UL-MAP функціонально аналогічна DL-MAP – у ній повідомляється скільки слотів у субкадрі, точка початку й ідентифікатор з'єднання для кожного з них, а також типи профілів всіх пакетів. Повідомлення UL-MAP поточного кадру може ставитися як до даного кадру, так і до наступному. Швидкість модуляції (частота символів) у висхідному каналі повинна бути така ж, як і у спадному. Відзначимо, що, на відміну від спадних TDM-пакетів, кожен пакет у висхідному каналі починається із преамбули – синхропослідовності довжиною 16 або 32 QPSK-символу.

У висхідному каналі, крім призначених базовою станцією (БС) слотів для певних АС, передбачені інтервали, протягом яких АС може передати повідомлення для первинної реєстрації в мережі або для запиту каналу/зміни смуги пропущення каналу. Оскільки ці повідомлення спонтанні, у даних інтервалах можливі колізії, викликані одночасною роботою передавачів двох і більше АС. Принцип боротьби з колізіями аналогічний використовуваному в стандарті 802.11 – після того, як АС вирішила, що їй потрібно зареєструватися/запросити канал, вона не починає трансляцію в першому ж призначеному для цього інтервалі. В АС є генератор випадкових чисел (ГВЧ), що вибирає значення. Так, якщо, ГВЧ вибирає числа в діапазоні 0..15, наприклад 11. Далі АС відраховує 11 інтервалів, призначених для реєстрації/запиту каналу й тільки в 12-м виходить в ефір. Якщо передача пройшла успішно й БС прийняла запит, вона в певний період відповість спеціальним повідомленням. У протилежному випадку АС вважає спробу невдалою й повторює процедуру, тільки інтервал для ГВЧ подвоюється.

Така послідовність дій триває доти, поки не буде отримана відповідь від БС. Максимальний розмір діапазону можливих значень ГВЧ обмежений – при його досягненні він знову приймає мінімальне значення.

Примітно, що в режимі FDD стандарт IEEE 802.16 допускає застосування як дуплексних, так і напівдуплексних абонентських станцій. Останній не здатний одночасно приймати й передавати інформацію. Для напівдуплексних АС, які в силу конструктивних особливостей спочатку приймають інформацію лише потім передають свої дані, у спадному FDD кадрі передбачена область із механізмом TDMA – для таких станцій інформація передається в певних тимчасових інтервалах (Рисунок 7). Причому спадні пакети, передані в режимі TDMA, обов'язково постачають преамбулою – синхропослідовністю довжиною 16 QPSK-символів, щоб напівдуплексні абонентські станції могли при необхідності відновити синхронність. Тобто фактично й в FDD-режимі частково використовується принцип доступу до середовища передачі в режимі поділу часу.

Важлива особливість стандарту IEEE 802.16 – система контролю радіотракта, завдяки якій базова станція здатна контролювати синхронність, що несе частоту й потужність кожної АС і при необхідності

змінювати/коректувати ці параметри за допомогою службових повідомлень. Фізичний рівень стандарту IEEE 802.16 займається безпосередньою доставкою потоків даних між БС й абонентськими станціями. Все-таки завдання, пов'язані з формуванням структур цих даних, а також керуванням роботою системи IEEE 802.16, зважаються на канальному рівні.

Спадний канал у випадку FDD при роботі з напівдуплексними абонентськими станціями.

Устаткування стандарту IEEE 802.16 створене щоб формувати транспортне середовище для різних додатків (сервісів), тому перше завдання, розв'язуване в IEEE 802.16, – це механізм підтримки різноманітних сервісів верхнього рівня. Розроблювачі стандарту прагнули створити єдиний для всіх протокол канального рівня, незалежно від особливостей фізичного каналу. Це істотно спрощує зв'язок терміналів кінцевих користувачів з міською мережею передачі даних – фізично середовища передачі в різних фрагментах WMAN можуть бути різні, але структура даних єдина.

Рисунок 7 – Канальний рівень стандарту IEEE 802.16

В одному каналі можуть працювати (не одноразово) сотні різних терміналів ще більшого числа кінцевих користувачів. Цим користувачам необхідні самі різні сервіси (додатки) – потоки голосу й даних з тимчасовим поділом, з'єднання по протоколі IP, пакетна передача мови через IP (VoIP) і т. п. Більше того, якість послуг (QoS) кожного окремого сервісу не повинне змінюватися при роботі через мережі IEEE 802.16.

Структурно канальний рівень IEEE 802.16 підрозділяється на три підрівня – підрівень перетворення сервісу CS, основний підрівень CPS і підрівень захисту PS. На підрівні захисти реалізуються функції, що забезпечують криптографічний захист даних і механізми аутентифікації.

На підрівень перетворення сервісу відбувається трансформація потоків даних протоколів верхніх рівнів для передачі через мережі IEEE 802.16. Для кожного типу додатків верхніх рівнів стандарт передбачає свій механізм перетворення, але поки описані й увійшли в специфікацію IEEE 802.16 тільки два – для роботи в режимі АТМ і для пакетної передачі. Під пакетною передачею мають на увазі досить широкий набір протоколів, включаючи IP. Ціль роботи на CS-підрівні – оптимізація переданих потоків даних кожного додатка верхнього рівня.

Для оптимізації трансльованих потоків передбачений спеціальний механізм видалення повторюваних фрагментів заголовків PHS. Кожна порція даних складається, у загальному випадку, із заголовка й поля даних – фіксованих розмірів для АТМ (5 й 48 байт, відповідно) і досить довільних при пакетній передачі. У багатьох випадках заголовки пакетів й осередків містять повторювану інформацію, зайву при трансляції за допомогою протоколу IEEE 802.16. Механізм PHS дозволяє позбутися від передачі надлишкової інформації: на передавальному кінці пакети додатків відповідно до певних правил перетворюються в структури даних канального рівня IEEE 802.16, на прийомному – відновлюються.

На основному підрівні каналного рівня формуються пакети даних (MAC PDU), які потім передаються на фізичний рівень і транслюються через канал зв'язку. Пакет MAC PDU (далі PDU) включає заголовок і поле даних (його може й не бути), за яким може впливати контрольна сума CRC (Рисунок 8). Заголовок PDU займає 6 байт і може бути двох типів – загальний і заголовок запиту смуги пропущення. Загальний заголовок використовується в пакетах, у яких є присутнім поле даних. У загальному заголовку вказується ідентифікатор з'єднання CI, тип і контрольна сума заголовка, а також приводиться інформація про поле даних. Заголовок запиту смуги коли АС просить у БС виділити або збільшити їй смугу пропущення в спадному каналі. При цьому в заголовку вказується CI і розмір необхідної смуги. Поля даних після заголовків зі смуги бути не може.

Таблиця 1. Структура заголовка MAC PDU (від старшого до меншого бітам)

Поле	Довжина (біт)
Тип заголовка = 0 (признак загального заголовка)	1
Признак шифрування поля даних	1
Тип поля даних	6
Не використовується	1
Признак наявності CRC	1
Індекс ключа шифрування	2
Не використовується	1
Довжина пакета, включно заголовок (в байтах)	11
Ідентифікатор з'єднання CID	16
Контрольна сума заголовка $g(D)=D_8+D_2+D+1$	8

Поле даних може містити підзаголовки каналного рівня, що управляють повідомлення й властиво дані додатків верхніх рівнів, перетворені на CS-підрівені. У стандарті описано три типи підзаголовків каналного рівня – упакування, фрагментації й керування наданням каналу.

Підзаголовок упакування – використовується, якщо в поле даних одного PDU утримуються кілька пакетів верхніх рівнів; підзаголовок фрагментування – якщо, навпроти, один пакет верхнього рівня розбитий на трохи PDU. Підзаголовок керування наданням каналу призначений, щоб АС повідомляла БС зміну своїх потреб у смугі пропускання (число байт у висхідному каналі для визначення з'єднання, повідомлення про переповнення вихідної черги в АС, вимога регулярного опитування з боку БС для з'ясування потрібної смуги).

Керуючі повідомлення – це основний механізм керування системою IEEE 802.16. Усього зарезервовано 256 типів керуючих повідомлень, з них 30 описано в стандарті IEEE 802.16. Опис профілів пакетів, керування доступом, механізми криптографічного захисту, динамічна зміна роботи системи й т.д. – всі функції керування, запиту й підтвердження реалізуються через керуючі

повідомлення. Розглянуті вище карти вхідного/спадних каналів (UL-/DL-MAP) також є керуючими повідомленнями. Формат керуючих повідомлень просте -і поле типу повідомлення (1 байт) і поле даних (параметрів).

2.2 Керування з'єднаннями в IEEE 802.16

Ключовий момент у стандарті IEEE 802.16 – це поняття «сервісного потоку» і пов'язані з ним поняття «з'єднання» й «ідентифікатор з'єднання» (CI). Оскільки система IEEE 802.16 – лише транспортне середовище, її інфраструктура фактично формує комунікаційні канали для потоків даних різних додатків верхніх рівнів (сервісів) – передача відео даних, АТМ-потоки, IP-потоки, передача телефонних мультимплексування пакетів типу Е1 і т.д. Кожне з таких додатків мають свої вимоги до швидкості передачі, надійності (якості обслуговування), крипто захисту й т.д. Відповідно, і дані кожного додатка варто передавати через транспортне середовище з урахуванням цієї специфіки. Сервісним потоком у стандарті IEEE 802.16 називається потік даних, пов'язаний з певним додатком.

У цьому контексті з'єднання – це встановлення логічного зв'язку на каналних рівнях на передавальній і прийомній стороні для передачі сервісного потоку. Кожному з'єднанню привласнюється 16-ти розрядний ідентифікатор CI, з яким однозначно зв'язані тип і характеристики з'єднання. Зокрема, по запиті надання/зміни смуги пропускання з боку АС базова станція стазу розуміє, з яким сервісним потоком має справу і які умови передачі йому потрібно забезпечити. Так при початковій ініціалізації в мережі кожної АС призначається три CI для службових повідомлень трьох рівнів. Принципово, що один АС може встановлювати безліч різних з'єднань із різними CI. Характерний приклад – коли зв'язок великого офісу з телекомунікаційним вузлом організована через систему IEEE 802.16. У цьому випадку один АС в офісі може підтримувати зовсім різні додатки – телефонію, телебачення, доступ в Інтернет й у розподілену корпоративну мережу й т.д. Кожне із цих додатків висуває свої вимоги до Q_0 і швидкості передачі, які потрібно задовольнити. За допомогою CI базова станція довідається, із чим має справу, і надає необхідний ресурс.

Не менш важливим для розуміння ідеології IEEE 802.16 є принцип надання доступу до каналу по запиті (DAMA). Жодна АС не може нічого передавати, крім запитів на реєстрацію й надання каналу, поки БС не дозволить їй цього – тобто відведе часовий інтервал у висхідному каналі й укаже його розташування в карті UL-MAP. Абонентська станція може запитувати як певний розмір смуги в каналі, так і просити про зміну вже наданого їй каналного ресурсу.

Стандарт IEEE 802.16 передбачає два режими надання доступу – для кожного окремого з'єднання (GPC) і для всіх з'єднань певної АС (GPSS). Режим GPSS обов'язковий для всіх пристроїв у діапазоні 10–66 ГГц. Очевидно, що перший механізм забезпечує більшу гнучкість, однак другий істотно скорочує обсяг службових повідомлень і вимагає меншої продуктивності від апаратури.

Запити можуть бути як не планові так і планованими, для БС. У першому випадку запити реалізуються за допомогою пакетів, що складаються із заголовка запиту, переданих на конкурентній основі в спеціально виділеному для них інтервалі висхідного каналу. Процедура планових запитів смуги у висхідному каналі називається опитуванням – БС як би опитує АС про їхні потреби. Реально це означає, що базова станція надає конкретної АС інтервал для передачі запиту про надання смуги, тобто ніякої конкуренції вже немає.

Опитування може бути в «реальному часі» – інтервали для запиту надаються АС із тим же періодом, з яким у неї може виникнути потреба в зміні умов доступу (наприклад, у кожному кадрі). Цей режим зручний для додатків, коли пакети даних впливають із фіксованим періодом, але їхній розмір не стабільний (наприклад, відео-MPEG). Інший варіант опитування – поза «реальним часом». У цьому випадку БС надає АС інтервал для запиту також періодично, але цей період істотно більше – наприклад, 1 с. Характерний додаток, для якого ефективний цей механізм, – FTP-протокол.

Для додатків, у яких періодичність і розмір пакетів фіксовані (наприклад, у телефонії шина Е1), передбачений механізм доступу до каналу без вимоги (UGS). У цьому випадку БС із заданим періодом надає АС для передачі даних інтервали фіксованого розміру, що відповідають швидкості потоку даних. Якщо в ході роботи АС потрібно змінити умови доступу, вона робить це за допомогою спеціального MAC-підзаголовка керування наданням каналу. У цьому підзаголовку є спеціальний прапор «опитай мене», установивши який, АС просить у БС інтервал для запиту нової смуги. Істотно, що в згаданому підзаголовку є спеціальний біт індикації переповнення вихідного буфера передавача АС, що приводить до втрати даних. БС може відреагувати на появу цього сигналу, наприклад, збільшивши смугу для даної АС.

2.3 Стандарт IEEE 802.16–2004

Стандарти групи IEEE 802.16 включали три основних документи – властиво стандарт IEEE 802.16–2001, що описує загальні принципи мережі і зосереджуються на діапазоні 10–66 ГГц, і два доповнення – IEEE 802.16с-2002 (особливості роботи в діапазоні 10–66 ГГц) і IEEE 802.16а-2003 – мережі в діапазоні 2–11 ГГц. Всі три документи – IEEE 802.16–2001, IEEE 802.16а й IEEE 802.16с – фактично являли собою набір виправлень і доповнень до базового стандарту IEEE 802.16. Зрозуміло, працювати із трьома документами замість одного незручно. Крім того, відразу ж після публікації стандартів стали з'являтися численні виправлення й доповнення.

Врахування виправлення й доповнення взяла на себе робоча група IEEE 802.16d. Безпосередньо по роботі зі створення єдиного документа, з урахуванням всіх виправлень вона приступила з 11 вересня 2003 року. 24 червня 2004 року був офіційно затверджений новий стандарт – IEEE 802.16–2004, що заміняє собою документи IEEE 802.16–2001, IEEE 802.16с-2002 й IEEE 802.16а-2003. Дата його публікації – 1 жовтня 2004 року.

Новий документ – це компіляція вже існуючих стандартів, однак з досить серйозними змінами й уточненнями в окремих главах. Головним чином вони

торкнулися глав, що входили раніше в IEEE 802.16a. Стандарт описує принципи побудови мереж регіонального масштабу в діапазонах до 66 ГГц – точніше, їх фізичний і каналний рівні. Для цього передбачено п'ять режимів (таблиця 2). З них тільки WirelessMAN-SC призначений для роботи в діапазоні 10–66 ГГц. Він орієнтований на магістральні мережі («точка-точка», «точка-багатоточка»), що працюють у режимі прямої видимості, з типовими швидкостями потоку даних 120 Мбіт/с і шириною каналу порядку 25 МГц. Це фактично описаний у документі IEEE 802.16–2001 радіо інтерфейс широкополосного доступу з модуляцією однієї несучої на канал (SC), що розглядався вище.

Таблиця 2. Основні режими в стандарті IEEE 802.16–2004

Режим	Частотний діапазон, ГГц	Опції	Метод дуплексування
WirelessMAN-SC	10–66	TDD/FDD	
WirelessMAN-SCa	<11	AAS/ARQ/STC	TDD/FDD
WirelessMAN-OFDM	<11	AAS/ARQ/STC/Mesh	TDD/FDD
WirelessMAN-OFDMA	<11	AAS/ARQ/STC	TDD/FDD
WirelessHUMAN	<11	DFS/AAS/ARQ/Mesh/STC	TDD

Інші режими розроблені для діапазонів менш 11 ГГц. Один з них – WirelessMAN-SCa – це «низькочастотна» варіація WirelessMAN-SC (з рядом додаткових механізмів, зокрема допускається 256-позиційна квадратурна модуляція 256-QAM). Інший, WirelessHUMAN, призначений для роботи в без ліцензійних діапазонах (США і Європа). Зате два останніх режими – WirelessMAN-OFDM і WirelessMAN-OFDMA – це принципово нові стосовно IEEE 802.16–2001 методи.

Принципово, що істотна увага в стандарті IEEE 802.16–2004 приділено якості обслуговування (Q_0), а також механізмам захисту даних і з'єднань. З огляду на, що IEEE 802.16 принципово орієнтований на роботу в ліцензованих діапазонах, а також його фактичне загальносвітове визнання (у Європі він прийнятий ETSI під ім'ям HiperMAN) і підтримку ведучих виробників устаткування (що об'єдналися в WiMAX Forum), можна з великою впевненістю припустити, що в найближчі роки нас очікує нова хвиля «бездротової революції».

Стандарт IEEE 802.16 регламентує роботу на фізичному й каналному рівнях. Для підтримки протоколів верхнього рівня (ATM, IP і т.д.) передбачений підрівень «перетворення сервісу», основне завдання процедур якого – розпізнати й класифікувати тип даних для ефективної їхньої передачі через мережі IEEE 802.16. Для оптимізації трансльованих потоків передбачений спеціальний механізм видалення повторюваних фрагментів заголовків PHS пакетів або ATM-осередків верхніх рівнів. Механізм PHS дозволяє позбутися від передачі надлишкової інформації: на передавальному

кінці пакети додатків відповідно до певних правил перетворюються в структури даних канального рівня IEEE 802.16, на прийомному – відновлюються.

Весь потік даних у мережах IEEE 802.16 – це потік пакетів. На основному підрівні канального рівня формуються пакети даних (MAC PDU), які потім передаються на фізичний рівень, інкапсулюються у фізичні пакети й транслюються через канал зв'язку. Пакет PDU включає заголовок і поле даних (його може й не бути), за яким може впливати контрольна сума CRC. Заголовок PDU займає 6 байт і може бути двох типів – загальний і заголовок запиту смуги пропущення. Загальний заголовок використовується в пакетах, у яких є присутнім поле даних. У цьому заголовку вказується ідентифікатор з'єднання (CI), тип і контрольна сума заголовка, а також приводиться інформація про наявність у полі даних підзаголовків і повідомлень ARQ.

Заголовок запиту смуги (також 6 байт) застосовується, коли АС просить у БС виділити або збільшити їй смугу пропущення в спадному каналі. При цьому в заголовку вказується CI і розмір необхідної смуги (у байтах, без обліку заголовків фізичних пакетів). Поля даних після заголовків зі смуги немає.

Поле даних може містити: підзаголовки MAC, що управляють повідомлення й властиво дані додатків верхніх рівнів, перетворені на CS-підрівень. MAC-підзаголовки можуть бути п'яти типів – упакування, фрагментації, керування наданням каналу, а також підзаголовки каналу швидкого зворотного зв'язку.

Керуючі повідомлення – це основний механізм керування системою IEEE 802.16. Усього зарезервовано 256 типів керуючих повідомлень, з них використовуються тільки 48. Формат керуючих повідомлень просте – поле типу повідомлення (1 байт) і поле даних (параметрів) довільної довжини.

Доступ до каналу надається винятково базовою станцією по попередньому запиту. Початкова ініціалізація АС і запит каналу відбуваються на основі механізму конкурентного доступу в спеціально відведені для цього тимчасових інтервалах. БС призначає АС час і тривалість доступу до каналів залежно від типів даних і пріоритетів. Канальний ресурс конкретної АС може змінюватися за допомогою опитування з боку БС або спеціальних керуючих повідомлень із боку АС при черговій передачі даних.

2.4 Режим Wireless MAN-OFDM

На фізичному рівні стандарт IEEE 802.16 передбачає три принципово різних методи передачі даних: метод модуляції однієї несучої (SC, а в діапазоні нижче 11 ГГц – SCa), метод модуляції за допомогою ортогональних несучих OFDM і метод множинного доступу за допомогою ортогональних несучих OFDMA.

Режим OFDM – це метод модуляції потоку даних в одному частотному каналі (шириною 1–2 МГц і більше) із центральною частотою. Розподіл же на канали, як й у випадку SC – частотне. При модуляції даних за допомогою ортогональних несучих у частотному каналі виділяються N поднесучих так,

що $f_k = f_c + k\Delta f$, де k – ціле число із діапазону $[-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}]$ (в даному

випадку $k \neq 0$). Відстань між ортогональними несущими $\Delta f = \frac{1}{T_b}$, де T_b – довжина передачі в символі.

Дані OFDM-символу включає захисний інтервал довжиною T_ε , так що загальна довжина OFDM-символу $T_s = T_b + T_\varepsilon$.

Інтервал являє собою копію закінченого фрагменту символу. Його тривалість T_ε може складати 1/4, 1/8, 1/16 і 1/32 T_b .

Кожний символ модулюється незалежно, за допомогою квадратурної амплітудної модуляції. Загальний сигнал обчислюється методом швидкого перетворення Фур'є (ОБПФ):

$$s(t) = \operatorname{Re} \left\{ e^{i2\pi f_c t} \sum_{k=-N/2}^{N/2} c_k e^{i2\pi k \Delta f (t-T_g)} \right\} \quad (0 < t < T_s),$$

де c_k – комплексне подання символу квадратурної модуляції (QAM-символу). Комплексне подання зручне, оскільки генерація радіосигналу відбувається за допомогою квадратурного модулятора відповідно до вираження:

$$s_k(t) = I_k \cos(2\pi f_c t) - Q_k \sin(2\pi f_c t),$$

де I_k і Q_k – синфазне й квадратурне (цілого і допустиме) значення комплексного символу.

Для роботи алгоритмів БПФ/ОБПФ бажано, щоб кількість точок відповідала 2^m . Тому число несучих вибирають рівним мінімальному числу $N_{FFT} = 2^m$, переважаючому N . У режимі OFDM стандарту IEEE 802.16 $N = 200$, відповідно $N_{FFT} = 256$. Із них 55 ($k = -128 \dots -101, 101, \dots, 128$) утворять захисний інтервал на границях частотного діапазону каналу. Центральна частота каналу ($k = 0$) і частоти захисних інтервалів не використовуються (тобто амплітуди відповідних їм сигналів дорівнюють нулю).

З інших 200 несучих вісім частот – пілотні (з індексами $\pm 88, \pm 63, \pm 38, \pm 13$), інші розбиті на 16 підканалів по 12 несучим у кожному, причому в одному підканалі частоти розташовані не підряд. Наприклад, підканал 1 становить несучі з індексами -100, -99, -98, -37, -36, 1, 2, 3, 64, 65, 66. Розподіл на підканали необхідно, оскільки в режимі WirelessMAN-OFDM передбачена (опціонально) можливість роботи не у всіх 16, а в одному, двох, чотирьох і восьми підканалах – і схеми множинного доступу OFDMA. Для цього кожен підканал і кожна група підканалів мають свій індекс (від 0 до 31).

Тривалість корисної частини T_b OFDM-символу залежить від ширини смуги каналу BW і системної тактової частоти (частоти

дискретизації) F_s ; $F_s = N_{FFT}/T_b$. Співвідношення $F_s/BW = n$ нормується залежно від ширини смуги каналу і приймає значення 86/75 (BW кратно 1,5 МГц), 144/125 (BW кратно 1,25 МГц), 316/275 (BW кратно 2,75 МГц), 57/50 (BW кратно 2 МГц) і 8/7 (BW кратно 1,75 МГц і у всіх інших випадках).

Захисний інтервал при OFDM-модуляції – потужний засіб боротьби з межсимвольними перешкодами (межсимвольної інтерференції, MCI), що виникають внаслідок неминучих у міських умовах перевідбиттів і багатопробеневого поширення сигналу. MCI приводить до того, що в приймачі на прямо, що поширюється сигнал, накладається перевідбитий сигнал, що містить попередній символ. При модуляції OFDM перевідбитий сигнал попадає в захисний інтервал і шкоди не заподіює. Однак цей механізм не запобігає внутрісимвольній інтерференції – накладення сигналів з тим самим символом, що прийшли з фазовою затримкою. У результаті інформація може повністю спотворитися або (наприклад, при фазовому зрушенні 180°) просто зникнути. Для запобігання втрати інформації при проваллі окремих символів або їхніх фрагментів стандарт IEEE 802.16–2004 передбачає ефективні засоби каналного кодування.

Кодування даних на фізичному рівні включає три стадії – рандомізацію, перешкодозахисне кодування й перемежування. Рандомізація відбувається майже так само, як у попередньому стандарті, тобто на блоки даних накладається псевдовипадкова послідовність, вироблювана регістром зрушення з характеристичним багаточленом $1 + x^{14} + x^{15}$.

У спадному потоці генератор ПСП ініціалізується початковим заповненням $4 \cdot 480_{16}$. Починаючи із другого пакета кадру генератор ПСП ініціалізується на основі ідентифікаційного номера базової станції BSI, ідентифікатора профілю пакета DIUC і номера кадру. У висхідному потоці все відбувається аналогічно, з тією лише різницею, що ініціалізація генератора ПСП за схемою на рисунку 10.

Кодування даних спочатку відбувається за допомогою коду Ріда-Соломона над $GF(256)$, а потім дані кодуються надточним кодом. У базовому виді код Ріда-Соломона оперує блоками вихідних даних по 239 байт, формуючи з них кодований блок розміром 255 байт (додаючи 16 перевірочних байт). Такий код здатний відновити до 8 ушкоджених байт. Оскільки реально використовуються блоки даних меншої довжини K , перед ними добавляються $(239 - K)$ нульових байт. Після кодування ці байти віддаляються. Якщо необхідно скоротити число перевірочних символів, так щоб зменшити число відновлюваних байт T , використовуються тільки перші перевірочних байтів. Обов'язкові для підтримки в IEEE 802.16–2004 варіанти кодування наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Основні режими в стандарті IEEE 802.16–2004

Модуляція	Блок даних до кодування, байт	Код Ріда-Соломона	Швидкість шверточного кодування	Сумарна швидкість кодування	Блок даних після кодування, байт

BPSK	12	(12,12,0)	1/2	1/2	24
QPSK	24	(32,24,4)	2/3	1/2	48
QPSK	36	(40,36,2)	5/6	3/4	48
16-QAM	48	(64,48,8)	2/3	1/2	96
16-QAM	72	(80,72,4)	5/6	3/4	96
64-QAM	96	(108,96,6)	3/4	2/3	144
64-QAM	108	(120,108,6)	5/6	3/4	144

Після кодера Ріда-Соломона дані надходять у надточний кодер з послідовностями, що породжують (генераторами коду) $G_1 = 178_8$ (для виходу X) і $G_2 = 133_8$ (для Y) – так званий стандартний код NASA. Його базова швидкість кодування – 1/2, тобто з кожного вхідного біта він формує пару кодованих біт X й Y. Упускаючи з послідовності пар елементи X_i або Y_i , можна одержувати різні швидкості кодування. Так, швидкості 2/3 відповідає послідовність $(X_1Y_1Y_2)$, швидкості 3/4 – $(X_1Y_1Y_2X_3)$, 5/6 – $(X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5)$.

Кодер Ріда-Соломона не використовується із двопозиційною модуляцією BPSK (наприклад, при початковій ініціалізації АС або запиті смуги). Він також пропускається, коли використовується частина субканалів OFDM. У цьому випадку швидкість надточного кодування приймається рівної загальній швидкості кодування (відповідно, розмір вихідного блоку даних множиться на число використовуваних субканалів, ділення на 16).

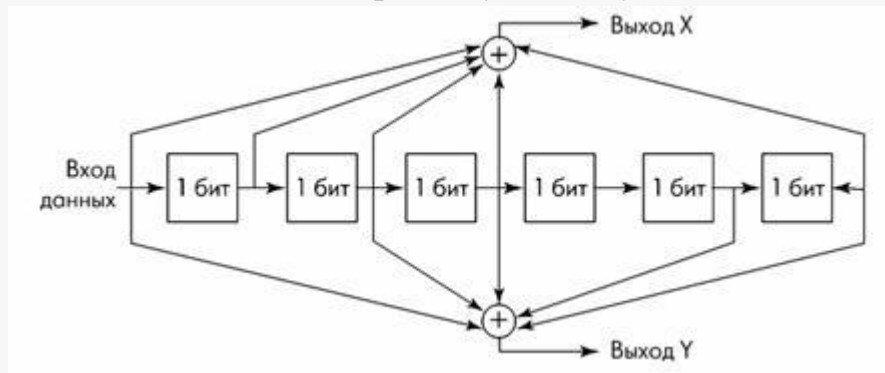


Рисунок 11. Схема надточного кодера

Крім кодування необхідна процедура перемежування – перемішування бітів у межах блоку кодування даних, що відповідає OFDM-символу. Ця операція проводиться у дві стадії. Ціль першої – зробити так, щоб суміжні біти виявилися рознесеними в різні половини послідовності. Все це робиться для того, щоб при групових помилках у символі ушкоджувалися несуміжні біти, які легко відновити при декодуванні. Перемежування реалізується відповідно до формул:

$$m_k = (N_{cbps} / 12) - (k \bmod 12) + \text{floor}(k / 12);$$

$$j_k = s - \text{floor}(m_k / s) + (m_k + N_{cbps} - \text{floor}(12m_k / N_{cbps})) \bmod s,$$

$$k = 0 \dots N_{cbps} - 1,$$

де m_k і j_k – номер початкового k -го біта після першої й другої стадії перемежування, відповідно; N_{cbps} – число кодованих біт в OFDM-символі (при заданому числі субканалів), s – $1/2$ числа біт на несучу ($1/2/4/6$ біт для BPSK/QPSK/16-QAM/64-QAM, відповідно, для BPSK $s = 1$). Функція $\text{floor}(x)$ – це найбільш ціле число, не переважаюче x .

Після перемежування починається стадія модуляції. Виходячи з обраної схеми модуляції (BPSK / QPSK / 16-QAM / 64-QAM), блок представляється у вигляді послідовності груп біт, що відповідають модуляційним символам (по $1/2$ / $4/6$ біт). Кожній групі ставиться у відповідність значення Q і I з векторних діаграм Грея, які потім використовуються при безпосередній модуляції несучої

Для усереднення амплітуд квадратурних символів використовуються нормалізовані значення Q і I , т.д. помножені на коефіцієнти c (для QPSK $c = 1/\sqrt{2}$, для 16-QAM $c = 1/\sqrt{10}$, для 64-QAM $c = 1/\sqrt{42}$).

Пілотні несучі модулюються за допомогою BPSK. Значення сигналів на цих несучим визначаються на підставі двійкової ЛРП w_k з характеристичним багаточленом $x^{11} + x^9 + 1$, причому в спадному субкадрі k – номер символу відносно початку кадру, у висхідному – номер символу відносно початку пакета. Початкові стани регістра зрушення, що реалізує ЛРП, для спадного й висхідного потоків різні ($8FF_{16}$ і 555_{16} , відповідно). Властиво значення BPSK-символів обчислюються

як $c_{-88} = c_{-38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k$; $c_{-63} = c_{-13} = c_{13} = c_{38} = 1 - 2\overline{w_k}$ у спадному каналі й $c_{-88} = c_{-38} = c_{13} = c_{38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k$; $c_{-63} = c_{-13} = 1 - 2\overline{w_k}$ – у висхідному.

Після визначення модуляційних символів за допомогою ОБПФ обчислюється сам радіосигнал і передається в передавач. При прийомі всі процедури роблять у зворотному порядку.

У режимі OFDM на фізичному рівні для мереж з архітектурою «точка-багато точка» кадрова структура передачі принципово мало чим відрізняється від режиму SC. Так само як й у високочастотній області, інформаційний обмін відбувається за допомогою послідовності кадрів (фреймів). Кожен фрейм ділиться на два субкадра – спадний (DL – від БС до АС) і висхідний (UL – від АС до БС). Поділ на висхідний і спадний канали – як тимчасове (TDD), так і частотне (FDD). В останньому випадку DL й UL транслюються одночасно, у різних частотних діапазонах.

Спадний субкадр включає преамбулу, що управляє заголовком кадру (FCH) і послідовність пакетів даних. Преамбула в спадному каналі – посилка із двох OFDM-символів (довга преамбула), призначена для синхронізації.

Перший OFDM-символ використовує несучі з індексами, кратними 4, другий – тільки чесні несучі (модуляція QPSK).

За преамбулою треба керуючий заголовок кадру – один OFDM-символ з модуляцією BPSK і стандартною схемою кодування (швидкість кодування – 1/2). Він містить так званий префікс кадру спадного каналу (DLFP), що описує профіль і довжину першого (або декількох початкових) пакету в DL-субкадрі.

У перший пакет входять ширококомовні повідомлення (призначені всім АС) – карти розташування пакетів DL-MAP, UL-MAP, дескриптори спадні/висхідних каналів DCU/UCD, інша службова інформація. Кожен пакет має свій профіль (схема кодування, модуляція й т.д.) і передається за допомогою цілого числа OFDM-символів. Точки початку й профілі всіх пакетів, крім першого, утримуються в DL-MAP.

Спадний субкадр містить інтервал конкурентного доступу, що включає періоди для початкової ініціалізації АС (входження в мережу) і для запиту смуги передачі. Далі впливають тимчасові інтервали, призначені БС певним АС для передачі. Розподіл цих інтервалів (точки початку) утримується в повідомленні UL-MAP. АС у своєму тимчасовому інтервалі починає трансляцію з передачі короткої преамбули (один OFDM-символ, використовує тільки парні несучі). За ним треба властиво інформаційний пакет, сформований на каналному рівні.

Тривалість OFDM-кадрів може становити 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5; і 20 мс. Заданий базовою станцією, період побудови кадрів не може змінюватися, оскільки в цьому випадку буде потрібно десинхронізація всіх АС.

Запит на встановлення з'єднання не відрізняється від прийнятого в стандарті IEEE 802.16, за винятком додаткового режиму «концентрованого» запиту. Він призначений тільки для станцій, здатних працювати з окремими субканалами. У цьому режимі в інтервалах конкурентного доступу (заданих в UL-MAP) АС може передати короткий 4-розрядний код на одному з 48 субканалів, кожний з яких включає чотири несучих. Усього передбачено вісім кодів. Таблиця кодів і підканалів наведена в тексті стандарту IEEE 802.16. Код і номери каналу АС обираються випадковим чином.

Одержавши кодове повідомлення, БС надає АС інтервал для передачі «звичайного» запиту на надання доступу (заголовки запиту каналного рівня) – якщо це можливо. Однак на відміну від інших механізмів, БС в UL-MAP не вказує ідентифікатор її станції, що запросила, а приводить номери коду запиту, підканалу, а також порядковий номер інтервалу доступу, протягом якого був переданий запит. По цих параметрах АС і визначає, що інтервал для запиту з передачі призначений їй. Вибір моменту для передачі 4-розрядного коду запиту доступу відбувається випадковим образом, по описаному вище алгоритму звертання до каналу конкурентного доступу.

Відзначимо, що в режимі OFDM каналний ресурс може надаватися не тільки в тимчасовій області, але в окремих підканалах (групах підканалів), якщо БС й абонентські станції підтримують таку можливість.

3. Режими роботи WiMAX

Стандарт 802.16e-2005 увібрав у себе усі раніше версії й на даний момент надає наступні режими:

- Fixed WiMAX – фіксований доступ;
- Nomadic WiMAX – сеансовий доступ;
- Portable WiMAX – доступ у режимі переміщення;
- Mobile WiMAX – мобільний доступ.

Fixed WiMAX. Фіксований доступ являє собою альтернативу широкополосним провідним технологіям. Стандарт використовує діапазон частот 10–66 ГГц. Цей частотний діапазон через сильне загасання коротких хвиль вимагає прямої видимості між передавачем і приймачем сигналу. З іншого боку, даний частотний діапазон дозволяє уникнути однієї з головних проблем радіозв'язку – багатопробевого поширення сигналу. При цьому ширина каналів зв'язку в цьому частотному діапазоні досить велике (типове значення – 25 або 28 МГц), що дозволяє досягати швидкостей передачі до 120 Мбіт/с.



Рисунок 15 – Режим Fixed WiMAX

Nomadic WiMAX. Сеансовий (кочующий) доступ додав поняття сесій до уже існуючого Fixed WiMAX. Наявність сесій дозволяє вільно переміщати клієнтське встаткування між сесіями й відновлювати з'єднання вже за допомогою інших вишок WiMAX, ніж тих, що були використані під час попередньої сесії. Такий режим розроблений в основному для портативних пристроїв, таких, як ноутбуки, КПК. Введення сесій дозволяє також зменшити витрату енергії клієнтського пристрою, що теж немало важливо для портативних пристроїв.

Portable WiMAX. Для режиму Portable WiMAX додана можливість автоматичного перемикавання клієнта від однієї базової станції WiMAX до іншої без втрати з'єднання. Однак для даного режиму усе ще є обмеження швидкості пересування клієнтського встаткування – 40 км/ч. Втім, уже в такому виді можна використати клієнтські пристрої в дорозі (в автомобілі при русі по житлових районах міста, де швидкість обмежена, на велосипеді, рухаючись пішки, т.д.). Введення даного режиму зробило доцільним використання технології WiMAX для смартфонів і КПК.

Mobile WiMAX був розроблений у стандарті 802.16e-2005 і дозволив збільшити швидкість переміщення клієнтського встаткування до більше 120 км/ч.



Рисунок 16 – Режим Mobile WiMAX

Основними досягненнями мобільного режиму можна вважати нижчеподані фактори:

1. Стійкість до багатопробеневого поширення з і власних перешкод;
2. Масштабована пропускна здатність каналу;
3. Технологія Time Division Duplex (TDD), що дозволяє ефективно обробляти асиметричний графік і спрощує керування складними системами антен за рахунок естафетної передачі сесії між каналами;
4. Технологія Hybrid-Automatic Repeat Request (H-ARQ), що дозволяє зберігати стійке з'єднання при різкій зміні напрямку руху клієнтського встаткування;
5. Розподіл виділюваних частот і використання субканалів при високому завантаженні дозволяє оптимізувати передачу даних з урахуванням сили сигналу клієнтського встаткування;
6. Керування енергозбереженням дозволяє оптимізувати витрати енергії на підтримку зв'язку портативних пристроїв у режимі очікування або простою;
7. Технологія Network-Optimized Hard Handoff (ННО), що дозволяє до 50 мс і менше скоротити час на перемикання клієнта між каналами;
8. Технологія Multicast and Broadcast Service (MBS), що поєднує функції DVB-H, MediaFLO й 3GPP E-UTRA для:
 - досягнення високої швидкості передачі даних з використанням одночастотної мережі;
 - гнучкого розподілу радіочастот;
 - низького споживання енергії портативними пристроями;
 - швидкого перемикання між каналами.
9. Технологія Smart Antenna, що підтримує субканали й естафетну передачу сесії між каналами, що дозволяє використати складні системи антен, включаючи формування діаграми спрямованості, просторово-часове маркірування, просторове мультиплексування (ущільнення);
10. Технологія Fractional Frequency Reuse, що дозволяє контролювати накладення / перетинання каналів для повторного залучення частот з мінімальними втратами;

11. Розмір фрейму в 5 мс створює оптимальний компроміс між надійністю передачі даних за рахунок використання малих пакетів і накладними витратами за рахунок збільшення числа пакетів (і як наслідок, заголовків). [5].

4. Захист зв'язку WiMAX

Захищений зв'язок (Security Association, SA) – однобічне з'єднання для забезпечення захищеної передачі даних між пристроями мережі. SA бувають двох типів:

- Data Security Association, захищена зв'язок для даних;
- Authorization Security Association, захищена зв'язок для авторизації.

Захищений зв'язок для даних

Захищений зв'язок для даних буває трьох типів:

- Первинна(основна) (Primary SA);
- Статична (Static SA);
- Динамічна (Dynamic SA).

Первинний захищений зв'язок устанавлюються абонентською станцією на час процесу ініціалізації. Базова станція потім надає статичний захищений зв'язок. Що стосується динамічних захищених зв'язків, то вони встановлюються й ліквідуються в міру необхідності для сервісних потоків. Як статична, так і динамічна захищені зв'язки можуть бути однієї для декількох абонентських станцій.

Захищений зв'язок для даних визначається:

- 16-бітним ідентифікатором зв'язку;
- Методом шифрування, застосовуваним для захисту даних у з'єднанні;
- Двома Traffic Encryption Key (ТЕК, ключ шифрування трафіку), що тече й той, котрий буде використатися, коли в поточного ТЕК закінчиться строк життя;
- Двома двобітними ідентифікаторами, по одному на кожен ТЕК;
- Часом життя ТЕК. Може мати значення від 30 хвилин до 7 днів.

Значення за замовчуванням 12 годин;

- Двома 64-бітними векторами ініціалізації, по одному на ТЕК (потрібно для алгоритму шифрування DES);
- Індикатором типу зв'язку (первинна, статична або динамічна).

Абонентські станції звичайно мають один захищений зв'язок для даних для вторинного частотного каналу керування (secondary management channel); і або один захищений зв'язок даних для з'єднання в обидва боки (uplink й downlink), або один захищений зв'язок для даних для з'єднання від базової станції до абонентської й одну – для зворотного.

Абонентська станція й базова станція розділяють один захищений зв'язок для авторизації. Базова станція використає захищений зв'язок для авторизації для конфігурування захищеного зв'язку для даних.

Захищений зв'язок для авторизації визначається:

- сертифікатом X.509, що ідентифікує абонентську станцію, а також сертифікатом X.509, що ідентифікує виробника абонентської станції.

- 160-бітовим ключем авторизації (authorization key, АК). Використається для аутентифікації під час обміну ключами ТЕК.
 - 4-бітовим ідентифікатором ключа авторизації.
 - Часом життя ключа авторизації. Може приймати значення від 1 дня до 70 днів. Значення за замовчуванням 7 днів.
 - 128-бітовим ключем шифрування ключа (Key encryption key, КЕК). Використається для шифрування й розподілу ключів ТЕК.
 - Ключем НМАС для спадних повідомлень (downlink) при обміні ключами ТЕК.
 - Ключем НМАС для висхідних повідомлень (uplink) при обміні ключами ТЕК.
 - Списком data SA, для яких дана абонентська станція авторизована.
- КЕК обчислюється в такий спосіб:
1. Проводиться конкатенація шістнадцятирічного числа 0x53 із самим собою 64 рази. Виходять 512 біт.
 2. Праворуч приписується ключ авторизації.
 3. Обчислюється хеш-функція SHA-1 від цього числа. Виходять 160 біт на виході.
 4. Перші 128 біт беруться в якості КЕК, інші відкидаються.

Ключі НМАС обчислюються в такий спосіб:

1. Проводиться конкатенація шістнадцятирічного числа 0x3A (uplink) або 0x5C (downlink) із самим собою 64 рази.
2. Праворуч приписується ключ авторизації.
3. Обчислюється хеш-функція SHA-1 від цього числа. Виходять 160 біт на виході. Це і є ключ НМАС.

Для шифрування переданих даних необхідний спеціальний ключ, що зветься ТЕК. Цей ключ вибирається базовою стацією випадково, однак при його передачі на абонентську станцію використовується ключ АК, а також два додатково вироблених ключі: ключ шифрування ключів – КЕК і ключ аутентифікації повідомлень – НМАС key. Ключ ТЕК шифрується одним з наступних способів:

- за допомогою алгоритму 3DES на ключі КЕК, при цьому довжина ключа КЕК дорівнює 112 біт;
- за допомогою системи шифрування RSA, відкритий ключ береться із цифрового сертифіката X.509;
- за допомогою алгоритму AES на ключі КЕК, довжина якого в цьому випадку дорівнює 128 біт.

При обміні повідомленнями хеш-функція НМАС-SHA1, що крім контролю цілісності забезпечує захист від підміни (тому що використовує ключ АК, відомий тільки АС і БС) (див. мал. 6.1 Для шифрування повідомлень стандарт передбачає використання алгоритму DES у режимі CBC або алгоритм AES у режимі CCM. Сам процес шифрування показаний на мал. 6.3 для алгоритму DES).

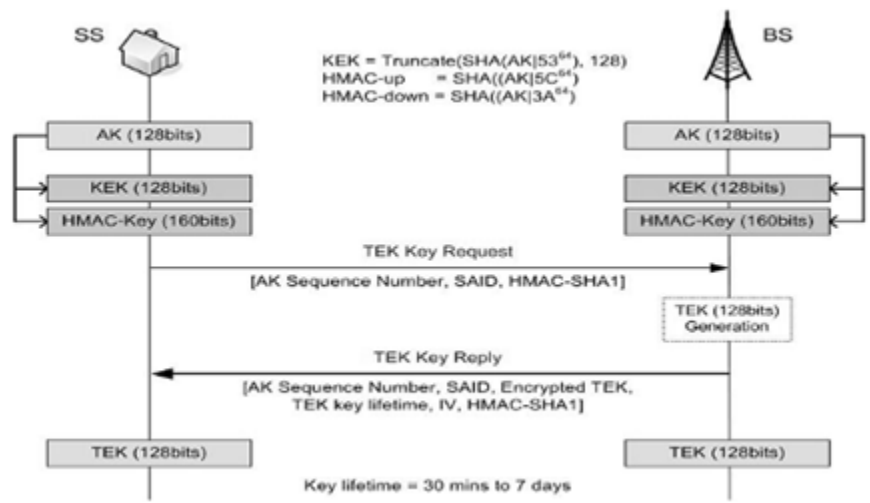


Рисунок 18 – Передача ключа шифрування даних

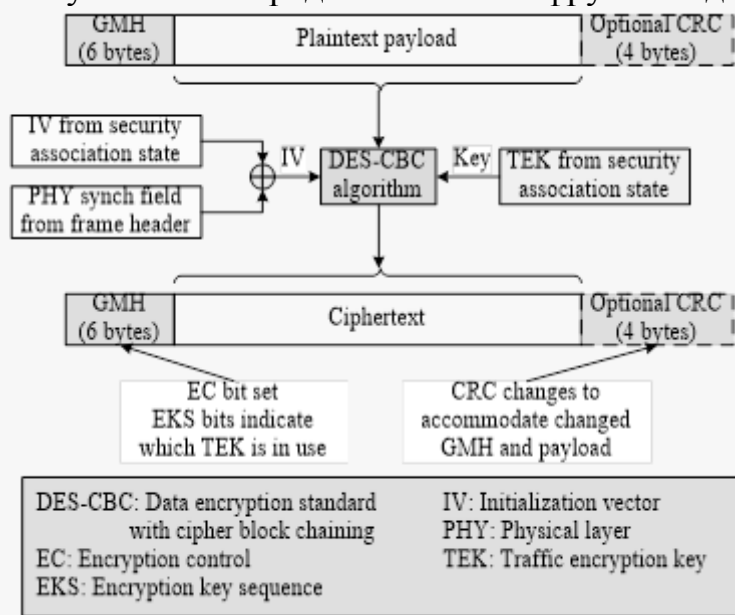


Рисунок 18 – Процес шифрування даних за допомогою алгоритму DES у режимі CBC

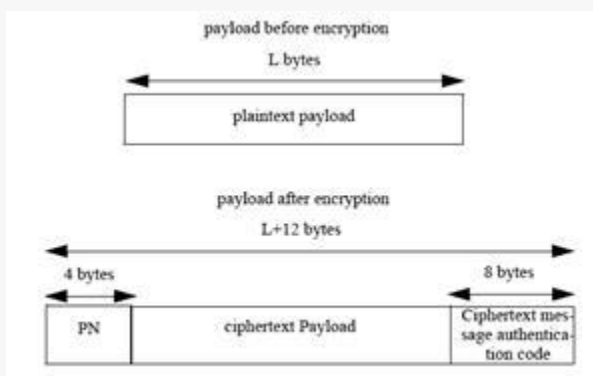


Рисунок 19 – Структура шифрованого повідомлення при використанні алгоритму AES PN – номер пакета

Недоліками можна вважати дефіцит устаткування, що повністю відповідає всім вимогам і стандартам, які розробляються й приймаються організацією

WiMAX – Forum. Устаткування, що випускається для WiMAX різними виробниками, не сумісно один з одним і технічними характеристиками істотно відрізняються від тих, що були закладені в стандарт.

Обмеження використання частот уведені ГОС. Комісією з розподілу частот. Після введення цих обмежень радіус дії й потужність базових станцій у діапазонах, у яких працює WiMAX, сильно обмежили, і у великому місті, чисельність населення якого більше 1 млн. чоловік, радіус дії не повинен перевищувати 3 км. Пристрою з підтримкою WiMAX дороги Поки що дуже обмежене покриття мережі.

5. Принципи побудови мережі WiMAX

Побудова мережі WiMAX припускає використання трьох типів устаткування – базові станції (БС), абонентський комплект (абонентська станція – АС) і встаткування для організації зв'язку між базовими станціями – ретрансляційні станції (РС).



Рисунок 20 – Об'єднання філіальної мережі в межах міста

Розглянемо топологію мережі SkyMAN. Мережа ШБД SkyMAN може включати одну або кілька базових станцій (БС), об'єднаних бездротовими магістралями SkyMAN або іншими каналами зв'язку. Кожна БС містить від одного до шести секторів. До складу мережі включені ретрансляційні станції (РС), що забезпечують збільшення дальності й дозволяють обходити великі перешкоди, що закривають БС від окремих АС. АС підключаються по радіо до БС або РС. АС, що перебуває в зоні радіовидимості більш ніж однієї БС, може бути зареєстрована на кожній з них, при цьому підтримується адаптивний вибір БС, що забезпечує кращу якість обслуговування. Така властивість системи дозволяє забезпечити гаряче резервування каналу АС-БС, підвищуючи надійність мережі в цілому.

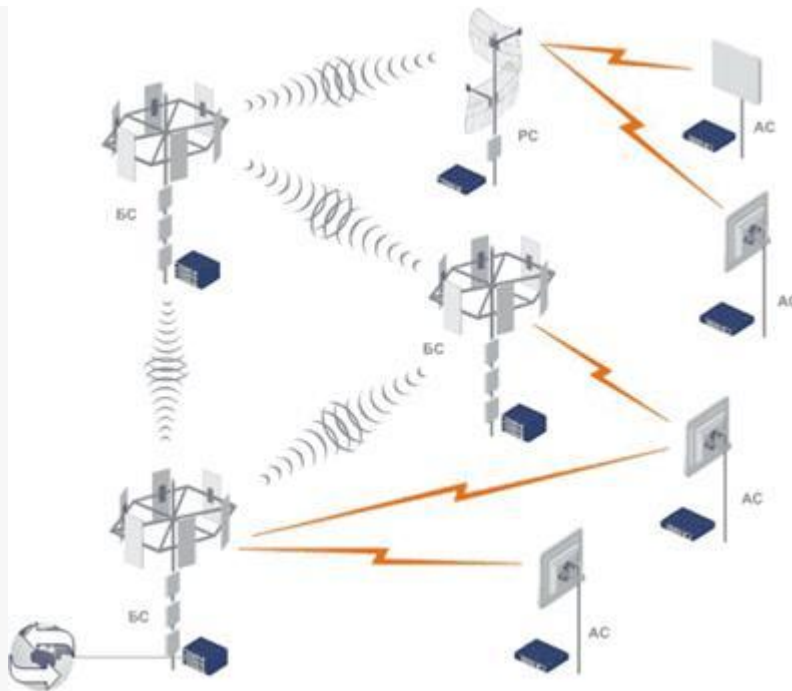


Рисунок 21 – Топологія мережі SkyMAN

Базова станція (БС). БС системи SkyMAN Access призначена для бездротового підключення абонентів до Інтернет і ТФОП, а також об'єднання територіально – рознесених корпоративних мереж у єдину мережу.

БС будується по модульному принципі і може включати від одного до 6 модулів, залежно від вимог до пропускної здатності, дальності передачі, використовуваного частотного діапазону й наявності вільних частот. Кожний з модулів (або радіоінтерфейсів у двомодульних моделях) забезпечує обслуговування одного просторового сектора в межах діаграми спрямованості використовуваної антени. Типові значення зони охоплення кожного сектора 360° (один сектор), 120° (три сектори), і 60° (шість секторів). Устаткування БС не накладає певних вимог до ширини сектора, що у конкретних випадках може бути довільною, обумовленою конкретною топологією мережі, наявністю частотного ресурсу й розміщенням абонентів.

До складу БС входять:

- Бездротові маршрутизатори R5000 – від 1 до 6, по одному на сектор. Для малопотужних БС можуть використатися двомодульні бездротові маршрутизатори – по одному на два сектори. Односекторні БС забезпечують швидкість передачі до 54 Мбіт/с. Багатосекторні БС які забезпечують роботу зі швидкістю до 48 Мбіт/з на сектор.

- Антенно-фідерні пристрої – по кількості секторів базової станції.

- Ліцензії для підключення спеціалізованих абонентських станцій, на кожен сектор базової станції.

- Програмне забезпечення для керування мережею SkyMAN

- Комутатор Ethernet (опціонально).

- Шафа для монтажу встаткування (опціонально).

- Джерела безперебійного живлення (опціонально).

Рекомендації з побудови БС. Рекомендації з побудови БС впливають із аналізу умов роботи систем фіксованого бездротового доступу:

- Звичайно потік від БС до АС (спадний) значно перевищує потік висхідний.

- Ширина діаграми спрямованості секторної антени БС приблизно в 10 разів більше ширини діаграми спрямованості антени АС.

- Багатосекторних БС працює одночасно з АС різних секторів.

- БС розміщуються на високих будовах або антенних опорах, на яких установлюють й інші радіосистеми, що приводить до підвищення загального рівня перешкод. Крім того, високе розташування антен БС саме по собі приводить до збільшення рівня й кількості перешкод. Як наслідок, відношення сигнал/шум на БС істотно гірше чому на АС.

- Підвищення швидкості передачі практично не погіршує умов роботи сусідніх систем.

- Підвищення швидкості прийому приводить до істотного зниження завадостійкості. Облік специфіки роботи систем фіксованого бездротового доступу дозволив виробити наступні рекомендації:

- На багатосекторних БС швидкість у напрямку БС-АС не повинна перевищувати 48 Мбіт/з, у зворотному напрямку – 24 Мбіт/с.

- Необхідно обмежувати діапазон регулювання швидкості передачі АС знизу, або відслідковувати деградацію швидкості кожного клієнта.

- Використати механізм автоматичного вибору швидкості.

- У холодних регіонах все встаткування БС і всі пристрої з опцією R300 повинне вибиратися модифікації ВІД, тобто з розширеним температурним діапазоном.

Ретрансляційна станція (РС). РС призначена для підвищення дальності дії БС, обходу великих перешкод, а також для створення протяжних магістральних каналів точка-точка. Кількість підключень послідовно РС не обмежена. До кожної РС може бути підключена одна або трохи РС й/або АС

До складу РС входять:

- Двухмодульний бездротовий маршрутизатор R5000.

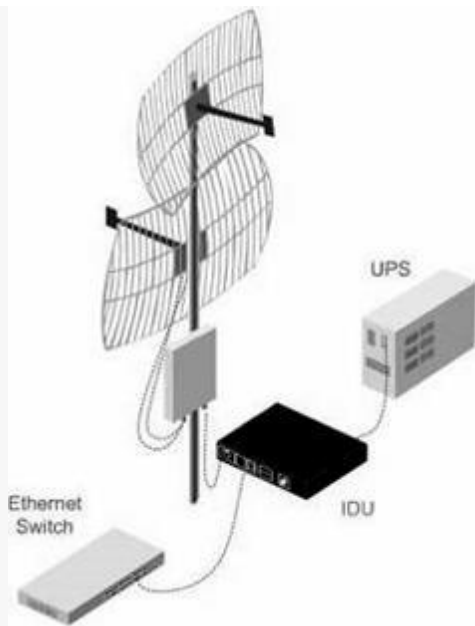
- Спрямована антена для зв'язку із БС (у випадку РС без інтегрованої антени).

- Всеспрямована, секторна або спрямована антена для підключення АС й/або РС.

- Кабелі для підключення антен.

- Ліцензія для підключення спеціалізованих АС до РС.

Для бездротового об'єднання мереж діапазонів 2,4 й 5/6 ГГц випускаються двомодульні двох діапазонні бездротові маршрутизатори.



Абонентська станція (АС) АС призначена для бездротового підключення абонентів до БС або РС, а також для створення магістральних каналів «точка-точка».

Склад АС:

- Абонентський бездротовий маршрутизатор з інтегрованою антеною або розніманням для підключення зовнішньої антени.
- Спрямована антена й антенний кабель для моделей без інтегрованої антени.

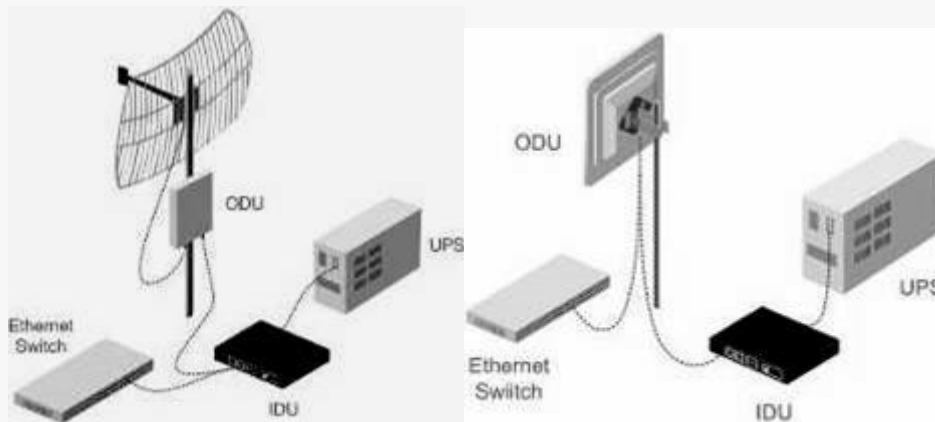


Рисунок 25 – Типові схеми АС