

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Дніпропетровський національний університет  
ім. Олеся Гончара**

**В.В. Гнатушенко, О.О. Дробахін, В.М. Корчинський**

**СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО  
ТА СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

*Ухвалено вченою радою університету як навчальний посібник*

**Дніпропетровськ  
РВВ ДНУ  
2012**

УДК 621.396.6.001.2  
Г 56

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. О.І. Михальов  
д-р фіз.-мат. наук, проф. О.М. Ахметшин

Г 56 Гнатушенко, В.В. Системи супутникового та стільникового зв'язку [Текст]: навч. посіб. / В.В. Гнатушенко, О.О. Дробахін, В.М. Корчинський. – Д.: РВВ ДНУ, 2012. – 80 с.

Описано побудову та функціонування сучасних супутникових і стільникових систем зв'язку. Подано чинні стандарти стільникового цифрового радіозв'язку, зокрема D-AMPS та GSM. Розглянуто актуальне питання впровадження стільникових систем третього покоління (3G) на основі технології CDMA (стандарт IS-95). Наведено основні принципи побудови систем бездротового доступу WiMax і технології LTE для стільникових мереж мобільного зв'язку четвертого покоління. Розкрито методи формування сигналів із OFDM, способи їх приймання, а також структуру кадрів у мережах WiMax.

Для студентів ДНУ факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем.

Темплан 2012, поз. 11

Навчальне видання

Володимир Володимирович Гнатушенко  
Олег Олегович Дробахін  
Володимир Михайлович Корчинський

**Системи супутникового  
та стільникового зв'язку**

Навчальний посібник

Редактор А.Я. Пащенко  
Техредактор Л.П. Замятіна  
Коректор Т.А. Белиба

---

Підписано до друку 23.05.12. Формат 60 x 84 / 16.  
Папір друкарський. Друк плоский. Ум. друк. арк. 4,7. Ум. фарбовідб. 4,7.  
Обл.-вид. арк. . Тираж 200 пр. Зам. №

---

РВВ ДНУ, просп. Гагаріна, 72, м. Дніпропетровськ, 49010.  
Друкарня ДНУ, вул. Наукова, 5, м. Дніпропетровськ, 49050

© Гнатушенко В.В., Дробахін О.О., Корчинський В.М., 2012

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АМ	- амплітудна модуляція
Ат	- аутентифікація
АТС	- автоматична телефонна станція
АЦП	- аналогово-цифрове перетворення
БППС	- базова приймально-передавальна апаратура
БР	- бортовий ретранслятор
БС	- базова станція
БСД	- багатостанційний доступ
БСДчР	- багатостанційний доступ з часовим розділенням
БСДКР	- багатостанційний доступ з кодовим розділенням
БСДЧР	- багатостанційний доступ з частотним розділенням
БФ	- блок фільтрів
ВА і К	- виклик абонентів і комутація
ВКФ	- взаємно кореляційна функція
ВУСМ	- взаємно узгоджена стаціонарна мережа
ВФМ	- відносна фазова модуляція
Дм	- демодулятор
ДЧТ	- двократне частотне телеграфування
Ід	- ідентифікація
ІКМ	- імпульсно-кодова модуляція
ІС	- іоносферні системи
К	- комутатор
КБС	- контролер базової станції
ККД	- коефіцієнт корисної дії
КНП	- коефіцієнт підсилення
КП	- контролер пейджингу (Paging Controller)
ЛБХ	- лампа з біжучею хвилею
ЛК	- логічний канал
Мд	- модулятор
МС	- місце складання
БПП	- багатокаскадні параметричні підсилювачі
НС	- наземна станція
ПВП	- псевдовипадкова послідовність
ПО	- пристрої об'єднання
ППВЧ	- принцип повторного використання частот
ППН	- пристрій програмного наведення
Пд	- передавач
Пм	- приймач
ПрРЦ	- приймальний радіоцентр
ПРЦ	- передавальний радіоцентр
ПС	- пілот-сигнал
РБ	- радіобюро

PHC	- роздільник непарних стволів	
PP	- розв'язувальний пристрій	
PPC	- роздільник парних стволів	
PPЛ	- радіорелейна лінія	
PPСП	- радіорелейна система передачі	
PC	- рухома станція	
CA	- сигнали адрес	
СБС	- система базових станцій	
CB і K	- сигнали синхронізації, виклику і комутації	
CGKP	- синхронізація опорних генераторів під час когерентного приймання	
CC	- службовий сигнал	
CCЗ	- супутникові системи зв'язку	
CTM	- стаціонарна телефонна мережа загального користування	
CTП	- синхронний телеграфний пристрій	
TC	- сигнал тактової синхронізації (для ІКМ)	
TFK	- телефонний канал	
TFП	- телефонне повідомлення	
FG	- фільтр гармонік	
FK	- фізичний канал	
FM	- фазова модуляція	
ΦУА	- функція Уолша—Адамара	
ЦК	- центр комутації	
ЦMPP	- цифрова мережа рухомого радіозв'язку	
ЦC	- сигнал циклової синхронізації	
ЧК	- частотний канал	
ЧM	- частотна модуляція	
ЧT	- частотне телеграфування	
ШДС	- ширина діаграми спрямованості	
ШCЗ	- штучний супутник Землі	
3GPP	(Third Generation Partnership Project)	- проект партнерства третього покоління
ACK	(Acknowledgement (in ARQ protocols))	- підтвердження (у протоколі ARQ)
ARQ	(Automatic Repeat-reQuest)	- автоматичне повторення запиту
AMPS	(Advanced Mobile Phone Service)	- вдосконалена рухома телефонна служба
AWGN	(Additive White Gaussian Noise)	- адитивний білий гауссівський шум
BLER	(Block-Error Rate)	- коефіцієнт блокових помилок
BPSK	(Binary Phase-Shift Keying)	- двійкова фазова маніпуляція
BCCH	(Broadcast Control Chanel)	- широкомовний канал керування
CDMA	(Code Division Multiple Access)	- множинний доступ з кодовим розділенням каналів
CQI	(Channel Quality Indication)	- індикатор якості каналу

DCI	(Downlink Control Information)	- спадна керуюча інформація
DL	(Downlink)	- спадний канал
eNodeB	(E-UTRAN NodeB)	- базова станція LTE
FDMA	(Frequency Division Multiple Access)	- множинний доступ з розділенням каналів за частотою
FFT	(Fast Fourier Transform)	- швидке перетворення Фур'є
FPC	(Fractional Power Control)	- часткове керування потужністю
HARQ	(Hybrid ARQ)	- гібридний протокол ARQ
HLR	(Home Location Register)	- реєстр положення
ISDN	(Integrated Services Digital Network)	- цифрові мережі з інтеграцією служб (обслуговування)
LTE	(Long Term Evolution)	- технологія довгострокового розвитку
MAC	(Medium Access Control)	- керування доступом до середовища
MIMO	(Multiple-Input Multiple-Output)	- технологія передачі даних за допомогою $N$ антен та приймання $M$ антенами
MSC	(Mobile Switching Centre)	- центр комутації рухомого зв'язку
OFDM	(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)	- ортогональне мультиплексування з частотним розділенням
OMC	(Operations and Maintenance Centre)	- центр керування та обслуговування
PDCCH	(Physical downlink control channel)	- фізичний спадний канал керування
PHY	(Physical layer)	- фізичний рівень
QAM	(Quadrature Amplitude Modulation)	- квадратурно-амплітудна модуляція
QoS	(Quality of Service)	- якість обслуговування
QPSK	(Quadrature Phase-Shift Keying)	- квадратурно-фазова маніпуляція
RB	(Resource Block)	- ресурсний блок
SACCH	(Slow Associated Control Channel)	- повільний асоційований керувальний канал
SDCCH	(Stand Alone Dedicated Control Channel)	- виділений закріплений канал керування (сигнальний канал)
SIM	(Subscriber Identity Module)	- модуль ідентифікації абонента (смарт-карта)
SINR	(Signal-to-Interference plus Noise Ratio)	- сигнал до інтерференції плюс коефіцієнт шуму
SNR	(Signal-to-Noise Ratio)	- співвідношення сигнал/шум
TDMA	(Time Division Multiple Access)	- множинний доступ із часовим розділенням каналів
TTI	(Transmission Time Interval)	- часовий інтервал передачі
VLR	(Visitors Location Register)	- реєстр переміщення

## ВСТУП

Нинішній час, не перебільшуючи, можна назвати епохою телекомунікацій. Кожна сучасна людина використовує засоби телекомунікацій у повсякденному житті. За останні роки телекомунікаційні технології набули надзвичайного поширення, причому водночас із комп'ютерною технікою та технологіями комп'ютерних мереж з'явилися комп'ютерна телефонія, телеконференцзв'язок, електронна пошта та ін. Існуючі ж телекомунікації застосовують по-новому. Так, звичайні телефонні та стільникові мережі дедалі частіше слугують для доступу до Інтернету й передачі даних, на основі супутникових технологій будують корпоративні мережі тощо. Технології мобільного голосового зв'язку та високошвидкісної бездротової передачі даних наразі дуже стрімко розвиваються, що змушує замислитися про перспективи використання нових стандартів і систем зв'язку вже в найближчому майбутньому. Сьогодні експертам і технічним фахівцям телекомунікаційних компаній, операторам зв'язку й провайдерам послуг доводиться виконувати складні завдання безболісного переходу на нові технології. При цьому обов'язково слід дотримуватися поєднання нових технологій зі старими, їх раціонального застосування в інтересах як операторів, так і користувачів. Майбутнім фахівцям із телекомунікацій, інформаційних систем і технологій необхідно орієнтуватися в безлічі сучасних телекомунікацій для того, щоб якомога ефективніше застосовувати їх у практичній діяльності.

Даний навчальний посібник покликаний допомогти студентам засвоїти матеріал про побудову та функціонування сучасних супутникових і стільникових систем зв'язку. Такі питання, як блокове турбо- і LDPC-кодування, опис процедур підключення абонентів до мережі й хендовера, балансування навантаження запропоновано розглянути самостійно.

# 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1. Структурні схеми радіозв'язку

Принципи побудови системи зв'язку з використанням штучних супутників Землі (ШСЗ) можна пояснити за допомогою наведених схем (рис. 1.1, 1.2) [7].

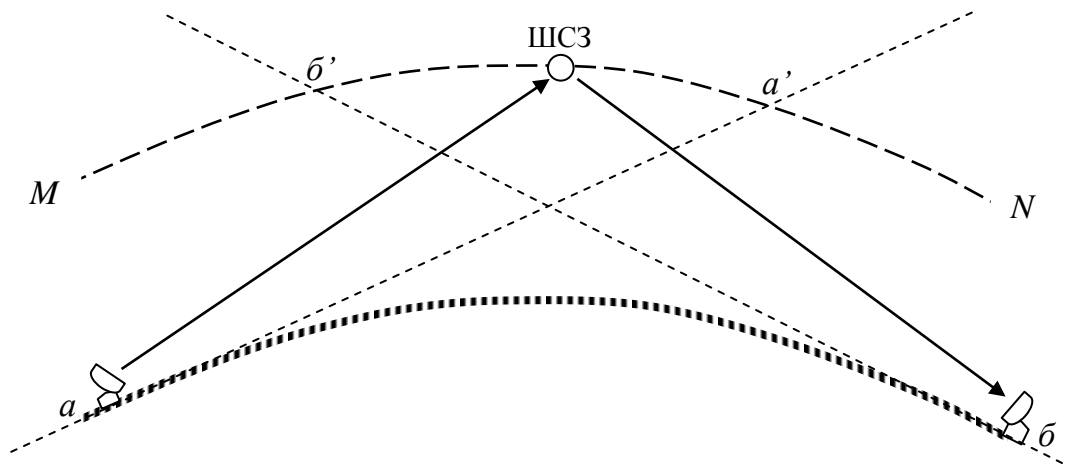
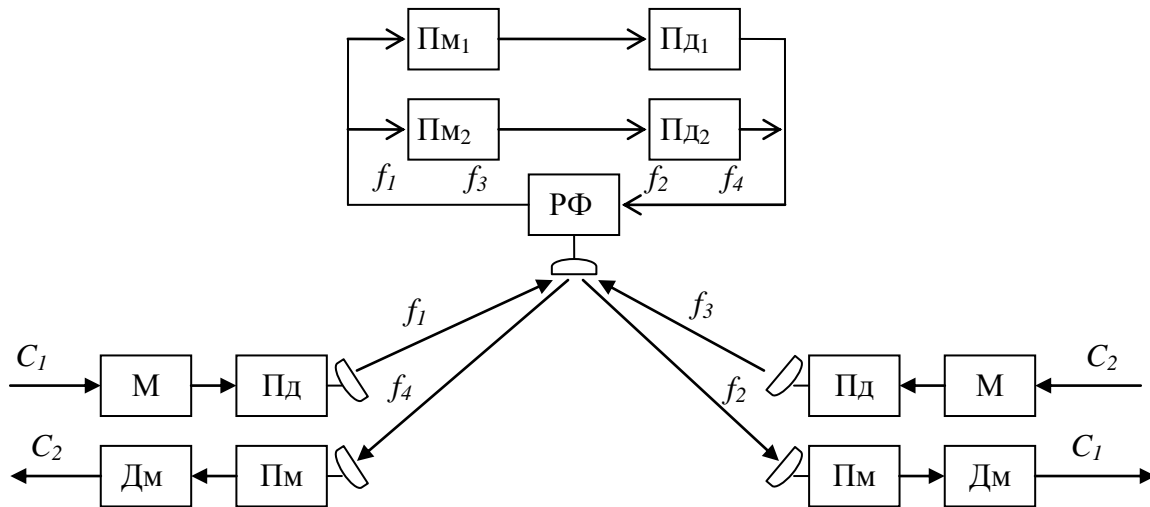


Рис. 1.1. Принцип установалення зв'язку через ШСЗ

На рис. 1.1  $a, b$  — наземні станції (НС), між якими встановлюється зв'язок, прямі  $aa'$  та  $bb'$  — лінії місцевого горизонту в точках  $a$  і  $b$ . ШСЗ, що рухається по орбіті  $MN$  (колова орбіта типу «Космос»), можна одночасно спостерігати зі станцій  $a$  і  $b$ , поки він знаходиться на ділянці орбіти  $b'a'$ . Тобто час, протягом якого можна користуватись зв'язком за такого взаємного розташування елементів системи, обмежений зоною взаємної видимості. Антени НС завжди мають бути спрямовані на ШСЗ. Очевидно, що система, подана на рис. 1.2, повинна строго відповідати плану розподілу частот. Для передачі повідомлень існує інший метод, коли на борту супутника апаратура відсутня. Тобто супутник являє собою пасивний ретранслятор (у такому випадку його називають пасивним). За сучасного рівня техніки пропускна здатність описаної системи невелика — 2—3 телефонні канали (ТФК). У разі використання низькоорбітального супутника (висота орбіти нижча за точку перетину ліній місцевого горизонту, рис. 1.1) робота системи організована таким чином. ШСЗ приймає повідомлення НС  $a$ , запам'ятовує отриману інформацію і передає її на НС  $b$ , коли буде знаходитись у зоні її дії. Дану систему називають або системою із пам'яттю, або системою із затриманою ретрансляцією. Отже, висота орбіти ШСЗ визначає режим роботи системи в цілому.

Залежно від форми розрізняють такі орбіти: колову й еліптичну з різним нахилом відносно площини екватора [7]. Якщо кут нахилу дорівнює  $0^\circ$  — орбіта екваторіальна,  $90^\circ$  — полярна. Точку орбіти, найближчу до поверхні Землі, називають перигеєм, а найвіддаленішу — апогеєм. Особливий інтерес становить геостаціонарна орбіта. Вона за визначенням є екваторіальна та колова ( $h_a \approx h_n \approx 36\,000$  км). Переваги цієї орбіти такі: 1) можливість передачі й приймання за допомогою нерухомих антен; 2) цілодобовий неперервний зв'язок на території, що становить

1/3 земної поверхні. Недолік геостационарної системи — труднощі в забезпеченні надійного зв'язку на широтах, вище 75—78°) (різко зростають шуми на вхідних підсилювачах земних приймачів).



**Рис. 1.2. Структурна схема організації каналів зв'язку з використанням активного супутника:**

Дм — демодулятор; М — модулятор; Пд — передавач; Пм — приймач;  
РФ — режекторний фільтр

Тривалий безперебійний зв'язок із застосуванням звичайних орбіт можливий лише за рахунок збільшення групи ШСЗ. Відповідні системи називають *системами зв'язку з використанням сузір'я ШСЗ*. За даних умов на НС мають бути як мінімум дві антени для спостереження за ШСЗ, що займають сусідні позиції на орбіті, або для роздільної роботи по низькоорбітальному сузір'ю і геостационарному ретранслятору. Слід відзначити, що використання низькоорбітальних ШСЗ спрощує апаратуру НС (зниження  $G$ ,  $P_{нд}$ ,  $P_{нор}$ ,  $K_{ш}$ ). Оскільки за ШСЗ можуть спостерігати декілька НС одночасно, то слід розглянути можливість організації багатостанційного доступу. У таких системах можна забезпечити циркулярний і дуплексний зв'язки між усіма НС.

## 1.2. Особливості передачі та обробки сигналів у супутникових системах зв'язку

Головною особливістю супутникових систем зв'язку (ССЗ) можна вважати обов'язкове запізнення сигналів, причому час запізнення пов'язаний із сумарною відстанню до супутника [7]:

$$t_3 = \frac{L}{C} \cong \frac{2H}{C}, \quad (1.1)$$

де  $L$  — протяжність лінії НС—ШСЗ—НС;  
 $H$  — висота орбіти.

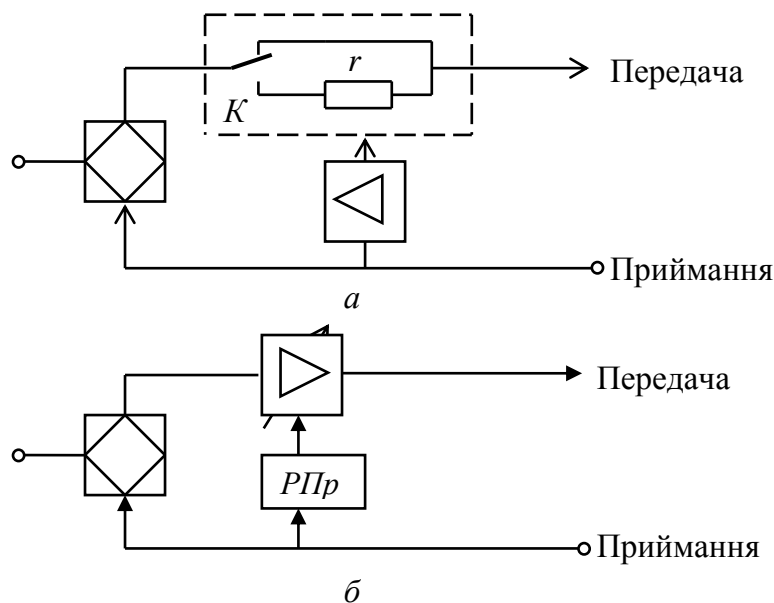
Коли  $H=36\ 000$  км,  $t_3=250$  мс. Така затримка відчутна для абонентів. Часто також можна спостерігати інше явище — *ехосигнал*, коли абонент чує те, що він говорить із відповідною затримкою. Ехосигнали виникають під час переходу з чо-



тирипровідної на двопровідну систему через неідеальні диференціальні системи. Час виникнення ехосигналів пов'язаний із відстанню, яку проходить сигнал:

$$t_{exo} = \frac{2L}{C} \approx \frac{4H}{C}. \quad (1.2)$$

Якщо  $H=36\ 000$  км  $t_{exo} \approx 500$  мс. У таких випадках потрібно забезпечувати заглушення ехосигналу до 60 дБ за допомогою схем *ехозагороджувачів* (рис.1.3). Основний елемент схеми є підсилювач. Із появою на його виході мовних струмів спрацьовує ключ  $K$  і тракт передачі закривається – у нього вводять значне ослаблення (елемент  $r$ ). Відповідно така схема має недолік: важко забезпечити режим зв'язку, коли можливе перебивання розмови одного абонента іншим (із застосуванням даної схеми це відбувається лише в паузах тривалістю  $> 100$  мс, коли тракт передачі відкривається), крім того, має місце хибне спрацьовування в разі збільшення рівня шумів у тракті приймання. У зв'язку з цим використовують розпізнавальний пристрій (РПр), принцип дії якого заснований на порівнянні спектральних складових мовного сигналу і флуктуаційних шумів. Виявлений мовний сигнал перетворюється на керувальну дію і змінює коефіцієнт підсилення в тракті передачі (рис. 1.3, б).



**Рис. 1.3. Функціональні схеми ехозагороджувачів:**  
*a* — комутаційного типу; *б* — на основі пристрою розпізнавання

У разі використання ретрансляторів супутників, що рухаються за звичайними орбітами (не геостационарними), завжди доводиться враховувати ефект Доплера. Відомо, що переміщення джерела сигналу з частотою  $f$  відносно приймача системи зі швидкістю  $V_r \ll C$  викликає доплерівський зсув  $\Delta f_{дон} = \pm f \frac{V_r}{C}$  («+» – відповідає зменшенню відстані; «-» – збільшенню відстані). Для супутникових систем ефект Доплера слід враховувати як мінімум для двох значень частот:  $f_1$  – частота ділянки траси «вгору»;  $f_2$  – частота ділянки траси «вниз». Тоді загальний зсув частоти

$$\Delta f_{\text{дон}} = \pm f_1 \frac{V_{r1}}{C} \pm f_2 \frac{V_{r2}}{C}.$$

Таким чином, під час передачі модульованого сигналу частота кожної спектральної складової змінюється в  $[1 + (V_r / C)]$  разів, тобто складові з більш високими частотами будуть зазнавати більшого зсуву, а складові з відносно низькими частотами – меншого. Це обумовлює певну деформацію спектра.

Для контролю проходження сигналів зв'язку через ретранслятор (рис. 1.2) на НС достатньо встановити РФ, що розділяє сигнали частот  $f_4$  та  $f_2$ , і допоміжний приймач Пр, налагоджений на  $f_2$  (для НС *a*, — рис. 1.1, для НС *b* — частота, яку контролюють, —  $f_4$ ). Використання приймачів контролю дозволяє на НС вимірювати рівні сигналів, які надходять до бортового приймача [6].

ССЗ не можна уявити без *допоміжних комплексів та допоміжного обладнання*, до яких належать такі системи:

- запусків ШСЗ;
- прогнозування і корекції руху ШСЗ;
- телеметрії та керування;
- автоматичного пошуку і наведення;
- єдиного часу.

Діапазони робочих частот ССЗ, вибір яких визначений інтенсивністю шумів (Сонця, Місяця, Галактики тощо), можливістю сумісної роботи з іншими службами радіозв'язку, регламентують міжнародні організації. Так, Міжнародний союз електрозв'язку на Всесвітній адміністративній радіоконференції в 1974 р. установив розподіл смуг радіочастот для ССЗ:

З → ШСЗ — 5,725—7,075; 7,9—8,4; 12,5—13,25; 14—14,8; 27,5—31 ГГц;  
 ШСЗ → З — 3,4—4,2; 4,5—4,8; 7,25—7,75; 10,7—11,7; 12,5—12,75; 17,7—21,2; 37,5—40,5 ГГц.

Зазначені смуги частот одночасно використовують і інші радіослужби. Щоб запобігти взаємним перешкодам, вводять спеціальні обмеження (за потужністю, підсиленням антен, часом випромінювання і т. д.).

### 1.3. Реалізація багатостанційного доступу

#### 1.3.1. Види каналів зв'язку

Система зв'язку через ШСЗ із багатостанційним доступом (БСД) має у своєму складі декілька НС, що знаходяться в зоні взаємного зв'язку. Канали зв'язку однієї НС з іншими в будь-яких сполученнях будують через загальний ретранслятор на ШСЗ. Для реалізації зв'язку на борту ШСЗ повинна бути передбачена апаратура комутації (підключена антена, спрямована у відповідну точку Землі). Канали зв'язку, які організують через ШСЗ між НС системи з БСД, можна поділити на дві групи:

- постійні (закріплені), які слугують для зв'язку між визначеними НС;
- непостійні (незакріплені), тимчасово створені залежно від потреб користувачів.

Канали першої групи дозволяють організувати зв'язок у будь-який мо-

мент часу. Для роботи каналів другої групи потрібно:

- отримати відомості про наявність вільного каналу (підняти трубку і почути відповідь АТС);
- набрати номер абонента;
- отримати відомості про наявність вільного каналу до потрібного абонента.

Система з постійними каналами, мабуть, повинна мати більшу їх кількість, ніж система з непостійними каналами. Але остання більш ефективна, хоча й має такі недоліки, як:

- додатковий час для встановлення зв'язку;
- можлива відмова у встановленні з'єднання.

Функціонування системи з БСД можна організувати за певним алгоритмом. За умовою формування багатонадресного групового повідомлення кожна НС випромінює один ствол із груповим повідомленням, призначеним для решти НС. Такі стволи після проходження через бортовий ретранслятор (БР) приймають усі НС. Після демодуляції з кожного ствола виділяють частини груп повідомлень, призначені тільки для певної НС. Це можливо або на основі *адреси*, переданої попереду повідомлення, або за домовленістю (визначене місце розміщення каналу (каналів) для відповідної НС). Цілком зрозуміло, що передавальна апаратура в такому випадку складніша за приймальну.

Існує три основні можливості забезпечення БСД:

- БСД з частотним розділенням (БСДЧР);
- БСД з часовим розділенням (БСДЧР);
- БСД з кодовим розділенням (БСДКР).

За умов заданого рівня перехідних шумів у ТФК зі збільшенням кількості стволів (несучих), що одночасно підсилюються у ССЗ з БСД, доводиться зменшувати кількість повідомлень, які передаються на одній несучій.

### 1.3.2. Організація режимів багатостанційного доступу

У випадку БСДЧР для кожного ствола, тобто НС, виділено визначену несучу частоту ( $f_1, f_2 \dots f_n$ ). Захисний частотний інтервал між парою несучих частот вибирають таким чином, щоб усунути можливість взаємного перекриття спектрів у разі модуляції. Вважають, що найбільш просто БСДЧР реалізувати в тому випадку, коли на НС має місце частотна модуляція (ЧМ) коливань багатоканальним повідомленням із частотним розділенням ТФК (скорочено ЧМ БСДЧР). У такій системі на вхід БР надходить складний сигнал, який являє собою  $n$  модульованих за частотою гармонічних сигналів. БР – нелінійний пристрій, тому:

- 1) виникають перешкоди;
- 2) заглушаються сигнали НС із низьким рівнем;
- 3) наявні перехідні перешкоди між стволами і зниження вихідної потужності БР, оскільки амплітудні характеристики (АХ) каскадів, спільних для всіх стволів, — нелінійні.

Названі явища обумовлюють такі параметри системи: ефективну девіацію частоти — 125 кГц; пропускну здатність —  $24 \cdot 12 = 288$  ТФК.

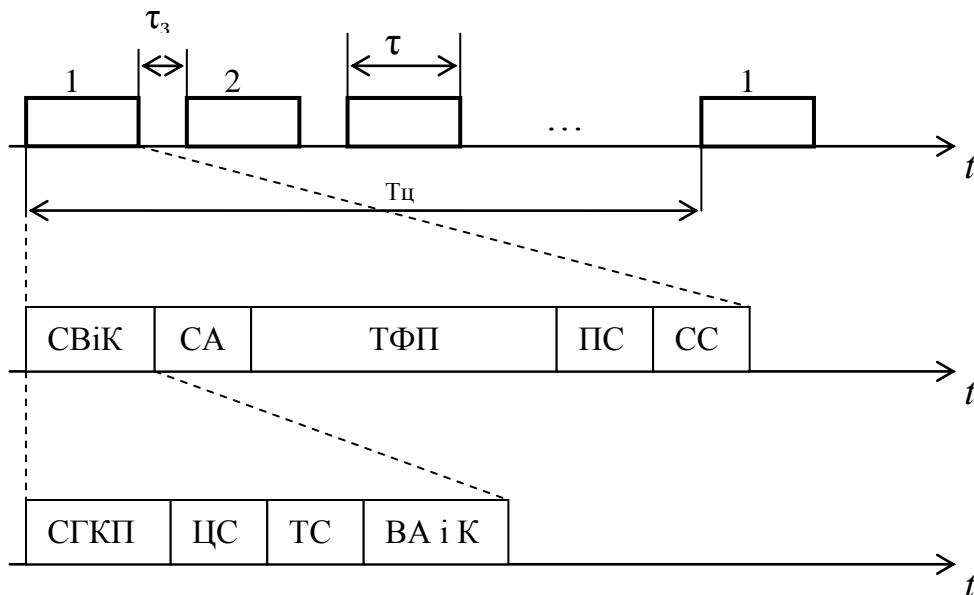
У режимі БСДЧР робота НС відбувається по черзі, усі НС можуть працюва-

ти на одній несучій частоті, але зі спільною системою синхронізації. Протягом інтервалів  $\tau$ , які називають кадрами станцій (рис. 1.4), кожна НС випромінює, при цьому захисний інтервал між кадрами дорівнює  $\tau_3$ . Система синхронізації реалізується за пілот-сигналом і повинна враховувати різні відстані між ШСЗ і НС. Інформаційна частина кадру становить 85—90 % від повної довжини.

### **Переваги БСДчР порівняно з БСДЧР**

Імпульсна потужність передавача НС не залежить від умов роботи інших станцій і не потребує регулювання, оскільки взаємне заглушення сигналів відсутнє. Усі НС можуть працювати на різних несучих частотах. Передавач БР працює в режимі максимальної потужності, при цьому відсутні взаємні перешкоди між сигналами, що ретранслюються. Серед недоліків БСДчР слід назвати складність системи синхронізації і наявність перешкод у разі втрати синхронізації хоча б на одній НС.

БСДчР може бути організований за умов асинхронної роботи. При цьому станції розрізняють за частотною або часовою ознакою кодових комбінацій.



**Рис. 1.4. Цикл передачі в системі з БСДчР:**

СВ і К – сигнали синхронізації, виклику і комутації; СА – сигнали адрес; ПС – пілот-сигнали; СС – службові сигнали; ТФП – телефонне повідомлення; СГКП – синхронізація опорних генераторів у разі когерентного приймання; ЦС – сигнал циклової синхронізації; ТС – сигнал тактової синхронізації (для ІКМ); ВА і К – виклик абонентів і комутація

### **1.3.3. Системи з обробкою сигналів у бортовому ретрансляторі**

Обробка сигналів на борту дозволяє:

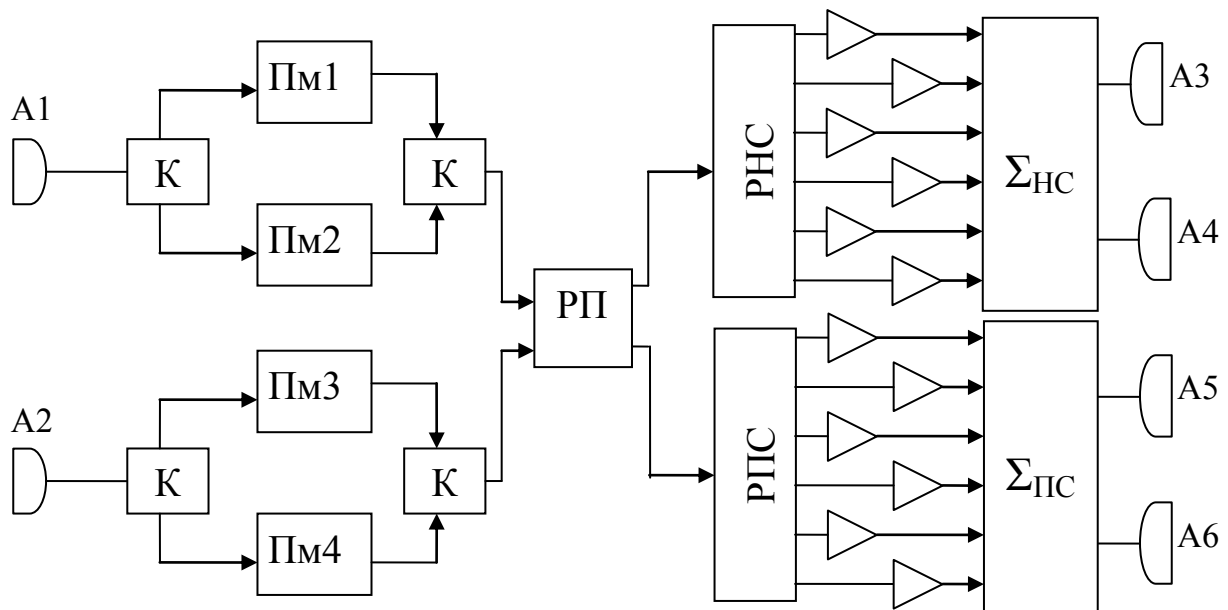
1) перегрупувати канали (можна об'єднати канали, призначені відповідній НС); випромінювання може бути організовано:

- одночасно всім НС на різних частотах через одну антену;
- одночасно всім НС на різних частотах через декілька антен або одну багатопроменеву антену;

- через одну антену, що змінює орієнтацію в просторі, за допомогою запам'ятовуючих пристроїв;
- 2) установити у БР регенератори, за допомогою яких усувають накопичення шумів та спотворень сигналів лінійного тракту;
  - 3) змінювати види модуляції відповідно до енергетичного потенціалу ланки;
  - 4) змінювати методи розділення каналів БСДЧР — БСДЧР.

Розглянемо приймально-передавальну апаратуру на 12 стволів системи «Intelsat IV» (рис. 1.5).

Від приймальних антен  $A1$ ,  $A2$  через комутатори сигнал надходить до приймачів Пм1—Пм4 (із них два робочі, два резервні). Сигнали, прийняті в смузі 500 мГц, транспонуються з діапазону 6 ГГц у діапазон 4 ГГц. РНС та РПС складаються з шести смугових фільтрів зі смугою пропускання 36 МГц, рознесення центральних частот фільтрів — 40 МГц. Таким чином, між сусідніми стволами утворюється захисний інтервал 4 МГц. Далі включено основні й резервні підсилювачі на електронних лампах з біжучою хвилею (ЛБХ). Після суматорів встановлено локальні й глобальні антени для відповідних стволів. Основна вимога до бортової апаратури — висока надійність і мінімальні маса, розміри й споживана енергія.



**Рис. 1.5. Структурна схема бортової приймально-передавальної апаратури супутника системи «Intelsat IV»:**

РП – розв’язувальний пристрій; РПС – роздільник парних стволів;  
РНС – роздільник непарних стволів; К – комутатор

#### 1.4. Наземні станції супутникових систем передачі

Побудова НС ССЗ має багато подібного з побудовою станцій тропосферних радіорелейних ліній (РРЛ). В обох випадках використовують потужні підсилювачі

на виході передавачів, великі антени та малошумні вхідні підсилювачі приймачів. Тракт проміжної частоти, модулятори і демодулятори в супутникових системах передачі (ССП) не мають специфічних особливостей.

Розглянемо структурну схему типової НС. Далі (рис. 1.6) наведено спрощену структурну схему приймально-передавального комплексу НС. Такий комплекс забезпечує в кожному зі стволів приймання і передачу кольорового телевізійного (ТВ) сигналу, сигналів звукового супроводження телевізійних програм, радіомовлення, передачу телефонних сигналів із БСД. Сигнал від супутника через з'єднання, що здатні обертатись (ЗО), поляризаційний блок (БП) (сигнал має колову поляризацію), де він перетворюється на сигнал із лінійною поляризацією, і далі через блок фільтрів (БФ) надходить на багатокаскадні параметричні підсилювачі (БПП). Для забезпечення можливості роботи будь-якого ствола в режимі передачі сигналів телефонії та телебачення встановлюють перемикачі. У схемі є 4 перетворювачі частоти разом із підсилювачем проміжної частоти (ППЧ), де частота сигналу перетворюється на сигнал проміжної частоти (ПЧ) 70 мГц. Потім сигнал ТВ ствола потрапляє на свій демодулятор ЧМ (Дм ТВ) і кінцеве обладнання. Сигнали телефонного (ТЛФ) ствола через свій Дм потрапляють на обладнання БСДЧР. У разі передачі сигнал через Мд ТВ, потужний ППЧ та перетворювач надходить на прикінцевий каскад підсилювача потужності. За допомогою перемикача до хвилеводу через фільтр гармонік (ФГ) і міст складання (МС) може бути підключене або основне, або резервне обладнання. У випадку передачі багатоканальних телефонних сигналів від апаратури БСДЧР сигнал надходить на свій Мд ТЛФ і далі все відбувається аналогічно до передачі в телевізійному стволі.

Для прикінцевих каскадів передавачів ( $P_B \approx 10$  кВт) використовують клістроли або ЛБХ. Найбільшого поширення в НС ССП набули дводзеркальні антени з діаметром дзеркала 2,5—32 м, з коефіцієнтом підсилення  $G=60$  дБ.

Антену НС монтують на опорно-поворотному механізмі (азимутально-кутомісцевого типу). До фідерного тракту антени НС існують специфічні вимоги:

- наявність декількох стволів;
- високий рівень передавальної потужності;
- малий рівень сигналу приймача;
- необхідність повертання антени.

Антенно-фідерний тракт має три ланки: сумісну, приймальну і передавальну. Важливою особливістю антени НС є забезпечення автоматичного слідкування за супутником. Зрозуміло, що ширина діаграми спрямованості (ШДС) антени НС, як правило, мала. Так, у антені з діаметром 12 м на частоті 6 ГГц (частота передачі) ШДС на рівні 3 дБ становить 16 кутових мінут. Вважають, що відхилення осі діаграми спрямованості (ДС) антени від напрямку на супутник не повинно перевищувати десятої частки ШДС на рівні 3 дБ за потужністю, тобто точність наведення повинна становити 1,6 кутової мінути. Для забезпечення такої точності необхідно застосовувати відповідні способи наведення антен:

- ручне (резервний спосіб);
- програмне з ручною корекцією;
- автоматичне супроводження супутника.

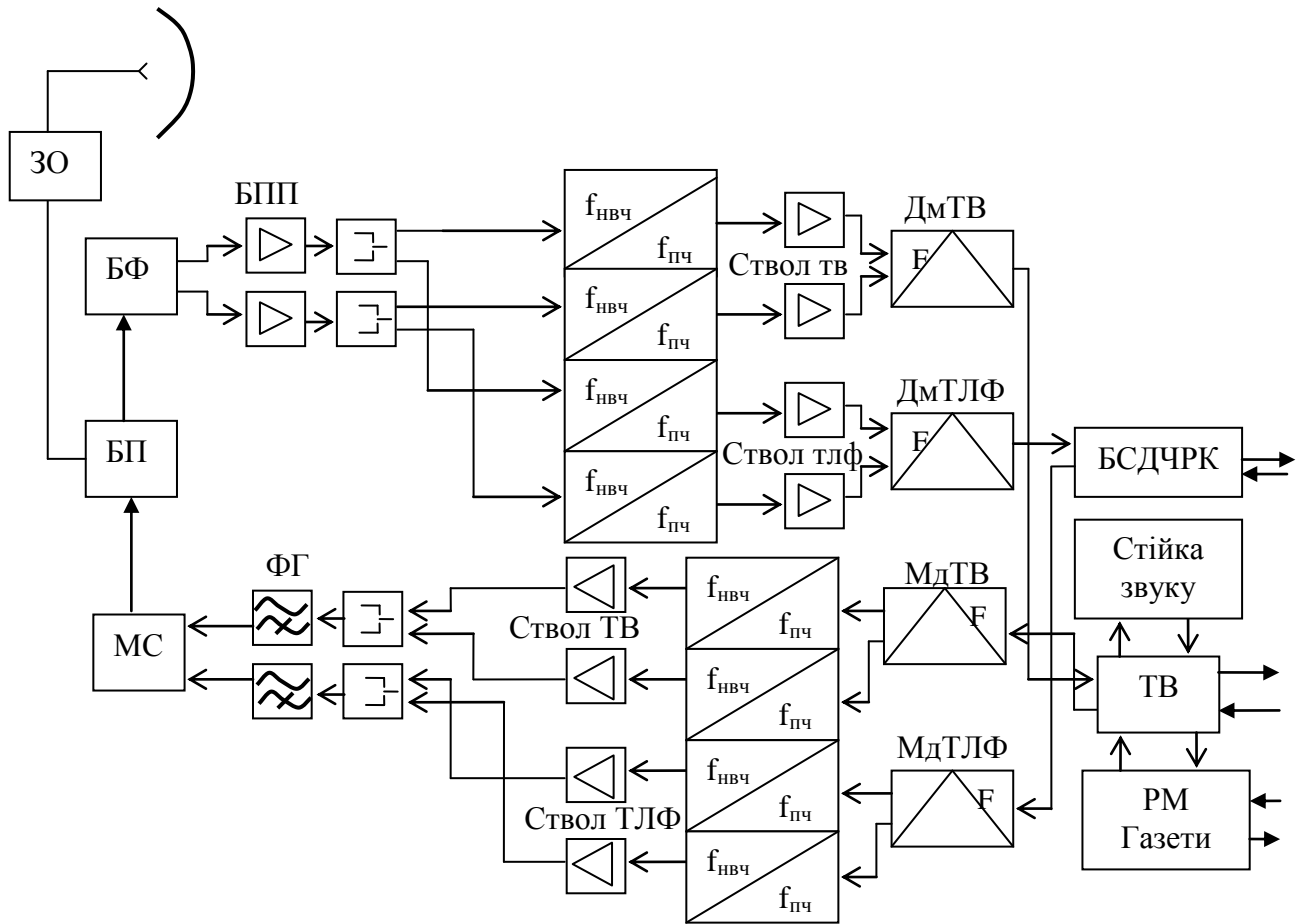


Рис. 1.6. Спрощена структурна схема передавально-приймального комплексу НС ССЗ

Пристрій програмного наведення (ППН) може бути двох типів: з автономним та централізованим розрахунком кутів наведення. Пристрій першого типу має спеціалізовану ЕОМ, яка за введеними даними розраховує кути наведення в реальному масштабі часу. У пристрої другого типу центральна НС має швидкодіючу ЕОМ, яка централізовано розраховує кути наведення для кожної НС системи. ЕОМ, як правило, розраховує *опорні точки*. Далі відбувається операція інтерполяції траєкторії. Режим автоматичного супроводження може бути реалізований за сигналом спеціального маяка (монохроматичним сигналом супутника), або за інформаційним сигналом. У випадку другого пристрою апаратура НС простіша.

Автоматичне супроводження можна реалізувати на основі *конічного сканування* (моноімпульсний сумарно-різницевий метод) або за допомогою *екстремального автомата*. Керувальною дією для такої системи (рис. 1.7) є кут неузгодження  $\alpha$ . Сигнал, прийнятий від супутника, буде промодульований за амплітудою. Частота обвідної буде дорівнювати частоті обертання променя. Глибина модуляції залежатиме від форми променя, кута перетину променів і кута неузгодження  $\alpha$ . Таким чином, значення  $\alpha$  пов'язане з глибиною амплітудної модуляції, а знак відхилення – із фазою обвідної. Опорний генератор (Г) дає частоту, що дорівнює швидкості обертання (частоті обертання променя). Суть роботи екстремального автомата полягає в тому, що промінь діаграми спрямованості переміщу-

ється дискретно з невеликим «кроком». Зміна знака різниці рівнів сигналу до й після «кроку» дозволяє визначити положення, що відповідає максимуму сигналу. Таку систему використовують в основному в разі роботи з геостационарним супутником.

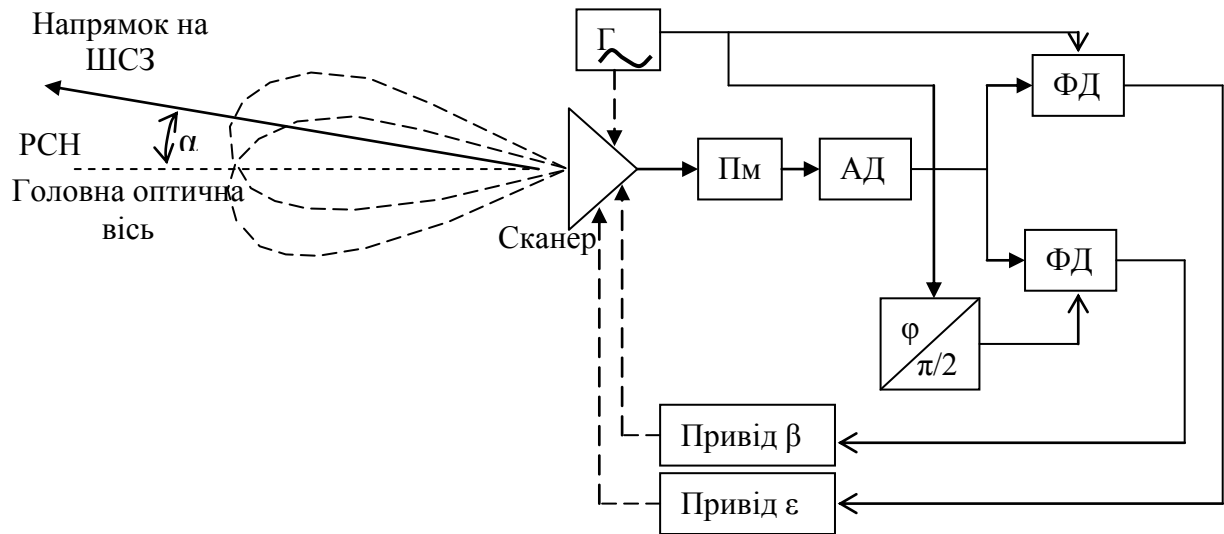


Рис. 1.7. Структурна схема системи автоматичного супроводження на основі кінцевого сканування

## 1.5. Основні параметри сигналів і шумів на вході приймальних пристроїв

### 1.5.1. Сигнал на вході приймального пристрою

Якщо дальність до ШСЗ позначимо  $R$ , будемо вважати, що передавач (Пд) і приймач (Пм), з'єднані з антеною фідерами  $\ell_{Пд}$  і  $\ell_{Пм}$ , які мають ККД  $\eta_{пд}$  і  $\eta_{пм}$ , то потужність сигналу на вході приймача можна подати у такому вигляді:

$$P_{Cвх} = \frac{P_{пд} G_{пд} G_{пм} \eta_{пд} \eta_{пм} V^2(t)}{A_{\Sigma} A_{пд} A_{пм}} \cdot K_{пол}, \quad (1.3)$$

де  $A_{\Sigma}$  – сумарне послаблення сигналу на трасі поширення радіосигналу;

$V(t)$  – множник послаблення, значення якого не перевищує заданого протягом певного відсотка часу (% T);

$A_{пд}, A_{пм}$  – згасання сигналу у фільтрах між антеною і входом (виходом) Пд і Пм;

$K_{пол}$  – величина поляризаційних втрат (ефект Фарадея);

$P_{пд} G_{пд} \eta_{пд}$  – ефективно випромінювана потужність відносно ізотропного випромінювача.

Отже, слід визначити  $A_{\Sigma}$ ;  $V^2(t)$ ;  $K_{пол}$ .

$$A_{\Sigma} = A_0 A_a(\varepsilon), \quad (1.4)$$

де  $A_0$  – послаблення сигналу у вільному просторі;

$A_a(\varepsilon)$  – послаблення сигналу в атмосфері за кута місця  $\varepsilon$ .



Відомо, що  $A_o = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2$ . Для визначення  $A_a(\varepsilon)$  можна застосувати частотну характеристику згасання в атмосфері.

$$V^2(t) = 10^{-0,1a_g R_g}, \quad (1.5)$$

де  $a_g$  – погонне послаблення (дБ) на відстані 1 км;  
 $R_g$  – відстань, на якій спостерігають дощ (сніг).

$K_{пол} = (0 - 1)$ , за умов використання для передачі та приймання антен з однаковою поляризацією можна отримати  $K_{пол} = 1$ . Якщо поляризація для значень  $A_{нд}$  і  $A_{нм}$  ортогональна,  $K_{пол} = 0$ . Якщо одна антена має колову поляризацію, а інша – лінійну,  $K_{пол} = 0,5$  (має місце втрата потужності в 2 рази).

### 1.5.2. Шуми на вході приймальних пристроїв

Відомо, що приймачі ССЗ повинні мати значно менший рівень шумів, ніж приймачі РРСП. Сумарний шум на вході приймача можна знайти за формулою

$$P_{ш\Sigma} = P_{мех} + P_{ф} + P_A \eta + P_{к} \eta \quad (1.6)$$

де  $P_{мех}$  – потужність власних шумів;

$P_{ф}$  – потужність шумів фідерів;

$P_A$  – потужність шумів антени, у тому числі теплових шумів атмосфери Землі;

$\eta$  – ККД фідера й фільтрів;

$P_{к}$  – космічні шуми.

Враховуючи, що потужність шумів пов'язана з еквівалентною шумовою температурою  $T_e$  виразом

$$P_{ш} = k T_e \Pi_e, \quad (1.7)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

$\Pi_e$  – ширина смуги пропускання приймача.

Вираз (1.6) можна записати як

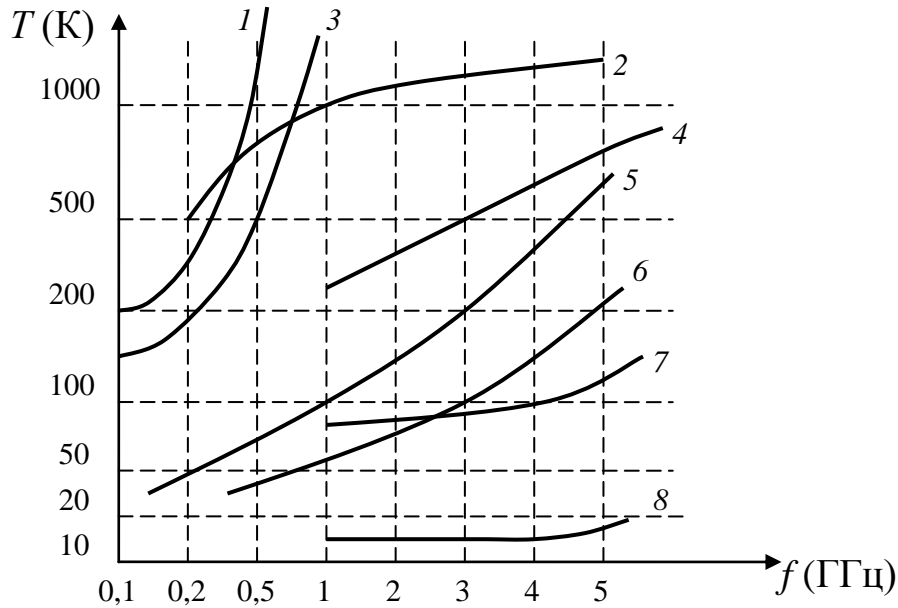
$$T_{ш\Sigma} = T_{епр} + T_{еф} + (T_{еА} + T_{ек}) \eta, \quad (1.8)$$

де  $T_{епр}$  – еквівалентна шумова температура приймача;

$T_{еф}$  – еквівалентна шумова температура фідера;

$T_{еА}$ ,  $T_{ек}$  – еквівалентна шумова температура антени та космосу відповідно.

Відомо, що еквівалентну шумову температуру приймача і коефіцієнт шуму приймача визначають в основному параметри вхідних каскадів приймача (рис. 1.8).



**Рис. 1.8. Орієнтовні значення шумової температури різних типів вхідних каскадів:**

1 – транзисторний підсилювач; 2 – діодний змішувач; 3 – електронна лампа; 4 – ЛБХ; 5 – параметричний підсилювач без охолодження; 6 – параметричний підсилювач з охолодженням рідким азотом; 7 – квантовий підсилювач без охолодження; 8 – квантовий підсилювач з охолодженням рідким гелієм

Супутникова лінія передачі має 2 інтервали і її розрахунок аналогічний до розрахунків РРЛ, що має два прорізи. Але слід звернути увагу на особливості апаратури для інтервалу траси «вгору» і «вниз» і відповідно різні енергетичні потенціали та рівні шумів на цих інтервалах. Отже, потужність сигналу на вході приймача  $P_c$  пов'язана з потужністю передавача  $P_{nd}$ :

$$P_c = P_{nd} \frac{G_{nd} G_{nm}}{L_{nd} L_{nm}} \cdot \frac{1}{V_0 V}, \quad (1.9)$$

де  $L_{nd}$ ,  $L_{nm}$  – згасання в трактах Пд і Пм (хвилеводи, феритові вентиля і т.д.);

$V_0 = \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$  – послаблення енергії у вільному просторі;

$V$  – множник послаблення, що враховує всі інші втрати.

Поділивши обидві частини виразу (1.9) на потужність шумів, що діють на вході приймача, отримаємо вираз

$$\left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{ex} = P_{nd} \frac{G_{nd} G_{nm}}{L_{nd} L_{nm}} \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \frac{1}{k T_{ш\Sigma}} \frac{1}{\Pi_{ш}} \frac{1}{V}. \quad (1.10)$$

Лінія зв'язку має ділянки «вниз» та «вгору», але відношення сигнал/шум додавати не можна. Сукупну характеристику траси можна отримати шляхом додавання шумів на цих ділянках:

$$\left( \frac{P_{ш}}{P_c} \right)_{\Sigma} = \left( \frac{P_{ш}}{P_c} \right)_{3-C} + \left( \frac{P_{ш}}{P_c} \right)_{C-3},$$

де відповідно

$$\left(\frac{P_{uu}}{P_c}\right)_{3-C} = \frac{(4\pi)^2 r_{(3-C)}^2 L_{nd(3-C)} L_{nm(3-C)} k T_{\Sigma} C_{u3} V_{(3-C)}}{P_{nd} G_{nd3} G_{nm3} \lambda_{(3-C)}^2}; \quad (1.11)$$

$$\left(\frac{P_{uu}}{P_c}\right)_{3-C} = \frac{(4\pi)^2 r_{(3-C)}^2 L_{ndC} L_{nm3} k T_{3\Sigma} C_{u3} V_{3-C}}{P_{ndC} G_{ndC} G_{nm3} \lambda_{C-3}^2}; \quad (1.12)$$

Далі для аналізу можна взяти

$$r_{C-3} = r_{3-C}; \quad L_{nd3} = L_{nm3} = L_3; \quad L_{ndc} = L_{nmc} = L_c;$$

Шумову смугу  $C_{u3}$  визначають за смугою пропускання приймача НС, тобто

$$C_{u3} = C_{u3}; \quad V_{3-C} = V_{C-3} = 1.$$

Якщо додати вирази (1.11) і (1.12) і врахувати вище названі особливості, а також відповідні визначення, такі як

$$E_3 = P_{nd} G_{nd} - \text{еквівалентна ізотропна випромінювана потужність};$$

$$D_3 = \frac{G_{nm}}{T_{u\Sigma}} - \text{добротність приймальної системи, одержимо вираз}$$

$$\left(\frac{P_{uu}}{P_c}\right)_{\Sigma} \approx 16\pi^2 r^2 L_3 L_c k C_{u3} \left( \frac{1}{E_3 D_c \lambda_{3-C}^2} + \frac{1}{E_c D_3 \lambda_{C-3}^2} \right). \quad (1.13)$$

З наведеного випливає, що необхідних енергетичних параметрів лінії можна досягнути за рахунок покращення параметрів НС, оскільки  $\frac{P_{uu}}{P_c}$  визначає добуток  $E_3 D_c$  («вгору») або  $E_c D_3$  («вниз»), які повинні бути якомога більші. Але оскільки добротність супутника  $D_c$  не може бути велика, то збільшення  $E_3 D_c$  досягають за рахунок НС ( $E_3$ ). Крім того, у супутника  $E_c$  порівняно мала, тому збільшити  $E_c D_3$  можна збільшивши добротність приймального тракту НС.

### 1.5.3. Особливості структурних схем бортового ретранслятора

БР – пристрій, встановлений на супутнику і призначений для приймання сигналів від НС (однієї чи декількох), їх підсилення і подальшої передачі в напрямку іншої НС. БР і пов'язані з ним антени є основною частиною ССП. Найбільшого поширення набули багатоствольні БР. За будовою схеми одного ствола БР поділяють: на гетеродинні; з однократним перетворенням частоти; з обробкою сигналу на борту. Гетеродинні схеми найбільш застосовувані. Смуга пропускання дорівнює приблизно 40 МГц, основне підсилення в тракці ПЧ  $f_{пч}=70—120$  МГц. У таких БР зазвичай відбувається два перетворення частоти: знижувальне і підвищувальне.

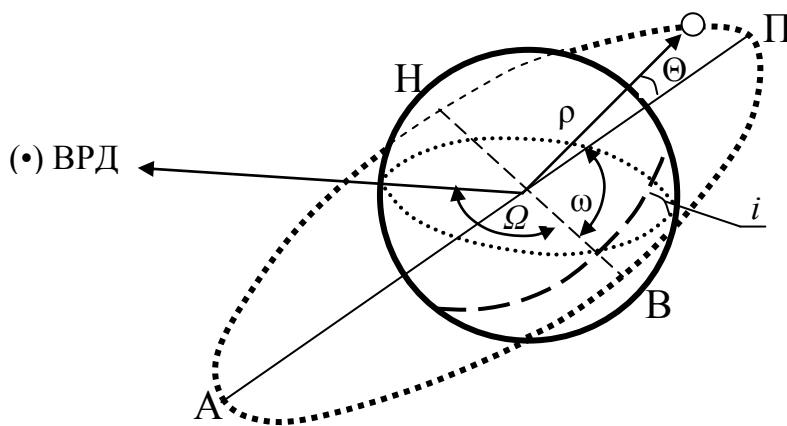
За другим типом схеми (з однократним перетворенням) спектр сигналу переноситься в область частот сигналів, що передаються на Землю. Переваги цієї схеми — простота, надійність і відносно великий ККД. Але є труднощі технічної реалізації, пов'язані з необхідністю отримання значного підсилення на одній із частот у діапазоні НВЧ.

Третій тип схеми застосовують у цифрових ССЗ. Сигнал може бути повністю демодульований і регенерований. Вибір і розробка БР пов'язані з умовами експлуатації у відкритому космосі. У ході проектування обов'язковими є такі вимоги: тривалий термін експлуатації (надійність, мінімальна потужність споживання), як наслідок, високий ККД. Основні параметри, що характеризують рух ШСЗ, можна визначити за допомогою законів Кеплера (рис. 1.9).

*1-й закон:* орбіта супутника Землі лежить у нерухомій площині, що проходить через центр Землі і еліпс, в одному з фокусів якого знаходиться центр Землі.

*2-й закон:* радіус-вектор ШСЗ за рівні проміжки часу описує рівні площі.

*3-й закон:* відношення квадратів періодів обертання супутників дорівнює відношенню кубів великих півосей орбіт.



**Рис. 1.9. Основні параметри орбіти ШСЗ:**

П – перигей; А – апогей; АП – лінія апсид; В – висхідний вузол орбіти (точка, у якій орбіта перетинає площину екватора з південної півкулі в північну); Н – низхідний вузол орбіти (точка перетину площини екватора орбітою з північної півкулі в південну); ВН – лінія, що з'єднує висхідний та низхідний вузли (лінія вузлів);  $\Theta$  – справжня аномалія руху

Орієнтацію орбіти в просторі визначають за двома параметрами: 1) нахилом орбіти ( $i$ ) – кутом між площиною екватора і площиною орбіти; 2) прямим збільшенням вихідного кута  $\Omega$  – кута між напрямком на точку весняного рівнодення (ВРД) (сузір'я Овен) та напрямком на вихідний вузол (В), який відраховують у площині екватора проти годинникової стрілки. Положення орбіти в її площині залежить від аргументу перигею  $\omega$  – кутової відстані перигею від висхідного вузла, який відраховують у площині орбіти за напрямком руху ШСЗ.

Через ексцентриситет (рис. 1.10) визначають такі величини:

$$R_A = \frac{a}{(1+e)}; \quad R_{\Pi} = \frac{a}{(1-e)}.$$

Розглянемо окремий випадок – колову орбіту, коли  $e=0$ . Для ШСЗ, що буде рухатись по такій орбіті, відцентрова сила і сила тяжіння будуть однакові, тобто

$$m_c V_c^2 / (R + H_c) = K_2 M_3 m_c / (R + H_c)^2,$$

де  $m_c$  – маса супутника;

$V_c$  – швидкість руху супутника;

$H_c$  – висота орбіти;  
 $R$  – радіус Землі;  
 $M_3$  – маса Землі;  
 $K_r$  – гравітаційна стала.

Тоді з попереднього виразу випливає, що

$$V_c = \sqrt{K_2 M_3 / (R + H_c)}.$$

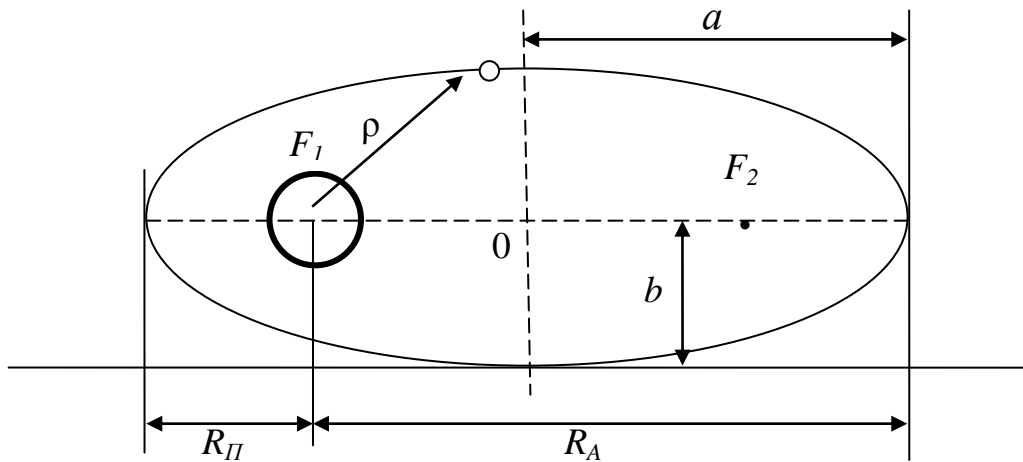
Отже, період обертання за коловою орбітою знайдемо за таким виразом:

$$T_k = 2\pi(R + H_c) / V_c = 2\pi \sqrt{(R + H_c)^3 / K_2 M_3}.$$

Аналогічні результати можна отримати на основі 3-го закону Кеплера. Якщо в останній вираз підставимо числові значення  $K_2$  і  $M_3$ , то одержимо формулу

$$T_k = 1,66 \cdot 10^{-4} \sqrt{(R + H_c)^3}.$$

За нею знайдемо так званий сидеричний або зоряний період обертання, оскільки він не залежить від руху супутника відносно Землі. Таким чином, можна визначити  $H_c$ : коли  $T=24$  год,  $H_c=35800$  км. Екваторіальну колову орбіту висотою 35 800 км за умови напрямку руху, що збігається з напрямком обертання Землі, називають геостаціонарною.



**Рис. 1.10. Параметри орбіти ШСЗ у її площині (вигляд зверху):**  
 $F_1$  та  $F_2$  – фокуси еліпса (орбіти);  $F_1F_2$  – фокусна відстань;  
 $a$  і  $b$  – відповідно велика та мала півосі еліпса;  $\rho$  – радіус-вектор  
 ШСЗ;  $e = \frac{F_1F_2}{2a}$  – ексцентриситет орбіти, що характеризує її фор-  
 му

## 2. СИСТЕМИ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 2.1. Загальні принципи побудови систем стільникового зв'язку

Останні роки ознаменувалися значним поширенням цифрових мереж рухомого радіозв'язку (ЦМРР) і розвитком великої кількості стандартів і технологій. Усю історію розвитку мереж рухомого зв'язку прийнято поділяти на етапи (покоління) (табл. 2.1). До першого покоління (1G) належать аналогові стандарти з частотною модуляцією мовного сигналу (NMT-450, NMT-900, AMPS і т.д.). У цих стандартах застосовували БСДЧР (FDMA). Для стандартів другого покоління (2G) характерні цифрові методи формування, передачі та обробки сигналів (GSM, ADC (D-AMPS), JDC, CDMA-IS-95). Для реалізації багатостанційного доступу в таких стандартах застосовують часово-частотне та кодове розділення каналів (TDMA-FDMA; CDMA). Нарешті на зміну 2G прийшов універсальний стандарт 3-го покоління — 3G [6; 10]. Найбільш вдало розвиваються технології, пов'язані зі стандартом GSM. Сьогоднішня відзначена боротьбою відомих компаній у сфері надання телекомунікаційних послуг за право впровадження стандарту нового покоління на території України.

Першу комерційну мережу стандарту GSM розгорнули в Німеччині у 1992 р. Система була орієнтована на використання смуги частот  $2 \times 25$  МГц у діапазоні 890—915 МГц і 935—960 МГц. Але в 1990 р. у специфікацію GSM було введено пакет рекомендацій, який визначав принципи застосування стандарту в діапазоні частот 1800 МГц. У результаті цього створено стандарт DCS-1800. Стандарт GSM визнали глобальним після того, як його версію в діапазоні 1900 МГц прийняли в США як один зі стандартів персонального зв'язку, що отримав назву PCS-1900. За своїми характеристиками стандарти DCS-1800 та PCS-1900 абсолютно однакові й відповідають принципам побудови GSM. На території Північної Америки в той же час розробляли власний стандарт рухомого зв'язку. Першим офіційно прийнятим стандартом стільникового, але аналогового (дуже схожого на європейський NMT-450, NMT-900) зв'язку був стандарт AMPS, який зайняв смуги частот 869—894 МГц та 824—849 МГц для зв'язку в обох напрямках із дуплексним рознесенням 45 МГц. Швидке зростання попиту на послуги рухомого зв'язку спонукало розробників стандарту проводити швидку модернізацію в умовах обмеженого частотного ресурсу. У таких умовах було введено в експлуатацію цифровий стандарт, який не виходив за межі виділеного частотного діапазону і, більше того, мав загальні канали керування з аналоговим стандартом. Перехід до цифрового стандарту було зроблено шляхом часового ущільнення й послідовного використання одного частотного каналу трьома незалежними абонентами. Цей стандарт отримав назву D-AMPS. Отже, у наш час існують як аналогові, так і цифрові стільникові системи мобільного зв'язку. Але, без сумнівів, можна стверджувати, що цифрові стандарти розвиваються дуже швидко. Тому основну увагу далі приділимо цифровим стандартам D-AMPS, GSM, CDMA.

Стандарти третього покоління — американський IMT2000-МС, що являє со-

бою вдосконалений CDMA 2000, європейський IMT2000-МС, більш відомий як UMTS, розроблений із метою органічного розвитку мереж GSM, — дозволили забезпечити надання різноманітних послуг, недоступних у традиційних мережах другого покоління. Основні стандарти, що активно розвиваються починаючи із часів 2-го покоління й донині, є стандарти на основі GSM й CDMA. З тих пір протягом двох поколінь мережі мобільного зв'язку постійно еволюціонували. Було введено нові додаткові стандарти, які дозволяли збільшити ємність мережі й поліпшити якість обслуговування (табл. 2.1). Основною ж відмінною ознакою мереж мобільного зв'язку 2G і 3G стала можливість передавати не тільки голос, а й дані. Кожен новий стандарт передбачає збільшення пропускну здатності каналів передачі даних, організованих на базі вже існуючих мереж, які початково були орієнтовані на передачу голосу. Донедавна фахівцям хоч із великими зусиллями, але вдавалося встигати за швидко зростаючими потребами ринку мобільного зв'язку в більших обсягах і швидкостях передачі даних. Однак було зрозуміло, що прагнення підтримати сумісність стандартів попередніх поколінь із новими помітно уповільнює подальший розвиток, який у сфері мобільного зв'язку полягає в розробці та впровадженні стандартів четвертого покоління (4G), що забезпечать ще більші швидкості передачі даних (як наслідок — підвищення якості пропонованих послуг) за загального зниження витрат в експлуатації телекомунікаційного устаткування. У результаті цього на стику 3-го й 4-го поколінь відбувся своєрідний розкол співтовариства операторів мобільного зв'язку. Одна їх частина продовжила роботу над створенням удосконалених стандартів на основі GSM і CDMA, у той час як інша перейшла до розробки та впровадження принципово нових. Обговорювати мобільний зв'язок 4G і 5G, можливо, передчасно. Мережі Mobile WiMax [3] і LTE [2; 16] насправді не відповідають вимогам технологій 4G, згідно з якими вони повинні досягати швидкості 100 Мб/с на мобільному і 1 Гбіт/с на стаціонарних пристроях. Із тих пір як з'явився 5G, вважають, що швидкість мережі повинна бути ще вища. Але наскільки вища, досі навіть не зазначено. Максимальна швидкість завантаження за технологією WiMax і LTE — 128 Мб/с і 100 Мбіт/с, що значно менше за 1 Гбіт/с і буде досягнуто LTE Advanced — технологією 4G. Як уже було вказано, немає жодних встановлених норм щодо 5G мереж, але відомо, що на зміну НС для користування мережами 2G прийдуть стратосферні станції HAPS (High Altitude Stratospheric Platform Stations). Вони являють собою повітряні судна, які перебувають у стаціонарному положенні на відстані близько 17—22 км від поверхні Землі й працюють як супутники, що виконують функцію покриття зв'язку. Ці станції забезпечать прямий канал для сигналу і зменшать перешкоди, створювані високими спорудами. Також за рахунок висоти базові станції можуть покривати більшу територію, зменшуючи таким чином проблеми поширення сигналу, якщо немає перешкод.

Таблиця 2.1. Еволюція систем мобільного стільникового зв'язку

Система	Рік	Коротка характеристика
Покоління 0G		
MTS	1946	Мобільний телефонний зв'язок (Mobile Telephone Service). Система півдуплексного радіозв'язку операторського класу із забезпеченням виходу в PSTN (до 25 каналів, діапазон частот близько 150 МГц)
AMTS	1965	Передова мобільна телефонна система зв'язку (Advanced Mobile Telephone System) являє собою портативну систему дуплексного радіозв'язку, поширеного в Японії (діапазон частот близько 900 МГц)
IMTS	1969	Удосконалена система мобільного телефонного зв'язку (Improved Mobile Telephone Service) — дводіпазонна система дуплексного зв'язку із забезпеченням виходу в PSTN (до 9 каналів у діапазоні 35—44 МГц, до 11 каналів у діапазоні 152—158 МГц, до 12 каналів у діапазоні 454—460 МГц; радіус зони обслуговування 60—100 км)
Покоління 0,5G		
PALM	1971	Public Automated Land Mobile — автоматизована наземна мережа мобільного зв'язку із виходом в PSTN. Перша система, у якій застосовано цифрові сигнали для передачі керувальних повідомлень і аналогові сигнали для передачі голосу
ARP	1971	AutoRadioPuhelin — система автомобільного півдуплексного (пізніше повнодуплексного) радіозв'язку операторського класу з радіусом зони обслуговування до 30 км (до 80 каналів у діапазоні частот 150 МГц)
Покоління 1G		
NMT	1979	Nordic Mobile Telephone — скандинавська дводіпазонна аналогова система мобільного стільникового телефонного радіозв'язку операторського класу, орієнтована на покриття великих територій (ширина каналу — 12,5 кГц, робочий діапазон частот близько 450 МГц і 900 МГц)
AMPS	1981	Advanced Mobile Telephone System — удосконалена рухома система мобільного зв'язку в діапазоні частот від 825 до 890 МГц (більше 600 дуплексних каналів, ширина каналу — 30 кГц, потужність передавача БС — 45 Вт, потужність передавача автомобільної рухомої станції — 12 Вт, потужність передавача переносного апарата — 1 Вт)
TACS	1983	Total Access Communication Systems — аналогова система радіозв'язку загального користування в частотному діапазоні близько 900 МГц, ширина каналу — 25 кГц
Hicap	1985	Система мобільного стільникового радіозв'язку — удосконалена версія системи NTT (Nippon Telegraph and Telephone, Японія)
Mobitex	1988	Національна мережа бездротової передачі даних — система передачі даних із загальним доступом, що включає мережеву службу двостороннього пейджингового зв'язку (ширина каналу 12,5 кГц)
DataTac	1990	Дводіпазонна система бездротової передачі даних (ширина каналу — 25 кГц, діапазони частот 403—433 МГц і 806—870 МГц, пропускна здатність — 19,2 кбіт/с)
Покоління 2G		
PHS	1990	Personal Handy-phone System — система радіозв'язку, заснована на використанні портативних телефонів (TDMA-TDD, діапазон частот — 1880—1930 МГц, швидкість передачі даних — до 32 кбіт/с)
GSM	1991	Global System for Mobile Communications — чотиридіпазонна глобальна система мобільного стільникового зв'язку (TDMA; діапазони частот: 850 МГц, 900 МГц, 1800 МГц і 1900 МГц; модуляція GMSK, ширина каналу — 200 кГц)
Digital-AMPS	1991	Цифровий варіант аналогової системи AMPS (FDMA, діапазон — 825—890 МГц, модуляція — $\pi/4$ -DQPSK, ширина каналу — 30 кГц)



Закінчення табл. 2.1

Система	Рік	Коротка характеристика
PDC	1992	Personal Digital Cellular — стандарт персонального цифрового стільникового зв'язку (TDMA, діапазон частот — 800 МГц, ширина каналу — 25 кГц). Застосований тільки в Японії
CDMAOne	1995	Перша система з CDMA-доступом і прямим розширенням спектра, відома як стандарт IS-95 або TIA-EIA-95 (CDMA, робочий діапазон частот близько 800 МГц, ширина каналу — 1,25 МГц, модуляція — BPSK/QPSK)
CSD	1997	Circuit Switched Data — технологія передачі даних з комутацією каналів, початково розроблена для систем GSM
Покоління 2,5G		
WIDEN	1996	Wideband integrated Dispatch Enhanced Network — широкопasmово інтегрована диспетчерська вдосконалена мережа (до 4 каналів по 25 кГц, пропускна здатність — 100 кбіт/с)
GPRS	2000	General Packet Radio System — удосконалена технологія пакетної передачі даних для систем GSM (ширина каналу — 200 кГц, максимальна пропускна здатність — 171,2 кбіт/с)
HSCSD	2000	High-Speed Circuit Switched Data — удосконалена технологія високошвидкісної передачі даних з комутацією каналів, сумісна з GSM. Максимальна швидкість передачі даних — 57,6 кбіт/с (якість вища, ніж у GPRS)
Покоління 2,75G		
CDMA2000	2000	Еволюційний варіант розвитку стандарту CDMAOne (швидкість передачі даних збільшено до 2,4 Мбіт/с, нараховує на сьогоднішній день кілька модифікацій (Revision))
EDGE	2003	Enhanced Data rates for GSM Evolution — удосконалена цифрова технологія передачі даних для систем мобільного зв'язку GSM (TDMA, модуляція 8-PSK, максимальна швидкість передачі даних до 384 кбіт/с, ширина каналу — 200 кГц)
Покоління 3G		
UMTS	1999	Universal Mobile Telecommunications System — універсальна система мобільного стільникового зв'язку технології W-CDMA (діапазони частот: близько 850 МГц, 1900 МГц, 2100 МГц; ширина каналу — 5 МГц, швидкість передачі даних — до 2 Мбіт/с)
IxEV-DO	2000	Удосконалена версія системи CDMA2000 (IS-856) (максимальна пропускна здатність «вниз» — 307 кбіт/с, максимальна пропускна здатність «вгору» — 153 кбіт/с)
FOMA	2001	Freedom of Mobile Multimedia Access — перший W-CDMA 3G сервіс японської торговельної марки NTT DoCoMo (W-CDMA/FDD, для смуг частот 1920—1980 МГц, 2110—2170 МГц)
GAN/UNA	2006	Generic access network — мережа загального доступу, раніше відома як неліцензований мобільний доступ. Забезпечує мобільні послуги GSM і GPRS у неліцензованих діапазонах частот
Покоління 3,5G		
HSDPA	2006	High-Speed Downlink Packet Access — удосконалена технологія високошвидкісної пакетної передачі даних «вниз» для систем W-CDMA (швидкість передачі даних — до 14,4 Мбіт/с)
Покоління 3,75G		
HSUPA	2007	High-Speed Uplink Packet Access — удосконалена технологія високошвидкісної пакетної передачі даних по лінії «вгору» для систем W-CDMA (швидкість передачі даних — до 5,76 Мбіт/с)
Покоління 4G		
Широке застосування технологій MIMO, MultiCarrier CDMA (MC-CDMA), WCDMA+, OFDMA, W-OFDMA, UWB і радіо, що програмно реконфігурується (Software Defined Radio), LTE Advanced		
Покоління 5G		

### 2.1.1. Характеристики систем стільникового зв'язку

Стандарти GSM і D-AMPS ґрунтуються на принципах частотно-часового розділення каналів [1; 5]. Стандарт CDMA заснований на нових технологіях кодового розділення. В Україні оператори CDMA надають послуги фіксованого доступу (аналог домашнього телефону). Основні виробники відповідного обладнання для різних операторів зв'язку наведені далі (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Основні виробники телефонного обладнання

Оператори зв'язку	Базові станції	Комутатори	Радіорелейне обладнання
UMC (NMT)	Hansdonn	Nokia	Nokia
UMC (GSM)	Siemens	Siemens	Nokia, Ericsson
KYIVSTAR (GSM)	Ericsson	Ericsson	Ericsson
Wellcom	Nortel	Nortel	Nortel
DCC	Ericsson	Ericsson	Ericsson

Система стільникового зв'язку побудована як сукупність стільників (чарунк), яка покриває обслуговувану територію (місто з приміськими районами) [11—13]. Чарунку зображують у вигляді правильного шестикутника (рис. 2.1).

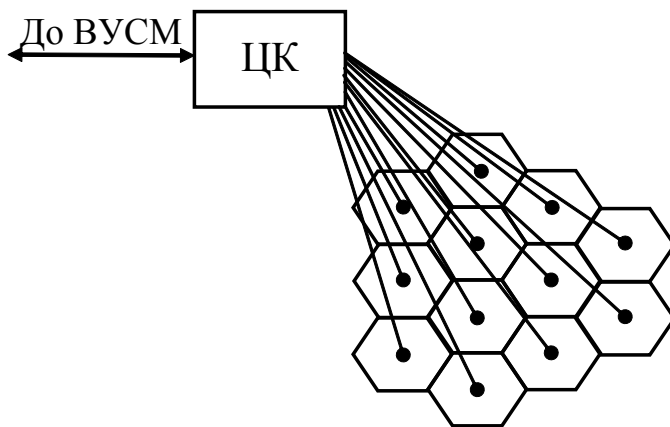


Рис. 2.1. Стільникова структура системи

Основний принцип стільникової системи — повторне використання частот, що визначає її високу ємність. У центрі кожної чарунки розташовані базові станції (БС), які обслуговують усі рухомі станції (мобільні телефони) в межах своєї чарунки. Чутливість БС лежить у межах 105—110 дБ, вихідна потужність становить 20—30 Вт. Стандартна БС має три спрямовані антени (три сектори по 120°), а БС, що обслуговує автошляхи, — дві антени для покриття тра-

си. Вхідні підсилювачі малошумні. Якщо абонент рухається з однієї чарунки в іншу, відбувається передача його обслуговування від БС до БС. Усі БС, у свою чергу, пов'язані з центром комутації (ЦК), із якого є вихід до взаємо-узгодженої стаціонарної мережі (ВУСМ). Чарунки ніколи не мають правильної форми. Межами чарунок є криві, які залежать від умов рельєфу місцевості та інших факторів. Більше того, межі чарунок взагалі чітко не визначені, і положення БС лише умовно збігається з геометричним центром стільника. Система БС (СБС) може мати більше ніж один ЦК (рис.2.2), що пов'язано з розвитком стільникової системи. У разі переходу абонента з однієї СБС в іншу виконується операція роумінгу, тобто передачі обслуговування у гостьовий реєстр іншого ЦК. Поняття СБС характерне тільки для стандарту GSM. У складі СБС (рис. 2.3) можна виділити: контролер БС (КБС); базову приймально-передавальну станцію (БППС); РС.

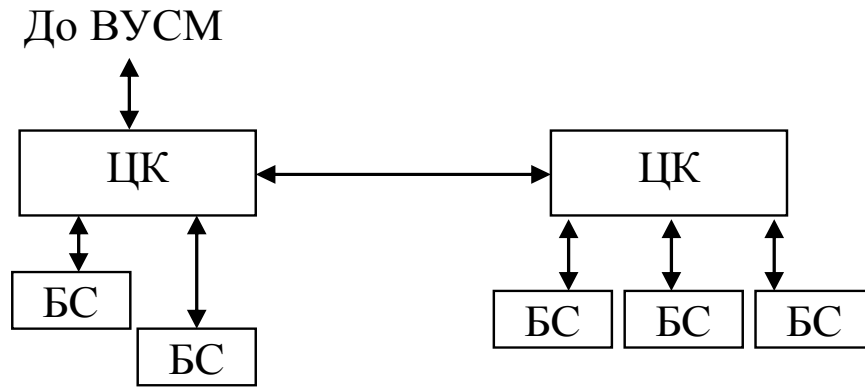


Рис. 2.2. Система стільникового зв'язку з двома ЦК

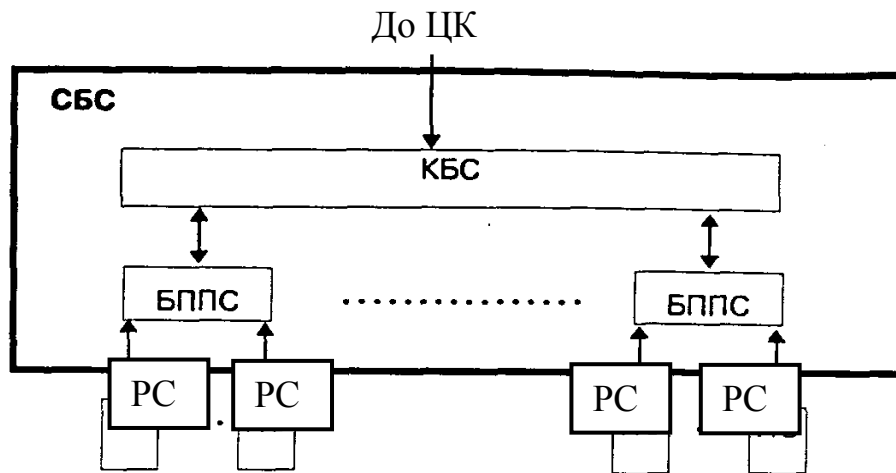


Рис. 2.3. БС стандарту GSM

### 2.1.2. Структурна схема мобільного телефону

Розглянемо блок-схему РС — мобільного телефону (рис. 2.4). До складу приймально-передавального блоку входять:

- кодер мови (Км), призначений для кодування сигналу мови з метою скорочення надмірності;
- кодер каналу (Кк), який додає в цифровий сигнал надлишкову інформацію для захисту від помилок (перешкодостійке кодування, операція перемішування та інформація керування);
- модулятор (Мд), що здійснює перенесення кодованого сигналу на несучу;
- еквалайзер (Екв), призначений для часткової компенсації викривлень сигналу, що виникають через багатопроменеве поширення (це адаптивний пристрій, що налагоджується за навчальною послідовністю символів (передається разом із мовною інформацією).

Кодер і декодер утворюють кодек РС. Зображена схема РС (рис.2.4) дуже спрощена, у ній відсутні: підсилювачі, селектори, генератори синхрочастот, схема контролю потужності, схема керування частотою, модуль ідентифікації абонента (Subscriber identity Module) — SIM-карта, детектор мовної активності (Voice Ac-

tivity Detector — VAD). Режим «закритої» передачі даних передбачає можливість встановлення у РС шифратора та дешифратора.

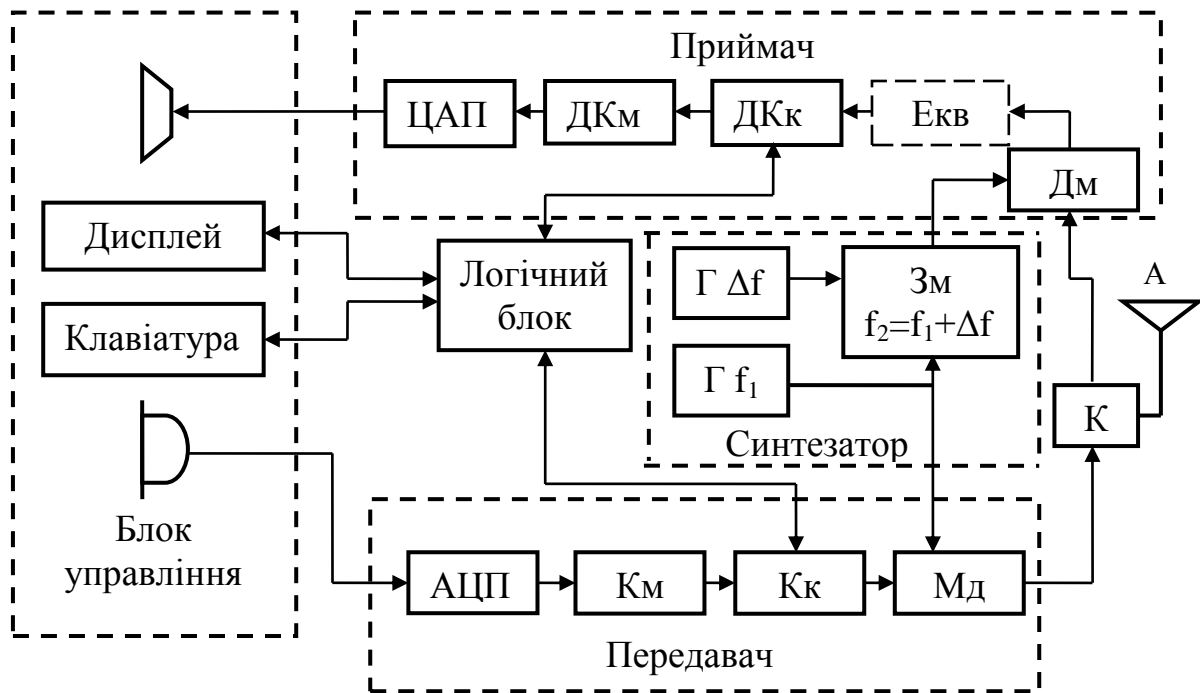


Рис. 2.4. Блок-схема РС:

А — антена; АЦП — аналогово-цифровий перетворювач; Г — генератор; ДКм — декодер мови; ДКк — декодер каналу; ЦАП — цифро-аналоговий перетворювач

### 2.1.3. Базова станція стільникової системи зв'язку

Елементи БС за призначенням майже не відрізняються від елементів РС. Першою особливістю БС є приймання інформації: рознесене в просторі та за частотою (рис. 2.5). Для приймання працюють дві антени, розміщені на відповідній відстані. Крім того, для передачі працює окрема антена.

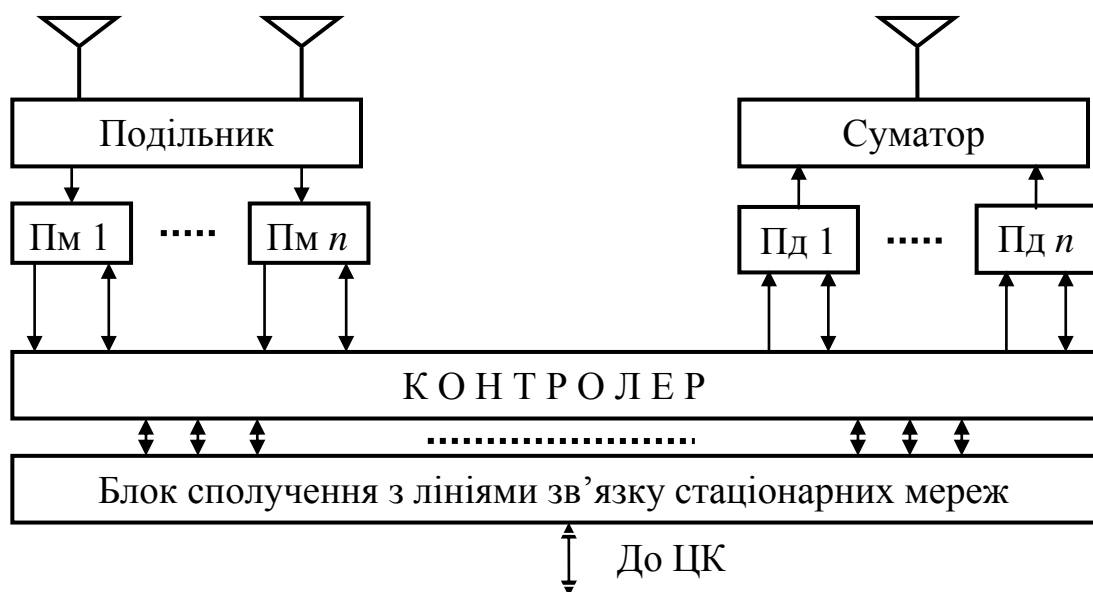


Рис. 2.5. Структурна схема БС

Другою особливістю структури БС є наявність декількох приймачів (Пм) і такої ж кількості передавачів (Пд), що дозволяє працювати на декількох каналах із різними частотами. Однойменні приймачі й передавачі оснащені загальними опорними генераторами, які забезпечують їх узгоджену перестройку під час переходу з каналу на канал. Конкретна кількість комплектів приймально-передавальної апаратури залежить від конструкції і комплектації БС. Блок сполучення БС — це потужний і сучасний комп'ютер, за допомогою якого керують роботою БС і контролюють дієздатність її елементів, блоків, вузлів. Надійності досягають резервуванням елементів і вузлів, використанням автономних джерел живлення, пристроїв охолодження.

#### 2.1.4. Центр комутації

ЦК — це диспетчерський пункт, у який надходять потоки інформації від усіх БС, і через який забезпечується зв'язок із іншими мережами, зокрема зі стаціонарною телефонною мережею та системою супутникового зв'язку. ЦК — це багатопроцесорна система керування (рис. 2.6).

Комутатор здійснює комутацію потоків інформації між відповідними лініями зв'язку. Він може направити потік інформації від однієї БС до іншої чи від БС до стаціонарної мережі або навпаки, від стаціонарної мережі до відповідної БС. Комутатор підключений до ліній зв'язку через відповідні контролери, які здійснюють попередню обробку (упаковку, буферне зберігання). Функцію загального керування виконує центральний контролер, який має потужне математичне забезпечення (software). Робота центру можлива за активної участі операторів, у зв'язку з чим передбачені відповідні термінали. Так, оператори вводять дані про абонентів і умови їх обслуговування, первинні дані за режимами роботи системи; за необхідності видають команди.

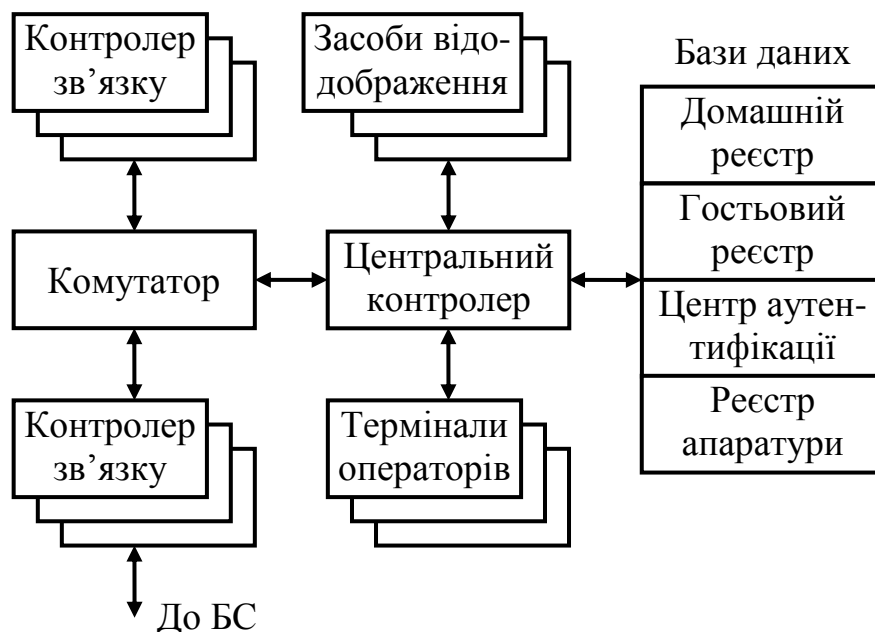


Рис. 2.6. Структура центру комутації

Найважливіші елементи системи — такі бази даних:

- домашній реєстр (Home location Register, HLR) — відомості про всіх абонентів, зареєстрованих у даній системі, й про види послуг, які вони можуть отримати, місцеположення абонента для організації його виклику, реєстрація фактично наданих послуг;
- гостьовий реєстр (Visitor Location Register VLR) — приблизно такі ж відомості, як у домашньому реєстрі, але про абонентів, які перебувають в «гостях» (ромерах);
- центр аутентифікації (Authentication Center), що забезпечує процедури аутентифікації (встановлення прав абонента на використання мобільної мережі);
- реєстр апаратури (реєстр ідентифікації апаратури (Equipment identity Register) — відомості про РС, що знаходяться в експлуатації, на предмет їх справності та санкціонованого використання).

## 2.2. Ефірний інтерфейс системи стільникового зв'язку

### 2.2.1. Інтерфейси та їх стандартизація

У кожному стандарті стільникового зв'язку (СЗ) використовують декілька інтерфейсів, у загальному випадку різних у різних стандартах. Так, існують відповідні інтерфейси для організації обміну інформацією:

- між РС і БС;
- БС і ЦК;
- приймально-передавальною апаратурою та контролером БС;
- ЦК та домашнім реєстром;
- ЦК та гостьовим реєстром;
- ЦК та реєстром апаратури;
- ЦК та стаціонарною телефонною мережею.

Зрозуміло, що всі інтерфейси повинні бути стандартизовані для забезпечення сумісності апаратури різних фірм-виробників. У деяких випадках фірми-виробники використовують вже існуючі стандартні інтерфейси (протокол обміну в цифрових інформаційних мережах). Найбільш важливий є ефірний інтерфейс, за допомогою якого відбувається обмін між РС та БС (Air interface). Ефірні інтерфейси обов'язково застосовують у будь-якій системі СЗ, за будь-якої її конфігурації та в єдиному, можливому для відповідного стандарту, варіанті. Це дозволяє РС і БС будь-яких фірм-виробників успішно працювати сумісно, що дуже зручно для компаній-операторів, оскільки в іншому випадку була б неможлива операція роумінгу. Стандарти інтерфейсів відпрацьовують дуже ретельно. Основну увагу приділяють питанню ефективного використання смуги частот, виділеної для організації радіоканалу зв'язку. Далі розглянемо особливості побудови ефірних інтерфейсів для стандартів D-AMPS та GSM.

### 2.2.2. Ефірний інтерфейс стандарту D-AMPS

У стандарті D-AMPS існує дві можливі конфігурації, які мають відповідні ефірні інтерфейси. Цифровий стандарт було складено на основі аналогової системи зі спільними з нею каналами керування. Такий стандарт отримав назву IS-54. Для нього було розроблено відповідний ефірний інтерфейс. Із метою розширення функціональних можливостей здійснено модернізацію, за рахунок якої введено в експлуатацію нові цифрові канали керування з більшою пропускнуою здатністю. Новий стандарт одержав назву IS-136. Але для мовних каналів було збережено структуру IS-54.

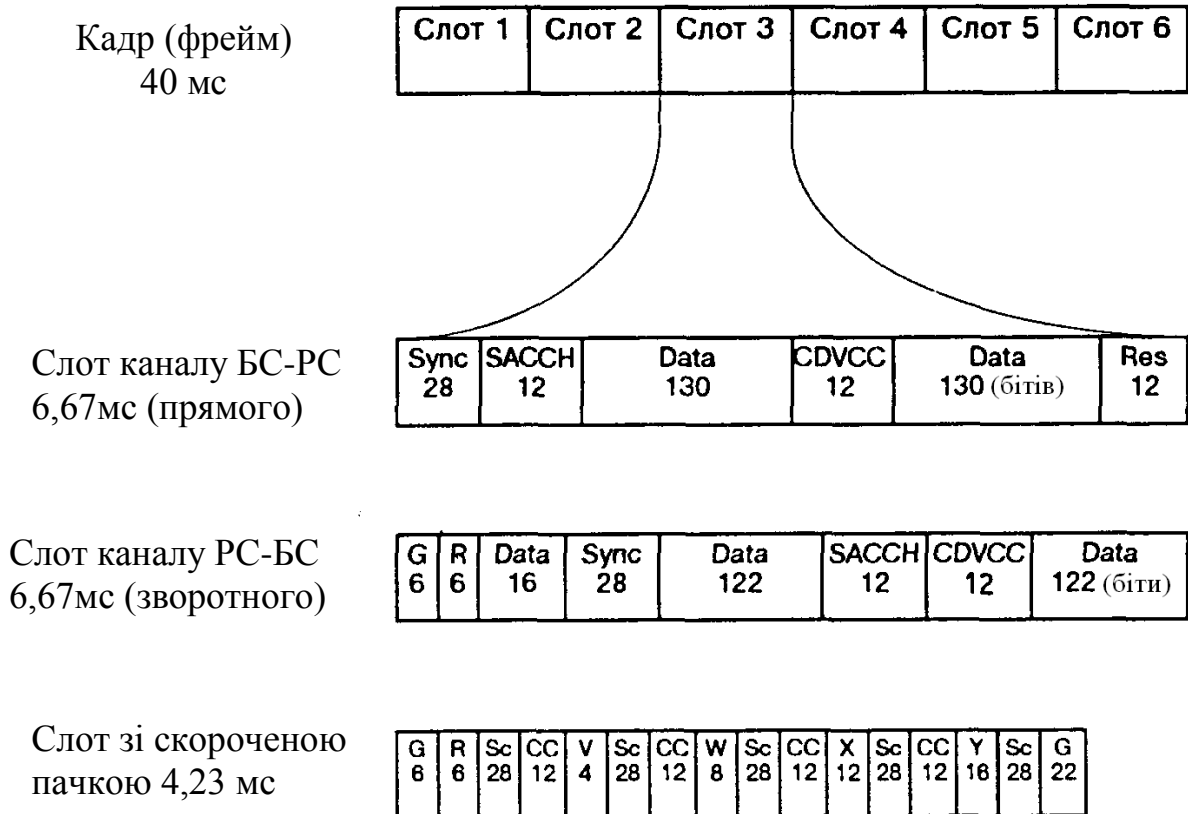
Отже, розглянемо структуру ефірного інтерфейсу стандарту IS-54 (рис. 2.7). Передача інформації в ньому відбувається кадрами (англ. — frame), які йдуть один за одним, з тривалістю 40 мс. Кожен кадр має 6 часових інтервалів – слотів. Тривалість одного слота — 6,67 мс, що відповідає 324 бітам, тобто тривалість одного біта — 20,55 мкс. У режимі повношвидкісного кодування (full rate coding) на один мовний канал відводять два слоти, тобто 20 мс сегмента мови за допомогою такого кодування «упаковують» в один слот, тривалість якого втричі менша. Стандартом передбачена й більш щільна упаковка мови, але такий режим у технічних засобах реально не реалізований. Із рис. 2.7 випливає, що слоти прямого (down-link) і зворотного (uplink) каналів відрізняються за структурою. В обох випадках для передачі мови відводять 260 бітів. Ще 52 біти займає керувальна та допоміжна інформація, призначення якої буде зрозуміле з подальшого аналізу. Інформація має: 28-бітну навчальну послідовність (Sync, скорочено Sc), яку використовують для ідентифікації слота в межах кадру, синхронізації слота в часі та налагодження еквалайзера; - 12-бітне повідомлення сигналізації, контролю та керування SACCH (Slow Associated Control Channel) — каналу повільного керування; 12-бітне повідомлення цифрового коду «кольору» (CDVCC – Coded Digital Verification Control Code), який застосовують для ідентифікації PC під час приймання її сигналу BC (код призначається BC і транслюється індивідуально для кожної PC, яка потім ретранслює цей код до BC), при цьому код має 8 бітів, а 4 біти утворюють разом з інформаційними бітами перешкодостійкий код Хемінга; 12 бітів у прямому каналі залишають резервними, а в зворотному вони виконують функцію захисного інтервалу, протягом якого не передають будь-якої інформації.

За умовою повношвидкісного кодування слоти 1 і 4 утворюють перший мовний канал, 2 і 5 — другий, 3 і 6 — третій. На початковому етапі встановлення зв'язку використовують скорочений слот (рис. 2.7), у якому багатократно повторюється синхронізуюча послідовність та код CDVCC, поділені нульовими числами різної тривалості. У кінці скороченого слота маємо допоміжний захисний бланк. PC передає скорочені слоти доти, доки BC не вибере потрібну часову затримку, яку визначає відстань між PC і BC. Крім того, у стандарті IS-54 використовують загальні канали керування з аналоговим стандартом AMPS. Структура ефірного інтерфейсу стандарту IS-136 більш складна порівняно зі стандартом IS-54. Кадр складається з двох блоків по шість слотів (блок TDMA). Більше того, у стандарт введено структурні елементи: «суперкадр» – 16 кадрів (640 мс); «гіперкадр» – 2 суперкадри (1,28 с).

### 2.2.3. Ефірний інтерфейс стандарту GSM

У повністю цифровому стандарті GSM інформація передається кадрами з

тривалістю 4,615 мс. Кожен кадр має 8 слотів по 577 мкс. Кожен слот відповідає каналу мови. За умови повношвидкісного кодування всі послідовні кадри мають інформацію одних і тих же 8 мовних каналів. Як і в стандарті D-AMPS, у GSM передбачено можливість напівшвидкісного кодування, яку поки що технічно не реалізовано. У такому режимі інформація одного мовного каналу передається через кадр так, що вдвічі збільшується кількість мовних каналів.

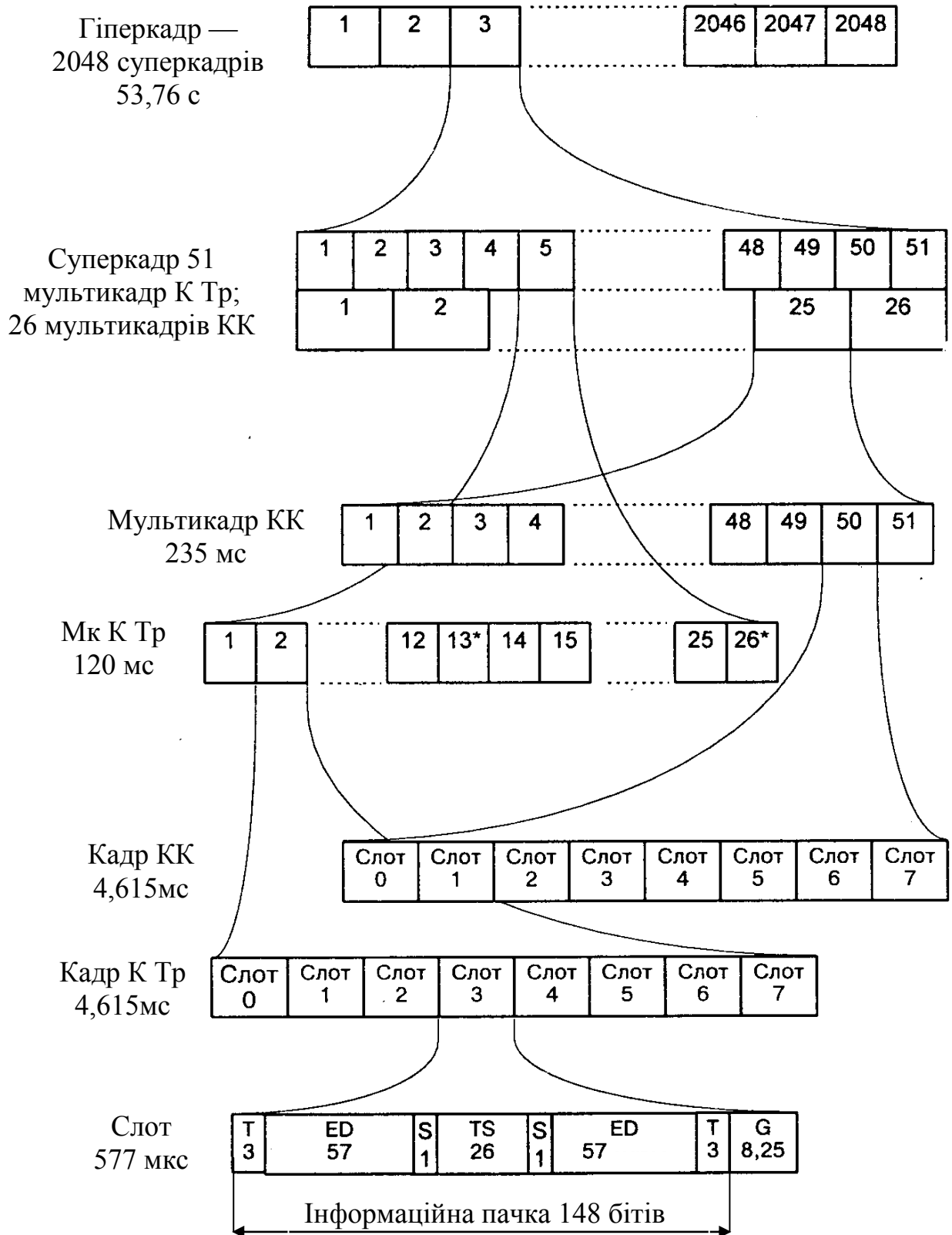


**Рис. 2.7.** Структура кадру та слотів стандарту IS-54 системи D-AMPS:

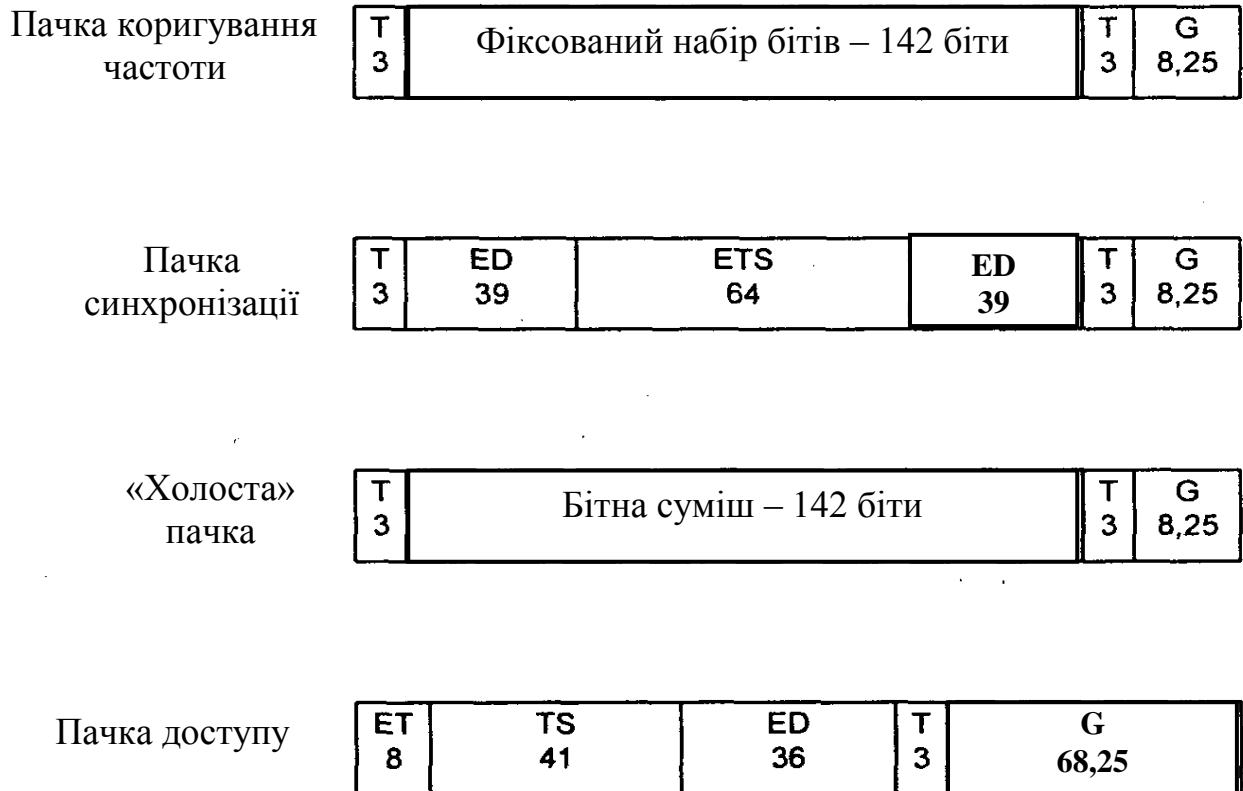
*Data* – мовна інформація; *G* – захисний бланк (Guard time); *R* – інтервал фронту імпульсу передачі (Ramp up time); *V*, *W*, *X*, *Y* – шістнадцяткові нулі; *Res* – резерв

Зі структури ефірного інтерфейсу (рис. 2.8) випливає, що інформаційний кадр може бути двох видів – кадр каналу трафіка або кадр каналу керування. В обох випадках він має однакову тривалість і однакову кількість слотів, але різну структуру й відповідно різний інформаційний зміст. Тривалість одного слота відповідає 156,25 біта, тобто тривалість одного біта в стандарті GSM дорівнює 3,69 мкс. Перші 148 бітів слота каналу трафіка утворюють інформаційний пакет, або інформаційну пачку (burst); 8,25 біта – захисний інтервал. Зі 148 бітів на передачу інформації мови відводять 116 бітів (114 бітів — на передачу безпосередньо мови та 2 біти — сховані прапори, які визначають тип інформації, що передається); 26 бітів займає навчальна послідовність; решта (6 бітів) утворюють два трибітові захисні бланки на границях пачки. Варіанти слотів для організації каналів керування наведено далі (рис. 2.9).





**Рис. 2.8. Структура ефірного інтерфейсу (канал трафіка) системи GSM:**  
*ED* – кодована інформація; *TS* – навчальна послідовність; *T* – захисний бланк (хвостові біти); *S* – прапор; *G* – захисний інтервал; К Тр – канал трафіка; КК – канал керування; МК – мультикадр



**Рис. 2.9. Варіанти слота каналів керування системи GSM:**

*ETS* – розширена навчальна послідовність; *ET* – розширений захисний бланк

З рис. 2.8 випливає, що кадри об'єднуються в мультикадри. 26 кадрів каналу трафіка утворюють мультикадр тривалістю 120 мс (із них 24 кадри – інформація мови 1—12 та 14—25; у 13-му кадрі передається інформація повільного каналу керування SACCH. 26-й кадр залишається порожній (зарезервований для передачі другого сегмента інформації каналу SACCH у режимі напівшвидкісного кодування). Мультикадри, у свою чергу, об'єднуються в суперкадри із загальною тривалістю 6,12 с. Гіперкадр вважають криптозахисним тривалістю 3 год, 28 хв, 53,76 с. Номер кадру в межах суперкадру використовують у процесі закриття інформації (операція шифрування).

### 2.3. Організація роботи систем стільникового зв'язку

Із вище викладеного матеріалу відомо, що крім безпосередньо мовної інформації по каналу зв'язку повинна передаватись так звана сигнальна інформація (інформація сигналізації), яка містить інформацію керування, інформацію контролю стану апаратури. Розглянемо, як організують використання каналів зв'язку та їх параметри.

#### 2.3.1. Частотні канали стільникових систем зв'язку

Частотний канал (ЧК) – це смуга частот, відведена для передачі інформації одного каналу зв'язку. Але, як відомо, у разі застосування методу TDMA в одному ЧК передають інформацію декількох каналів зв'язку. Наведемо конкретні при-

клади. У стандарті D-AMPS (США) для передачі інформації прямого каналу (БС → РС) відведена смуга частот 869—894 МГц; зворотного каналу (РС → БС) — 824—849 МГц. Тобто прямий та зворотний канали рознесені за частотою на 45 МГц (дуплексний рознос). Один ЧК займає смугу частот  $\Delta f = 30$  кГц, так що в межах виділеного діапазону з урахуванням захисних смуг розміщуються 832 ЧК. Їм дають номери від 1 до 799 (включно) і від 991 до 1023.

Центральна частота пов'язана з його номером  $N$  такими співвідношеннями:  
у зворотному каналі —

$$\text{МГц} \begin{cases} f_0 = 825,000 + 0,030(N), & 1 \leq N \leq 799 \\ f_0 = 825,000 + 0,030(N - 1023), & 991 \leq N \leq 1023 \end{cases};$$

у прямому каналі —

$$\text{МГц} \begin{cases} f_{II} = 870,000 + 0,030(N), & 1 \leq N \leq 799 \\ f_{II} = 870,000 + 0,030(N - 1023), & 991 \leq N \leq 1023. \end{cases}$$

### 2.3.2. Фізичні канали систем стільникового зв'язку

Фізичний канал (ФК) у системі з багатостанційним доступом (TDMA) — це часовий слот із визначеним номером (або параслотів з номерами, що відрізняються на третьому режимі повношвидкісного кодування стандарту D-AMPS). Отже, в одному ЧК у режимі повношвидкісного кодування передається інформація трьох ФК. У стандарті GSM завжди передається інформація 8 ФК у режимі повношвидкісного кодування, але в режимі напівшвидкісного кодування один ФК має два канали трафіка, інформація яких передається по черзі через кадр. Тобто в режимі повношвидкісного кодування реалізується часове ущільнення каналів у 3 або 8 разів відповідно. У режимі напівшвидкісного кодування — у 6 або 16 разів. У цьому полягає основна перевага цифрового покоління стільникового зв'язку порівняно з аналоговим.

### 2.3.3. Логічні канали систем стільникового зв'язку

Логічні канали (ЛК) розрізняють за складом інформації, що передається у ФК. У ФК можна реалізувати один із двох видів ЛК — канал трафіка або канал керування. Кожен із них може в загальному випадку існувати в одному з декількох варіантів (типів).

Трафік — інформаційний потік. У подальшому будемо вважати, що канал трафіка — канал передачі мови.

У стандарті D-AMPS версії IS-54 з відносно простим ефірним інтерфейсом поняття «логічні канали» — відсутнє. Вище розглянуто структуру слота для логічного каналу, де частково передається інформація керування (SACCH, CDVCC, Sync). ЛК у такому стандарті по суті являє собою скорочену пачку, яку використовують на етапі встановлення зв'язку, а також із швидким сумісним каналом керування FACCH (Fast Associated Control Channel). Інформація каналу FACCH передається замість інформації мови (DATA), тобто структура слота ЛК керування відрізняється від слота каналу трафіка заміною поля DATA на поле FACCH. Сегмент мови при цьому (40 мс) просто пропускають (він втрачається). Допустима частота замін не регламентована.

У стандарті IS-136 виділених каналів керування немає, тобто всі ЧК рівноправні відповідно до складу інформації, що передається, але виникає необхідність використання ЛК – каналів трафіка і керування. Для передачі інформації ЛК керування виділяють один ФК, тобто два слоти в межах одного кадру ефірного інтерфейсу. У зворотному напрямку (РС → БС) передається інформація одного ЛК керування – каналу випадкового доступу RACH (Random Access Channel). Інформацію цього каналу застосовують для організації доступу в систему стільникового зв'язку РС, вона передається в усіх слотах відповідного ФК.

У прямому напрямку (БС → РС) передається інформація таких ЛК керування:

- BCCH (Broadcast Control Channel), «трансляційний» режим передачі інформації про стан мережі із підканалами Fast BCCH – швидке керування, Extended BCCH – розширене керування, S-BCCH – передача повідомлень;
- каналу SPACH із підканалами виклику PCH (Paging Channel), відповіді на виклик ARCH (Access Response Channel), передача коротких повідомлень за визначеною адресою («від точки до точки» – point-to-point SMSCH – Short Message Service Channel);
- загального каналу зворотного зв'язку SCF (Shared Channel Feed-back), призначеного для передачі відповідної інформації в процесі організації доступу РС у систему.

У каналі BCCH передається інформація для всіх РС: про стан мережі (F-BCCH та E-BCCH), короткі повідомлення (S-BCCH) та інформація, що потребує частого оновлення (параметри каналів керування, важливі дані для організації доступу в мережу). F-BCCH оновлюється з частотою суперкадрів. Менш важлива інформація міститься в каналі E-BCCH. У ньому одне повідомлення розтягується на декілька суперкадрів.

Канал SPACH призначений для передачі адресних повідомлень конкретним РС. Прийнята структура каналів керування передбачає таку організацію виклику РС, яка підтримує «режим засинання» (sleep mode). Виклик повторюється з періодичністю кадру виклику, тривалість якого залежить від його класу і становить від 1,28 с до 123 с. РС приймає (декодує) інформацію в першому суперкадрі, і якщо виклику в її адресу немає, то РС «засинає», тобто відключається. Якщо декодувати інформацію в першому кадрі не вдалось (через перешкоди), то здійснюється спроба декодувати другий суперкадр, що несе таку ж інформацію. Тривалість кадру виклику визначає мережа.

У стандарті GSM ЛК поділяють на канали трафіка і канали керування (відповідно TCH і CCH). У TCH виділяють TCH/FS – повношвидкісне кодування; TCH/HS – напівшвидкісне кодування.

*Канали керування CCH поділяють на 4 типи:*

- BCCH – інформаційні канали керування для всіх РС мережі;
- CCCH – загальні канали керування;
- SDCCH – виділені закріплені канали керування;
- ACCH – суміщені канали керування.

*До каналу BCCH входять підканали:*

- FCSN – канал корекції частоти;
- SCH – канал синхронізації;
- Канал загальної інформації (без позначення).

*До каналу CCSN входять:*

- PCN – канал виклику (виклик PC з боку BC);
- AGCN – канал дозволу доступу – для призначення закріпленого каналу керування (BC → PC);
- RACH – канал випадкового доступу – для виходу з PC на BC із запитом про виділення (призначення) каналу керування.

*Виділені закріплені канали SDCSN існують у двох варіантах – автономні канали керування BC → PC та PC → BC.*

*Суміщені канали ACSN також використовують для передачі інформації в обох напрямках і вони мають:*

- SACSN – повільний суміщений канал, який об'єднується з каналом трафіка або з каналом SDCSN;
- FACSN – швидкий суміщений канал – суміщається з каналом трафіка, замінює у відповідному слоті інформацію мови, таку заміну помічають прапором (поле *S*).

На відміну від дуплексних каналів — трафіка та суміщених каналів керування, розміщених в каналі трафіка, канали керування BCN і CCSN є симплексні, що розміщені в нульовому слоті кадрів каналу керування на так званих несучих BCN. Повідомлення каналу RACH можна передати в нульовому слоті будь-якого кадру в межах 51-кадрового мультикадру каналу керування. Повідомлення RACH передається PC 1 раз на 235 мс, тобто в одному з кадрів мультикадру, при цьому задіяна структура слота, що відповідає пачці доступу. Повідомлення каналів BCN і CCSN (BC → PC) у прямому каналі розміщуються в нульових слотах п'ятдесяти кадрів мультикадру каналу керування; останній 51-й кадр мультикадру вільний. Перші 50 кадрів поділяють на 5 блоків по 10 кадрів: на початку кожного блока передається повідомлення каналу FCSN (пачки корекції частоти), далі – повідомлення каналу SCH (пачка синхронізації), потім у першому блоці передається 4 повідомлення BCN і 4 повідомлення каналу AGCN або PCN, решту блоків, тобто 8 повідомлень, відводять для AGCN або PCN. І це зовсім не повний перелік інформації, що проходить по каналах керування. Насамкінець слід зауважити, що повідомлення ЛК керування у більшості випадків кодують надмірно.

## **2.4. Установлення зв'язку в стільникових системах**

Розглянемо основні режими роботи стільникової системи зв'язку. Відомо, що ЦК, BC працюють цілодобово й безперервно. Конструкцією системи передбачено резервування комплектів обладнання, тому ремонтують і обслуговують тільки резервні комплекти.

У роботі PC перерви і вимкнення бувають дуже часто. За умови роботи PC у межах однієї чарунки можна виділити чотири основні режими її роботи:

- увімкнення та ініціалізація;

- режим очікування;
- режим встановлення зв'язку (виклик);
- режим підтримання зв'язку (телефонна розмова).

#### 2.4.1. Увімкнення та ініціалізація

Після моменту замикання кола живлення у РС відбувається процедура *ініціалізації* — початковий запуск. Протягом цього етапу відбувається налагодження РС на роботу в складі системи за сигналами, що регулярно передають БС по відповідних каналах керування. По закінченні процесів ініціалізації РС переходить у режим *очікування*.

Алгоритм стану ініціалізації залежить від стандарту стільникового зв'язку.

D-AMPS (версія IS-54): РС починає роботу зі сканування виділених каналів керування і вибору каналу з найбільш сильним сигналом. Потім за інформацією, переданою у вибраному каналі РС, визначає номери каналів виклику, вибирає знову канал із найсильнішим сигналом, налагоджується на його частоту і переходить у режим очікування.

D-AMPS (версія IS-136): процес налагодження відбувається швидше, хоча його алгоритм складніший. Максимально аналізується вся інформація про канали керування (де знаходився канал керування в минулому сеансі роботи, положення каналу в поточному сеансі керування і т.д.), скануються всі ЧК у визначеній послідовності сканування груп каналів відповідно до ймовірного розміщення в них цифрових каналів керування.

GSM: РС сканує всі ЧК стандарту, налагоджується на канал із найбільш сильним сигналом і за наявності пачки корекції частоти визначає, чи передається у вибраному ЧК інформація каналу ВССН. Якщо не передається, РС перестроюється на наступний за рівнем канал доти, доки не буде знайдено канал ВССН. Після цього РС знаходить пачку синхронізації, синхронізується з вибраним ЧК, розшифровує допоміжну інформацію про БС (6-бітний код ідентифікації БС) і нарешті приймає остаточне рішення про продовження пошуку або роботи у визначеній чарунці.

#### 2.4.2. Режим очікування

У режимі очікування РС стандарту D-AMPS відстежує:

- зміни інформації про систему (вони можуть бути пов'язані як зі змінами режимів роботи системи, так і з переміщенням РС, наприклад переходом в іншу чарунку);
- команди системи, наприклад підтвердження своєї дієздатності («реєстрацію» в конкретній чарунці);
- отримання виклику від системи;
- ініціалізацію виклику від РС.

Крім того, РС періодично (один раз за 10 хв підтверджує свою дієздатність), для чого з РС на БС передаються відповідні сигнали (уточнення місцезнаходження). У ЦК фіксується чарунка кожної РС за місцем реєстрації, що полегшує організацію процедури виклику РС. Якщо з боку системи надходить виклик РС, ЦК

направляє його на БС, де зареєстрована РС, або на декілька БС, наближених до БС, де останнім часом була реєстрація. При цьому враховується можливе переміщення абонента за час, що минув після реєстрації. Якщо РС не підтверджує свою дієздатність протягом визначеного інтервалу часу (тобто пропускає 2—3 підтвердження реєстрації), ЦК вважає її вимкненою і виклик, що йде до неї, не передається. У стандарті GSM РС вимірює і передає на БС таку інформацію:

- рівень сигналу БС своєї чарунки і близько шістнадцяти сусідніх чарунок (вимірює за сигналом каналу BCCH);
- код якості прийнятого у робочій чарунці сигналу, який залежить від функції оцінки частоти бітної помилки (BER – Bit Error Rate) за прийнятим сигналом, перед процедурою каналного декодування.

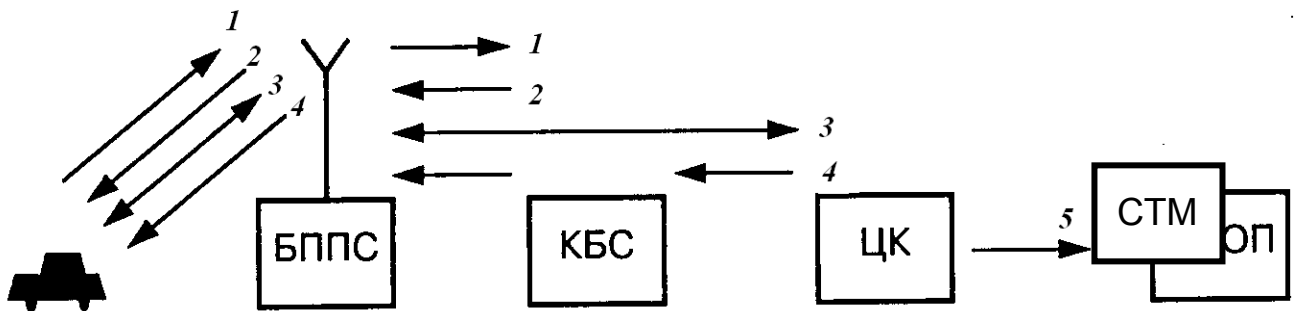
У стандарті D-AMPS сигнал і частоту бітної помилки вимірюють за командою БС. Це потрібно для забезпечення процедури передачі обслуговування РС іншою БС з відповідною реєстрацією в ЦК.

### 2.4.3. Установлення зв'язку

БС передають виклик по відповідному каналу. РС у режимі очікування отримує виклик і відповідає через свою БС, одночасно передаються дані, потрібні для аутентифікації (цю процедуру докладніше розглянемо пізніше). У разі позитивного результату аутентифікації призначається канал трафіка і РС повідомляють номер відповідного ЧК. РС налаштовується на виділений канал і разом з БС вони виконують необхідні кроки з підготовки сеансу зв'язку:

- налагодження на заданий номер слота в кадрі;
- уточнення затримки в часі;
- встановлення рівня випромінюваної потужності.

У стандарті GSM відбувається також прив'язка РС до БС за частотою із застосуванням пачки корекції частоти і часова синхронізація з точністю до  $\frac{1}{4}$  біта. Для цього в пачці синхронізації передаються номери чверті біта ( $QN$  у межах 0—624 біти;  $BN$  у межах 0—156 бітів;  $TN$  – 0—7 слотів;  $FN$  – 0—2715648 кадрів). Одночасно в пачці синхронізації передається 3-бітний код кольору (color cod) і 3 біти коду БС, які в сукупності утворюють унікальний 6-бітний код БС (DSIC). Після цього БС видає повідомлення про подачу сигналу виклику (дзвінок), яке підтверджує РС, і абонент, який здійснює виклик, має можливість слухати сигнал виклику. Коли викликаний абонент відповідає (знімає трубку), РС видає запит на завершення встановлення з'єднання. Після цього абоненти мають можливість вести розмову. Якщо РС дає виклик через свою БС, то формується повідомлення з указанням номера абонента і даними для аутентифікації РС абонента, який здійснює виклик. Після процедури аутентифікації БС призначає канал трафіка і подальші кроки з підготовки сеансу зв'язку здійснюються аналогічно (рис. 2.10).



**Рис. 2.10. Спрощена структура виклику з боку РС (стандарт GSM):**

1 – РС через канал випадкового доступу (RACH) робить запит виділеному закріпленому каналу керування (SDCCH) для встановлення зв'язку; 2 – контролер БС через канал дозволу доступу (AGCH) призначає канал SDCCH; 3 – РС через канал SDCCH виконує процедуру аутентифікації і видає запит на виклик (з номером потрібного абонента); 4 – ЦК дає команду на призначення каналу трафіка (TCH); 5 – ЦК видає номер, який викликають, на стаціонарну телефонну мережу і після відповіді завершує з'єднання; БППС – базова приймально-передавальна апаратура; КБС – контролер БС; ЦК – центр комутації; СТМ – стаціонарна телефонна мережа загального користування

#### 2.4.4. Аутентифікація та ідентифікація абонентів

*Аутентифікація (Ат)* – процедура підтвердження дійсності (законності, наявності прав на використання послуг стільникового зв'язку) абонента системи мобільного зв'язку.

*Ідентифікація (Ід)* – процедура ототожнення РС, тобто встановлення групи, якій належить РС. Ідентифікацію застосовують для виявлення загублених, вкрадених або несправних телефонних апаратів.

Аутентифікація в аналогових системах була дуже простою. У цифрових системах — це шифрування деяких паролей-ідентифікаторів із застосуванням квазі-випадкових чисел, які періодично передаються із ЦК на РС, та індивідуального для кожної РС алгоритму шифрування. Таке шифрування із застосуванням одних і тих же первинних даних і алгоритмів має місце як на РС, так і в ЦК (або центрі Ат). Взагалі аутентифікацію вважають закінченою успішно, якщо обидва результати збігаються. (Схему й деталі алгоритму аутентифікації розглянемо пізніше.)

Процедура ідентифікації являє собою порівняння ідентифікатора абонентського апарата з номерами «чорного списку» реєстру апаратури з метою вилучення з обігу вкрадених і несправних телефонів. Ідентифікатор апарата роблять таким, щоб його змінення або підробка були складними або економічно не доцільними. Зараз спеціалісти працюють над питанням оперативного обміну інформацією між реєстрами апаратури (міжоператорський, міжнародний) з метою об'єднання операторів у боротьбі з «Фродом» стільникового зв'язку.

«Фрод» – загальний комплекс методів і способів несанкціонованого користування послугами мобільного зв'язку.

Технічно процедура передачі обслуговування відбувається, коли якість каналу зв'язку, який оцінюють за рівнем сигналу або частоти бітної помилки, падає нижче за припустиму межу. У GSM вказані параметри постійно вимірює РС як



для своєї, так і для сусідніх чарунок (до шістнадцяти) і результати вимірювань передає на БС. У D-AMPS PC вимірює відповідні характеристики тільки для своєї чарунки, але в разі погіршення якості зв'язку вона повідомляє про це через БС ЦК і за командою останнього аналогічно виконує процедуру в сусідніх чарунках. За результатами цих вимірювань ЦК вибирає чарунку, в яку треба передати обслуговування. Отже, обов'язковою умовою передачі обслуговування з однієї чарунки в іншу є більш висока якість каналу зв'язку. Ухваливши рішення про передачу обслуговування і вибравши нову чарунку, ЦК повідомляє про це БС нової чарунки, PC через БС старої чарунки видає необхідні команди зі вказівками щодо нового частотного каналу, номера слота і т.ін. PC налагоджується і виконує такі ж кроки, як і під час встановлення зв'язку. Перерва не перевищує частки секунди.

## 2.5. Функціональні можливості стільникових систем зв'язку

### 2.5.1. Процедура роумінгу

*Роумінг* – це надання послуг стільникового зв'язку абоненту одного оператора в системі іншого оператора. Абонента, який користується послугами роумінгу називають *ромером* (Roamer). Для реалізації роумінгу необхідне технічне забезпечення для його створення (у простому випадку — використання однакового стандарту) і наявність договору між компаніями-операторами щодо цієї операції. Система роумінгу постійно вдосконалюється. Найбільше досягнення цієї сфери послуг – можливість роумінгу між системами стільникового та супутникового зв'язку.

Наведемо спрощену схему організації роумінгу. Абонент на території «чужої» системи, яка допускає реалізацію роумінгу, здійснює виклик звичайним способом, як на території «своєї» системи. ЦК з'ясовує, що в домашньому реєстрі такий абонент не зареєстрований, і надає йому ознаку ромера та записує в гостьовий реєстр. Одночасно ЦК відправляє запит на домашній реєстр системи ромера про відповідні відомості, потрібні для організації обслуговування (зазвичай у договорі визначені види послуг, паролі, шифри), і повідомляє абоненту про систему, у якій він знаходиться. Остання інформація фіксується в домашньому реєстрі абонента («рідної» системи). Із цього моменту ромер користується зв'язком, як у своїй системі. Але відомості про користування зв'язком записуються в гостьовий реєстр. Виклики, що надходять на номер ромера, домашня система переадресовує на ту систему, де ромер знаходиться в гостях. Коли ромер повертається додому, в домашньому реєстрі стирається адреса гостьового реєстра. Оплату послуг роумінгу здійснюють через домашню систему. Домашня система компенсує витрати компанії-оператора, що надала послуги роумінгу, відповідно до роумінг-угоди.

### 2.5.2. Функції стільникового зв'язку

Відомо, що системи стільникового зв'язку забезпечують звичайний двосторонній радіотелефонний зв'язок з мобільними абонентами стільникового зв'язку та немобільними абонентами стаціонарної мережі. Крім того, вони надають ряд таких послуг, як:

- передача факсимільних повідомлень;

- передача комп'ютерних даних;
- переадресація виклику та автододзвін;
- автоматична реєстрація тривалості телефонних розмов;
- голосова пошта.

У стандарті GSM підтримувані функції мають чітку класифікацію. Функції стільникового зв'язку є основні й допоміжні. Перші поділяють на два класи: функції передачі (bearer services) та телефонії (teleservices). Допоміжні функції (supplementary services) можуть бути надані тільки одночасно з основними.

*Функції передачі* мають 4 категорії:

1-ша – асинхронний обмін даними з комутуваними телефонними мережами загального користування зі швидкістю 300—9 600 біт/с;

2-га – синхронний обмін даними з телефонними мережами загального користування, комутуючими мережами передачі даних загального користування та цифровими мережами з інтеграцією функцій зі швидкістю 300—9 600 біт/с;

3-тя – асинхронний пакетний обмін даними з мережею передачі даних загального користування з пакетною комутацією (доступ через асемблер/дисасемблер) зі швидкістю 300—9 600 біт/с;

4-та – синхронний пакетний обмін даними з мережею передачі даних загального користування з пакетною комутацією зі швидкістю 2 400—9 600 біт/с.

Функції передачі можуть бути прозорими (transparent) і непрозорими. Прозорі функції передачі захищають від помилок тільки за рахунок поточного їх коригування (коригування помилок на проході – forward error correction). Непрозорі функції передачі передбачають допоміжний захист у вигляді автоматичного пере-запиту (Automatic Repeat Request – ARQ).

*Телефонії* мають такі категорії:

1-ша – передача інформації мови і тональної сигналізації в смузї мовної інформації;

2-га – передача коротких повідомлень (буквено-цифрові повідомлення до 180 символів) мобільному абоненту;

3-тя – доступ до системи обробки повідомлень (наприклад, передача повідомлень від системи персонального виклику на РС);

4-та – передача факсимільних повідомлень.

*Допоміжні функції* стільникового зв'язку:

- ідентифікація і відображення викликаючого або підключеного номера, обмеження ідентифікації і відображення номера викликаючого абонента;
- переадресація виклику на інший номер;
- очікування виклику (у разі зайнятого терміналу абонент отримує повідомлення про виклик, що надійшов; він може відповісти, відмовитись від приймання виклику, проігнорувати його, може перервати сеанс зв'язку і дати відповідь на інший виклик, а потім повернутись до продовження розмови);
- конференц-зв'язок;
- закрита група користувачів;
- оперативна інформація про вартість послуг;

- заборона на визначені функції, наприклад на вхідні виклики, міжнародні виклики або вхідні виклики для певних номерів;
- надання відкритої лінії зв'язку «мережа/користувач» для реалізації функцій, визначених оператором.

Поняття «функція передачі» і «телефункція» взяті з теорії цифрових мереж з інтеграцією функцій (Integrated Services Digital Networks – ISDN).

## 2.6. Особливості обробки сигналів та оптимізації частотного діапазону

### 2.6.1. Смуги частот стільникового зв'язку

Для роботи стільникових систем зв'язку міжнародні консультативні органи з регламенту радіозв'язку виділили смуги частот, наведені далі (табл. 2.3). Як бачимо, по-перше, існує жорстке обмеження виділених смуг, що містять відносно невелику кількість частотних каналів. Із цим пов'язана необхідність найбільш раціонального використання виділеного діапазону, тобто оптимізації частотного діапазону і відповідного збільшення ємності системи зв'язку. По-друге, смуги частот належать до дециметрового діапазону. Відомо, що такі хвилі поширюються в межах прямої видимості, дифракція на зазначених частотах виражена дуже слабо або майже відсутня, але таким хвилям притаманне молекулярне поглинання і поглинання в гідрометеорах. Крім того, близькість земної поверхні й наявність перешкод (наприклад, будівель), призводить до появи відбитих сигналів, які інтерферують між собою і прямим сигналом. Це явище називають багатопроменевим поширенням.

Таблиця 2.3. Виділені смуги частот

Стандарт	Частоти, МГц		Довжина хвиль, см	
	Зворотний канал	Прямий канал	Зворотний канал	Прямий канал
NMT-450	453—457	463—467,5	65,6—66,3	63,2—64,9
AMPS/D-AMPS	824—849	869—894	35,4—36,4	33,6—34,6
GSM 900	890—915	935—960	32,8—33,7	31,2—32,1
GSM 1800	1710—1785	1805—1880	16,8—17,6	16,0—16,6

Багатопроменевий характер поширення радіохвиль є причиною того, що потужність сигналу зменшується пропорційно не другому степеню відстані між передавальною та приймальною станціями, як у вільному просторі, а пропорційно четвертому степеню відстані. Тобто напруженість поля зменшується пропорційно квадрату відстані. Це впливає з формули Введенського:

$$E(\text{мкВ} / \text{м}) = \frac{2,18h_1h_2\sqrt{PG}}{\lambda r^2},$$

де  $h_1, h_2$  – висота антен, м;

$r$  – відстань між передавальною та приймальною станціями, км;

$P$  – потужність передавача, кВт;

$\lambda$  – довжина хвилі, м;

$G$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени (для турнікетної антени його приблизно визначають за кількістю поверхів антени).

Інтерференція хвиль викликає явище завмирання сигналу — фединг (fading), за якого інтенсивність сигналу значно змінюється, особливо в разі переміщення РС. Крім того, слід враховувати викривлення, що є наслідком накладання декількох сигналів з приблизно однаковим за інтенсивністю рівнем, але зміщених за часом. Це призводить до появи похибок. Багатопроменеве поширення істотно ускладнює теоретичний аналіз інтенсивності сигналів як функції відстані між БС і РС. Але такий розрахунок потрібен для коректного проектування системи. На практиці застосовують напівемпіричні методи аналізу з тривалими дослідженнями і практичними вимірюваннями.

Принцип повторного використання частот (ППВЧ – frequency reuse) основний у системі стільникового зв'язку і радикально відрізняє її від інших (транкінгових систем мобільного зв'язку, ємність яких теоретично можна підвищувати до нескінченності). Ідея ППВЧ дуже проста. У сусідніх чарунках використовують різні смуги частот, а через декілька чарунок ці смуги повторюються, що дуже вигідно, оскільки дозволяє за обмеженої смуги частот охопити системою необмежено велику зону обслуговування. Розглянемо принцип побудови системи з ППВЧ за допомогою стільникового покриття (рис. 2.11). У чарунці А використовують 1/3 частини частотного діапазону. У чарунці В — іншу 1/3 частини діапазону. Оскільки поряд із чарунками А і В не можна використовувати однакові частотні канали, то з таких же міркувань у чарунці С вимушені використовувати третю частину частотного діапазону. Але вже в чарунці D, що має спільні межі з чарунками А і С, які не мають меж із чарункою В, можна використати ту саму частину діапазону, що й у чарунці В. Умовно це позначають  $D \rightarrow B$ . ППВЧ аналогічний для чарунок Е, F, G, H. Таким чином, переходимо до тричарункової системи повторення частот (триелементного кластера). Припустимо, що триелементний кластер має мінімально можливий розмір і в кожній чарунці можна використовувати не 1/3 діапазону, а, наприклад, 1/10. У триелементному кластері чарунки з однаковими смугами повторюються часто, а це погано впливає на рівень міжканалних перешкод. Більш вигідною з цієї позиції структурою є багатоелементні кластери (7, 12, 19).

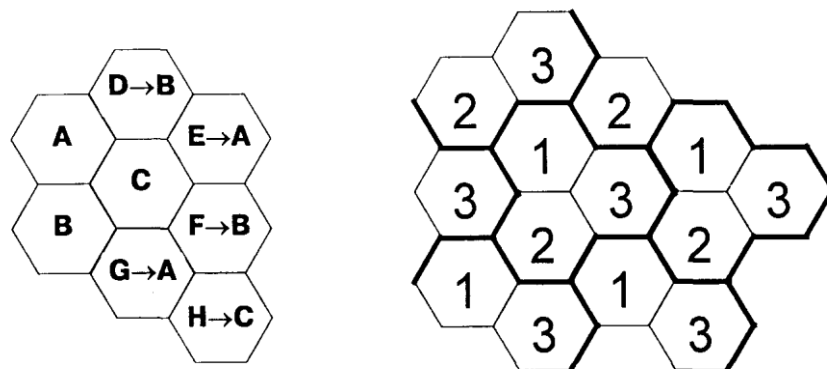


Рис. 2.11. Будова триелементного кластера

Відстань  $D$  між центрами чарунок, де використовують однакові смуги, пов'язана з кількістю елементів  $N$  у кластері:

$$D = \sqrt{3NR} \quad \text{або} \quad q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N},$$

де  $R$  – радіус чарунки;

$q$  – коефіцієнт зменшення міжканальних перешкод (міжканального повторення).

### 2.6.2. Методи організації багатостанційного доступу в системах стільникового зв'язку

Згідно з теорією зв'язку виділяють п'ять основних варіантів організації багатостанційного доступу, але практичний інтерес для стільникового зв'язку являють лише описані нижче варіанти.

БСДЧР у міжнародній класифікації позначають FDMA (рис. 2.12). Його використовують всі аналогові стільникові системи зв'язку.

БСДЧР за міжнародною класифікацією — TDMA. Простий за ідеєю, але значно складніший за технічною реалізацією. Кожен частотний канал (ЧК) поділяють за часом між декількома користувачами (рис. 2.13), тобто ЧК по черзі надають певній кількості користувачів. Це забезпечує можливість організації декількох фізичних каналів (ФК) в одному ЧК. Строго кажучи, наведений графік не відповідає в чистому вигляді TDMA. Це поєднання FDMA і TDMA. Таку схему застосовують у системах стільникового зв'язку. Графік, зображений на рис. 2.15, відповідає стандарту D-AMPS: за умови збереження однакової смуги зі стандартом AMPS кількість ФК зростає в 3 рази в режимі повношвидкісного кодування. Слід зазначити, що розділення за часом може бути застосоване і для реалізації дуплексного зв'язку в одній смузі частот (TDD). У стільниковому зв'язку застосовують метод FDD. Але TDMA не реалізує всіх потенційних можливостей ефективного використання спектра. Відомі переваги щодо цього належать методу CDMA (БСДКР): широка загальна смуга частот без часових обмежень. Оскільки методи FDMA і TDMA та особливості їх застосування описано вище, методу CDMA приділимо особливу увагу. Метод складний за принципами побудови та технічної реалізації.



Рис. 2.12. Принцип дії FDMA



Рис. 2.13. Принцип дії TDMA

### 2.6.3. Принципи побудови стільникової системи зв'язку стандарту CDMA (IS-95)

На основі американського стандарту IS-95 побудовано деякі стандарти стільникового зв'язку, які в наш час визначають як стандарти третього покоління (3G). Головними перевагами стандарту IS-95 вважають закритість і високу перешкодостійкість. Його основна особливість – це широка смуга, яка значно перевищує спектр мови. Тому системи CDMA називають *системами з розширеним спектром*. Спектр інформаційного повідомлення розширюється за допомогою модуляції (кодування) із застосуванням псевдовипадкової послідовності (ПВП) з тривалістю одного елемента  $\tau_d \approx 1$  мкс. Високу перешкодостійкість методу фізично можна пояснити так. Модуляція ПВП під час передачі потребує повторної модуляції під час приймання (що еквівалентно демодуляції), у результаті чого відновлюється первинний вузькосмуговий сигнал. Затримку демодулювальної ПВП вибирають експериментально до елемента послідовності. Правильному значенню затримки відповідає максимальний відгук на виході фільтра-демодулятора (в умовах кореляційного приймання). Якщо перешкода вузькосмугова, то ПВП під час приймання діє на неї як «модулювальна», тобто «розмиває» її спектр у широкій смузі  $C_{СП}$  (сигнал + перешкода). У результаті цього у вузьку смугу сигналу  $C_C$  потрапляє лише  $1/G$  частини потужності перешкоди, так що перешкода буде послаблена в  $G$  разів, де  $G = \frac{C_{СП}}{C_C}$  – вигравш обробки. Так,  $C_{СП} = 1,23$  МГц,

$C_C = 19,2$  кГц,  $G \approx 65$ . Якщо перешкода широкосмугова зі смугою  $C_{СП}$  або більше, то демодуляція не змінює ширини її спектра і в смузі сигналу потрапляє перешкода послаблена в таку кількість разів, яка відповідає співвідношенню  $C_C$  і  $C_{СП}$ . Можливість успішної роботи системи в умовах багатопроменевого поширення пов'язана безпосередньо з кореляційним прийманням. Кореляційний приймач має декілька каналів (3 у РС, 4 у БС), кожен з яких налагоджений на відповідну затримку сигналу. Сигнали з виходів каналів після необхідного вирівнювання можуть бути додані на суматорі. Така схема має назву RAKE-приймача (з англ. — вила, граблі; імпульсна характеристика цього приймача має вигляд рідкої гребінки).

Технічним рішенням компанії Qualcomm щодо розширення спектра є застосування ПВП з частотою слідування 1,2288 МГц, причому  $1228,8 = 9,6 \times 128$ , тобто за частоти інформаційного потоку 9,6 кбіт/с *тривалість одного біта відповідає 128 елементам ПВП*. Смуга сигналу з розширеним спектром  $C_{СП} = 1,23$  МГц, причому за допомогою цифрового фільтра формується спектр, близький до прямокутного. Для модуляції сигналу застосовують три види функцій:

- коротку ПВП –  $2^{12} - 1 = 32767$ ;
- довгу ПВП –  $2^{42} - 1 \approx 4,4 \cdot 10^{12}$ ;
- функції Уолша – порядок 0—63.

Тривалість елемента для всіх трьох функцій однакова й відповідає частоті слідування 1,2288 МГц. РС і БС використовують РАКЕ-приймачі, причому в кожному з каналів є сканувальний канал за затримкою.

*У прямому каналі*

- *коротка ПВП* (квадратурна ФМ з двома ПВП однакового періоду) призначена для розширення смуги й розрізнення сигналів БС у мережі;
- *довга ПВП* (бінарна ФМ) призначена для шифрування повідомлень, які передаються для відповідної РС;
- *функції Уолша* (бінарна ФМ) призначені для розрізнення ФК даної БС.

*У зворотному каналі*

- *коротка ПВП* (квадратурна ФМ з двома ПВП однакового періоду) призначена для розширення спектра (усі РС використовують однакові пари послідовностей);
- *довга ПВП* (бінарна ФМ) крім шифрування повідомлень несе інформацію про РС (закодований індивідуальний номер РС), що забезпечує розрізнення сигналів РС;
- *функції Уолша* застосовують для кодування 6-бітних груп ( $2^6 = 64$ ), це кодування однакове для всіх ФК, тобто БС має 64 приймальні канали, які відповідають номерам функцій Уолша в 6-бітному поданні.

У зворотному каналі, як і в прямому, застосовують згорткове кодування з довжиною обмеження 9, і швидкістю 1/3 (тобто вдвічі більшою надмірністю). Крім того, застосовують процедуру перемежування на інтервалі у 20 мс.

Далі (рис. 2.14, 2.15) зображено схеми обробки сигналів після аналогово-цифрового перетворення як у БС, так і в РС. На обох схемах показано процес формування цифрового сигналу з розширеним спектром. У прямому напрямку (БС–РС) для формування логічного каналу (ЛК) застосовують функції Уолша—Адамара (набір взаємно ортогональних і ортонормованих функцій), що дозволяє організувати багатоканальну передачу на одній несучій частоті у межах загальної смуги частот. Будь-яка функція Уолша—Адамара (ФУА) детермінована і не являє собою ПВП. Відповідно скалярний добуток такої функції та реалізації шуму (ПВП) може істотно відрізнятись від 0. Тобто ФУА є ідеальний математичний об'єкт для кодового розділення каналів, але вони не придатні для покращення відношення сигнал/шум.

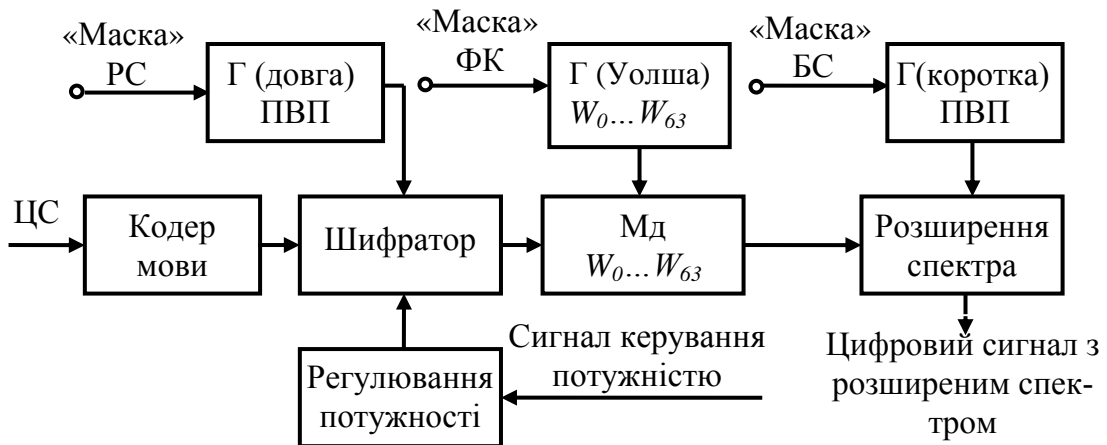


Рис. 2.14. Блок-схема обробки сигналів у передавальному тракті БС (метод CDMA, Qualcomm)

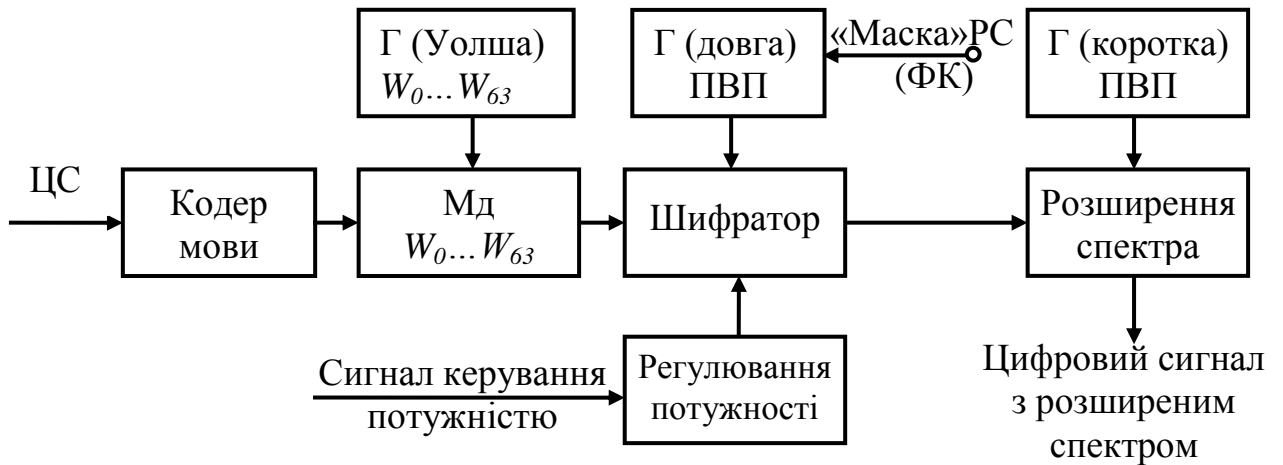


Рис. 2.15. Блок-схема обробки сигналів у передавальному тракті РС (метод CDMA, Qualcomm)

Розглянемо структурну схему одного каналу прямої лінії (Forward Link) 9,6 кбіт/с (до цифрового потоку вокодера (кодера мови) додають коригувальні двійкові символи:  $8+1,6=9,6$  кбіт/с). У приймачі РС прямого коригування помилок застосовують згорткове кодування ( $r=1/2$ ), при цьому кількість двійкових елементів подвоюється. Перед кодуванням утворюються кадри по 20 мс. Допоміжна процедура перешкодостійкого кодування – операція перемежування (за спеціальним законом символи переміщують на інтервалі одного кадру). Після шифратора інформація надходить на каналний кодер. Кодування відбувається за таким принципом: якщо на вході каналного кодера «0», то на виході — функція Уолша ( $W_0—W_{63}$ ), яка відповідає номеру каналу, використовуваного БС; якщо на вході «1» — має місце логічне заперечення (інвертування відповідної функції Уолша). За рахунок такого кодування тактова частота збільшується ( $19,2 \times 64 = 1228,8$  кГц; відношення  $T/\tau_0 = 128$ ). Відповідно розширюється спектр. На заключному етапі двійковий потік розділяється між синфазним і квадратурним каналами для подальшої квадратурної фазової модуляції (QPSK) несучої. З метою покращення енергетичних характеристик сигналу використовують ПВП.



Передавач БС може мати відносно велику потужність (порівняно з РС), здатну перекрити потужність перешкод, тому на БС застосовують коротку ПВП ( $N=2^{15}=32768$ ) зі швидкістю 1,2288 Мбіт/с. Ця послідовність спільна для всіх БС мережі. До подачі на змішувачі цифрові потоки додаються за модулем 2 з короткою ПВП. Результуючий двійковий потік у кожному каналі проходить через цифровий фільтр (КІХ-фільтр), що дозволяє обмежити смугу сигналу, який випромінюється (частота зрізу КІХ-фільтра дорівнює 615 кГц). Отримані згладжені послідовності імпульсів (доречі, їх уже називають аналоговими) надходять на змішувачі. Вихідний сигнал передавача утворюється у результаті об'єднання квадратурних каналів. У приймачі РС спочатку розраховується взаємно кореляційна функція (ВКФ) прийнятого сигналу з місцевою ПВП, яка відповідає ПВП БС. У результаті прийнятий сигнал очищується від перешкод і з нього виділяється сума сигналів, адресованих усім РС мережі. Такий сигнал надходить на каналний фільтр, який розраховує скалярний добуток прийнятої реалізації з визначеною ФУА, внаслідок чого стискається спектр і утворюється цифровий потік 19,2 кГц, що відповідає каналу зв'язку з БС. Таким чином, у системі CDMA кожному абоненту на час сеансу зв'язку можна призначити одну з ФУА. Це означає, що канал не закріплений за абонентом. Він призначається на запит абонента.

Зворотна лінія (Reverse Link) (РС—БС) має ряд особливостей. Вона складається з двох каналів: доступу (Access Channel) і мовного (передачі даних). У зворотній лінії для кодового розділення використовують не ФУА, а ПВП, оскільки ФУА взаємно ортогональні, якщо вони *синхронні та синфазні* (ортогональність у точці), але всі РС розташовані в довільному порядку і на різних відстанях від БС. У прямій лінії синфазність забезпечує БС (тобто з однієї точки). Для врахування часу затримки використовують пілот-сигнал ( $W_0(t)$ ). Для синхронізації у зворотній лінії має бути стільки пілот-сигналів, скільки РС. Тому на передавачах РС для кодового розділення застосовують ортогональні ПВП. Потужність передавачів РС відносно мала, тому для отримання достатньої перешкодостійкості у зворотній лінії застосовують довгу ПВП ( $N=2^{42}-1$ ). ФУА у зворотному каналі призначені для деякого підвищення перешкодостійкості відносно системних перешкод. Модулятор  $W(t)$  ставить у відповідність кожній групі з 6 бітів інформаційного повідомлення одну з 64 ФУА ( $2^6=64$ ). Спектр розширюється за рахунок довгої ПВП. Під час передачі всі РС застосовують ПВП з різними циклічними зсувами, що дає змогу приймачу БС розділяти сигнали різних РС. Кінцеве формування сигналу аналогічне до БС, відрізняється воно лише елементом затримки  $\tau_0/2$  у Q-каналі (він встановлений з метою реалізації зміщеної (Offset) QPSK). Ємність кожної чарунки мережі CDMA визначає кількість каналів передачі РС, за якої забезпечується відповідна якість зв'язку. У години найбільшого навантаження якість зв'язку зменшується, особливо периферійних РС, що призводить до зміни розмірів зони обслуговування («дихання» стільника — «cell breathing»). З метою максимізації абонентської ємності системи на вході приймача БС необхідно забезпечувати однакові рівні сигналів від усіх РС. Чим точніше керування потужністю, тим вища абонентська ємність системи. Сучасні системи керують потужністю РС із точністю до 0,5—1 дБ.

## 2.7. Цифрова стільникова система рухомого зв'язку стандарту GSM

### 2.7.1. Загальні характеристики стандарту GSM

У стандарті GSM застосовують вузькосмуговий багатостанційний доступ з часовим розділенням каналів (NB TDMA)\*. У структурі TDMA-кадру міститься 8 часових позицій для кожної з 124 несучих. Для захисту від помилок у радіоканалах під час передачі інформаційних повідомлень застосовують блокове та згортокове кодування з перемежуванням. Підвищення ефективності кодування та перемежування за умови відносно малої швидкості переміщення рухомих станцій вдається досягти шляхом повільного перемикання робочих частот (SFH) у процесі сеансу зв'язку зі швидкістю 217 стрибків за секунду. Для боротьби з інтерференційними завмираннями сигналів, що виникають в умовах багатопробеневого поширення хвиль в апаратурі зв'язку, використовують еквалайзери, які забезпечують вирівнювання імпульсних сигналів зі середньоквадратичним відхиленням часу затримки до 16 мкс. Система синхронізації мережі розрахована на компенсацію абсолютного часу затримки сигналів до 233 мкс, що відповідає максимальній дальності зв'язку або максимальному радіусу розміщення стільника – 35 км. У стандарті вибрана гауссівська маніпуляція з мінімальним зсувом (GMSK). Обробка мови відбувається у рамках прийнятої системи передачі мови з перервами (DTX), яка забезпечує вмикання передавача тільки за умови наявності мовного сигналу.

Як мовоперетворювач у стандарті вибрано мовний кодек з регулярним імпульсним збудженням, довгостроковим передбаченням і лінійним предикативним кодуванням з передбаченням (RPE/LTP-LPC кодек). Загальна швидкість перетворення сигналу мови дорівнює 13 кбіт/с. За стандартом передбачено високий ступінь безпеки передачі повідомлень; шифрування повідомлень за алгоритмом з відкритим ключем (RSA). У цілому система зв'язку, що функціонує в стандарті GSM, розрахована на застосування у різних сферах. Вона здатна надавати користувачам широкий діапазон послуг та має інтерфейси обміну з *мережами загального користування (PSTN), мережами передачі даних (PDN) та цифровими мережами з інтеграцією служб (ISDN)*. Функціональну будову та інтерфейси, прийняті в стандарті GSM, можна розглянути за структурною схемою (рис. 2.16).

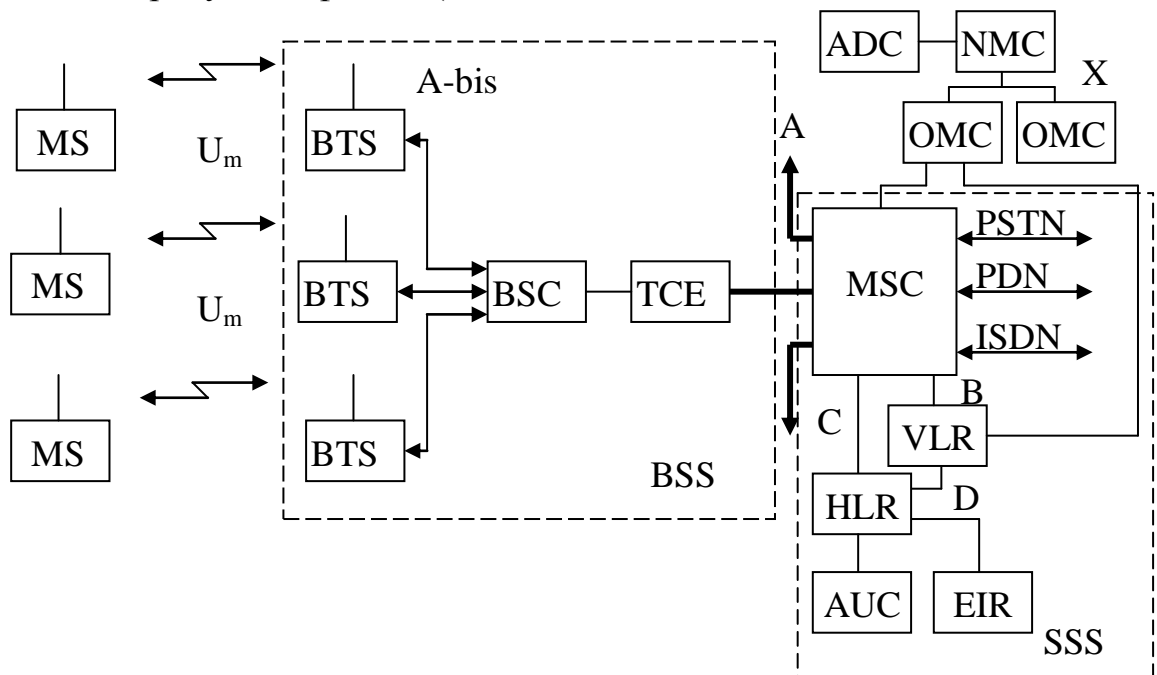
Функціональне спряження елементів системи здійснюється за допомогою ряду інтерфейсів. Усі функціональні компоненти мережі у стандарті GSM взаємодіють відповідно до системи сигналізації МККТТ SS №7.

Центр комутації рухомого зв'язку обслуговує групу стільників та забезпечує всі види з'єднань, необхідні будь-якій PC. MSC аналогічний ISDN комутаційної станції і являє собою інтерфейс між фіксованими мережами та мережею рухомого зв'язку. Крім функцій звичайної комутаційної станції MSC виконує функції комутації радіоканалів за естафетної передачі PC зі стільника на стільник, а також у разі виникнення несправностей елементів системи. Кожен MSC забезпечує обслуговування рухомих абонентів, які знаходяться в межах визначеної географічної зони (місто та приміські райони або місто та область). MSC керує операціями встановлення виклику та його маршрутизації. Для телефонної мережі загального користування MSC забезпечує виконання функції сигналізації за протоколом SS№

---

\* Тут і далі вжито стандартні аббревіатури, що відповідають скороченим назвам елементів, каналів та алгоритмів системи GSM.

7, передачі виклику або інші види інтерфейсів відповідно до вимог конкретного проекту. MSC формує дані для здійснення розрахунків між абонентами та оператором за надані послуги, складає статистичні дані, потрібні для контролю роботи і оптимізації мережі. MSC підтримує процедури безпеки, які регламентують доступ до радіоканалів, керує процедурами реєстрації місцеположення і передачі керування, крім передачі керування в підсистемі БС (BSS). Реєстрація місцеположення РС необхідна для забезпечення доставки виклику рухомим абонентам або від абонентів стаціонарної мережі чи інших РС. Процедура передачі виклику дозволяє зберігати з'єднання та забезпечувати ведення розмови, коли РС переміщується з однієї зони обслуговування в іншу. Стільниками керує один *контролер базових станцій* (BSC). Він зазвичай і передає виклик у стільниках. Коли виклик передається між мережами, якими керують різні BSC, то первинне керування покладають на MSC. У стандарті GSM також передбачені процедури передачі виклику між мережами, якими керують різні MSC. ЦК здійснює постійний нагляд за РС з використанням *реєстрів положення* (HLR) та *реєстрів переміщення* (VLR). У HLR зберігається частина інформації про місцеположення будь-яких РС, яка дозволяє центру комутації доставити виклик рухомому абоненту. Крім того, HLR містить ідентифікаційний номер рухомої станції (IMSI), який слугує для її розпізнавання в центрі аутентифікації (AUC).



**Рис. 2.16. Структурна схема та інтерфейси системи GSM:**

MSC (Mobile Switching Centre) – центр комутації рухомого зв'язку; BSS (Base Station System) – система базової станції (обладнання БС); OMC (Operations and Maintenance Centre) – центр керування та обслуговування

Практично HLR являє собою довідкову базу даних про абонентів, постійно прописаних у мережі. У такій базі зберігається інформація про спеціальні номери та адреси контрактних абонентів, параметри ідентифікації та аутентифікації РС, послуги, що надаються абонентам, спеціальна інформація для маршрутизації виклику, дані про роумінг абонентів, у тому числі про тимчасовий ідентифікаційний

номер рухомого абонента (TMSI) та номер відповідного VLR. До інформації, наявної в HLR, мають дистанційний доступ усі MSC та VLR мережі, причому навіть інших операторів (у межах міжмережевого роумінгу абонентів). Основне навантаження щодо контролю за переміщеннями PC має реєстр переміщення VLR. За його допомогою PC здатна працювати за межами, які контролює HLR. Коли PC переходить із однієї зони, контрольованої відповідним контролером БС, до іншої зони, де контроль здійснює і реєструє інший контролер БС, у VLR записують інформацію про номер області зв'язку, у яку необхідно доставити виклик. VLR містить такі ж дані, як і HLR, але вони зберігаються доти, доки PC знаходиться в зоні, контрольованій відповідним VLR.

У стандарті рухомого зв'язку GSM стільники групуються в географічні зони (LA), яким надають власний ідентифікаційний номер (LAC). Кожен VLR зберігає дані про абонентів декількох LA. Коли PC переміщується з однієї LA в іншу, дані про її місцезнаходження автоматично поновлюються у VLR. Якщо «початковою» та «кінцевою» LA керують різні VLR, то дані в «початковому» VLR знищують після їх копіювання у новому VLR. Поточна адреса VLR абонента, яка зберігається у HLR, також поновлюється. VLR надає PC ознаки ромера — тимчасовий номер, який призначає VLR (MSRN). Коли PC приймає вхідний виклик, VLR визначає її MSRN та передає його в ЦК, який здійснює маршрутизацію цього виклику до БС, найближчих до PC. Щоб запобігти несанкціонованому використанню ресурсів системи зв'язку, вводять механізми аутентифікації – «посвідчення» абонента. Центр аутентифікації має декілька блоків і формує ключі та алгоритми аутентифікації. Кожен рухомий абонент на час користування системою зв'язку отримує стандартний модуль дійсності абонента (SIM), який має:

- міжнародний ідентифікаційний номер (IMSI);
- власний індивідуальний ключ аутентифікації (Ki);
- алгоритм аутентифікації (A3).

EIR – реєстр ідентифікації обладнання, який має централізовану базу даних для підтвердження дійсності міжнародного ідентифікаційного номера PC (IMEI). Ця база належить виключно до PC та має списки номерів IMEI, організовані таким чином:

- «білий список» має номери IMEI, про які є відомості, що вони закріплені за санкціонованими абонентами;
- «чорний список» має номери IMEI PC, вкрадених або яким було відмовлено в обслуговуванні з іншої причини;
- «сірий список» містить номери IMEI PC, у яких існують проблеми, виявлені програмним забезпеченням, але це не має підстав для занесення PC до «чорного списку».

ОМС – центр експлуатації і технічного обслуговування, головний елемент мережі GSM, який забезпечує контроль за компонентами мережі та якістю її ро-

боти, а також керування цими компонентами. Він виконує функції обробки аварійних сигналів, призначених для оповіщення персоналу, реєструє відомості про аварійні ситуації в інших компонентах мережі. Залежно від характеру несправності ОМС забезпечує їх автоматичне усунення або за активної участі персоналу. Крім того, він перевіряє стан обладнання мережі та керує її навантаженням шляхом збору статистичних даних про навантаження від компонентів мережі та виведення їх на дисплей для візуального аналізу.

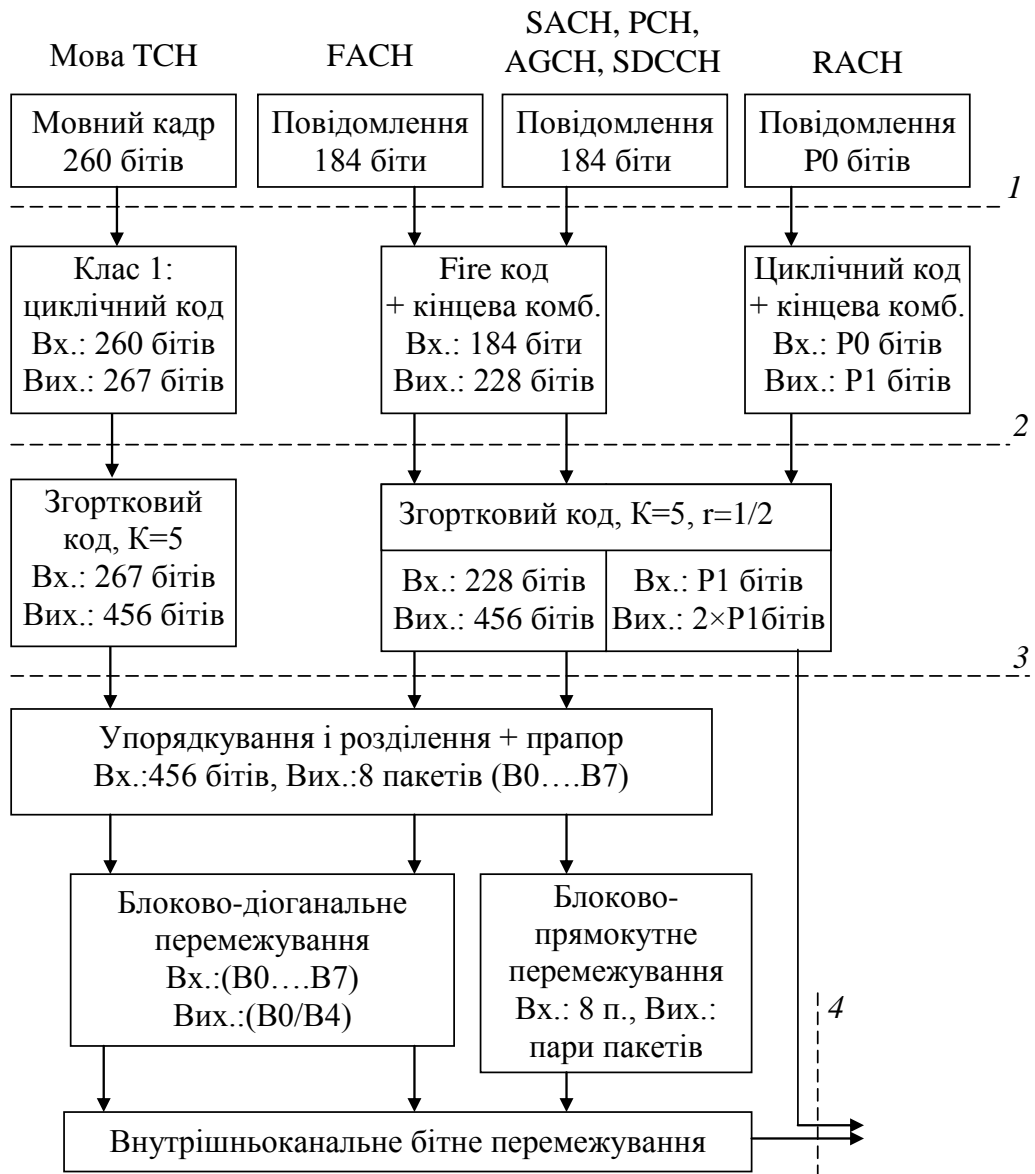
NMC – центр керування мережею, що забезпечує ієрархічне керування системою GSM і її технічне обслуговування на всіх рівнях з підтримкою центрами ОМС, які відповідають за керування регіональними мережами. NMC забезпечує керування трафіком всієї системи та виконання диспетчерських функцій у разі складних аварійних ситуацій. Крім того, він контролює стан пристроїв автоматичного керування та видає інформацію на дисплей для операторів NMC. Це дозволяє операторам NMC контролювати регіональні проблеми та надавати допомогу ОМС, що відповідає за конкретний регіон.

BSS – система БС, що має контролер БС (BSC), і приймально-передавальних станцій (BTS). Система БС керує розподіленням радіоканалів; контролює з'єднання і їх черговість; забезпечує режим роботи зі стрибками за частотою, модуляцію та демодуляцію, кодування та декодування; кодування мови; адаптацію швидкості передачі як для мови, так і для повідомлень.

TCE – транскодер, який забезпечує перетворення вихідних сигналів каналу передачі мови MSC (64 кбіт/с, ІКМ) до вигляду, що відповідає інтерфейсу GSM (13 кбіт/с). Зазвичай TCE розташовують разом із MSC, тоді повідомлення в напрямку BSC передається із додаванням до потоку 13 кбіт/с допоміжних бітів до утворення потоку 16 кбіт/с. Потім відбувається ущільнення з кратністю 4, у результаті чого утворюється стандартний канал 64 кбіт/с. Так формується визначена стандартом GSM 30-канальна ІКМ лінія, яка забезпечує передачу 120 мовних каналів. Результуюча швидкість передачі при цьому залежить від параметрів потоку E1.

### **2.7.2. Узагальнена характеристика каналного кодека стандарту GSM**

Для кожного з відомих ЛК розробники стандарту GSM вибрали різні методи перешкодостійкого кодування. Це пов'язано з тим, що властивості мовних каналів і каналів керування значно відрізняються. Для мовного каналу необхідний зв'язок у реальному масштабі часу з невеликою затримкою і відносно низькими вимогами до ймовірності помилки в каналі. Для каналу керування потрібна абсолютна достовірність, але допустимі більші затримка і час передачі. Повну послідовність виконання операцій кодування і перемежування для всіх каналів зв'язку та керування наведено далі (рис. 2.17).



**Рис. 2.17. Операції кодування і перемежування для всіх каналів зв'язку та керування стандарту GSM**

1 – інформаційні біти; 2 – інформаційні біти і кінцева комбінація; 3 – кодовані біти; 4 – перемежування бітів

## 3. ТЕХНОЛОГІЇ ПОКОЛІННЯ 4G

### 3.1. Мережі бездротового доступу WiMAX

#### 3.1.1. Основні принципи побудови мережі WiMAX

Мережа WiMAX являє собою сукупність бездротового і базового (опорного) сегментів. Перший описано в стандарті IEEE 802.16, другий визначено специфікаціями WiMAX-форуму. Базовий сегмент — зв'язок БС одна з одною, зв'язок з локальними та глобальними мережами і т.д. Він не належить до радіомережі. Базовий сегмент ґрунтується на IP-протоколах (IETF RFC) і стандартах Ethernet (IEEE 802.3-2005). Однак власне архітектура мережі, у тому числі механізми аутентифікації, криптозахисту, роумінгу, хендовери тощо (у частині, що не належить до бездротової мережі), описані в документах WiMAX Forum Network Architecture. Специфікації мережі WiMAX засновані на технології пакетної комутації, протоколах IP і Ethernet і доповнюють їх у міру необхідності. Архітектура WiMAX-мережі повинна забезпечувати незалежність архітектури мережі доступу, враховуючи радіомережу, від функцій і структури транспортної IP-мережі. Мережа WiMAX повинна легко масштабуватися і гнучко змінюватися, ґрунтуватися на принципах декомпозиції (тобто будуватися на основі стандартних логічних модулів, об'єднаних через стандартні інтерфейси). Масштабованість і гнучкість можлива за таких експлуатаційних параметрів, як щільність абонентів, географічна протяжність зони покриття (районна, міська або приміська мережа), частотні діапазони, топологія мережі (ієрархічна, плоска, mesh і т.д.), мобільність абонентів [3].

#### 3.1.2. Базова модель мережі

Базова модель (БМ) мережі WiMAX — це логічне уявлення мережевої архітектури WiMAX. Термін «логічне» у даному випадку означає, що модель розглядає набір стандартних логічних функціональних модулів і стандартних інтерфейсів (точок поєднання цих модулів). Під час практичної реалізації один пристрій може мати декілька функціональних елементів або, навпаки, функція може бути розподілена між різними пристроями.

БМ включає три основні елементи – безліч абонентських (мобільних) станцій (МС), сукупність мереж доступу (сервісна мережа доступу, ASN) і сукупність мереж підключення (CSN). Крім того, у БМ входять так звані базові точки (R1-R8) (рис. 3.1). Мережі ASN належать провайдеру мережі доступу (NAP) — організації, яка надає доступ до радіомережі для одного або декількох сервіс-провайдерів WiMAX (NSP). У свою чергу, сервіс-провайдер WiMAX – організація, що надає IP-з'єднання та послуги WiMAX кінцевим абонентам. У межах даної моделі вже сервіс-провайдери WiMAX укладають угоди з Інтернет-провайдерами, операторами інших мереж доступу, угоди про роумінг і т.д. Сервіс-провайдери щодо абонента можуть бути домашніми і гостьовими, кожен — зі своєю мережею CSN. Мережа доступу ASN являє собою велику кількість базових станцій (БС) бездротового доступу за стандартом IEEE 802.16 і шлюзів для зв'язку з транспортною IP-мережею (тобто локальною або глобальною мережею

передачі інформації) (рис. 3.2). Фактично ця мережа пов'язує радіомережу IEEE 802.16 і IP-мережу. ASN включає як мінімум одну БС і як мінімум один ASN-шлюз. Але і БС, і шлюзів в одній ASN може бути декілька, причому одна БС може бути логічно пов'язана з декількома шлюзами.

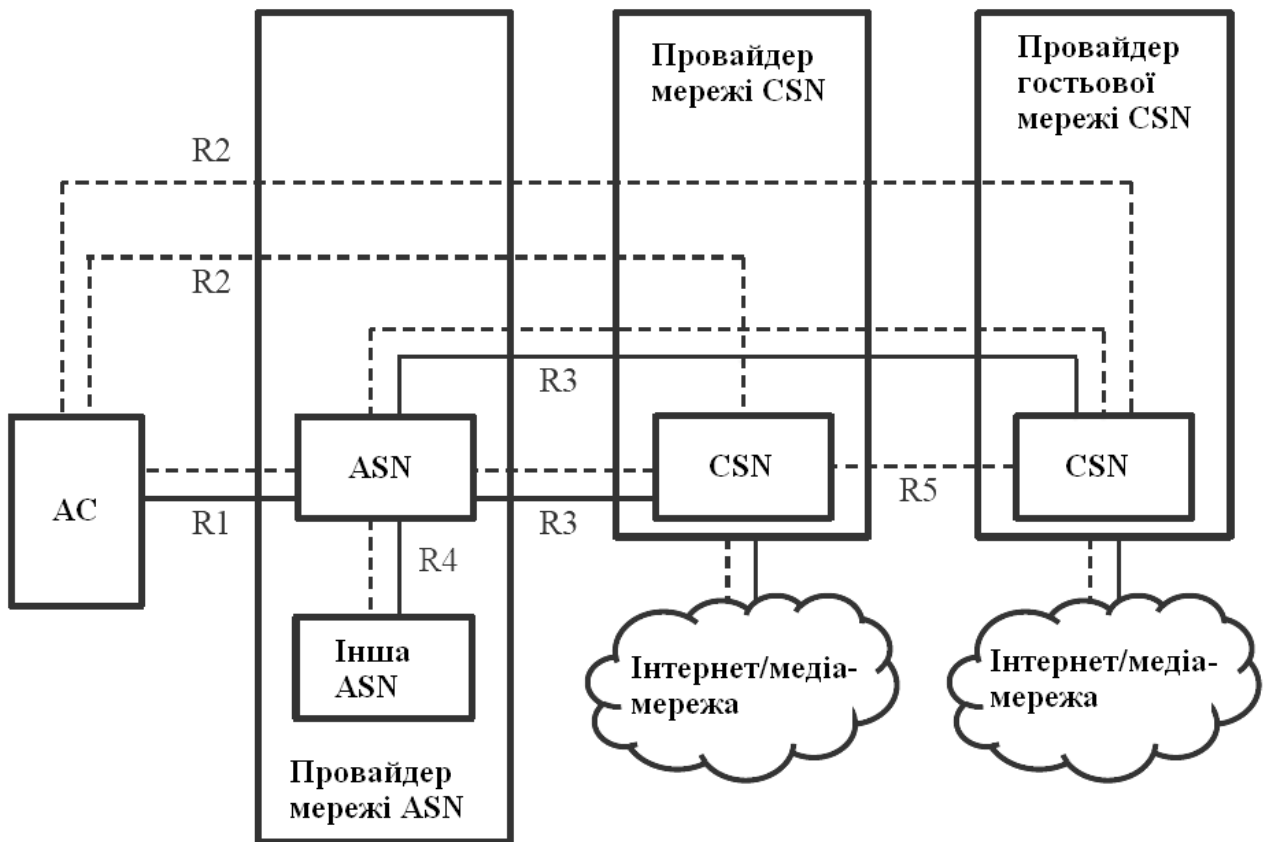


Рис. 3.1. Базова модель мережі WiMAX:

----- потоки даних; — потоки керування

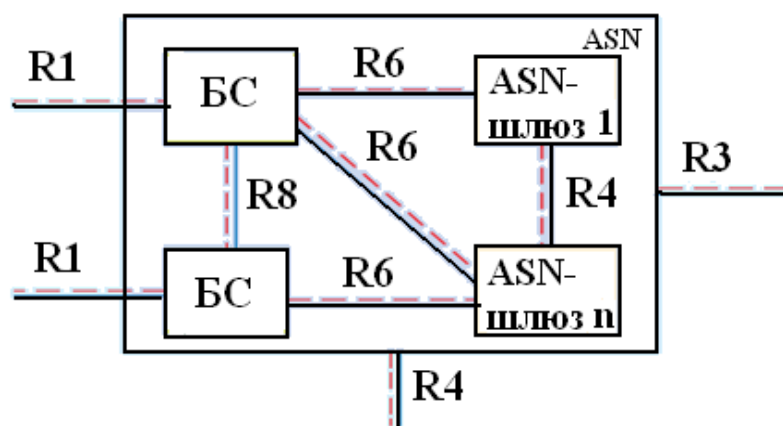


Рис. 3.2. Логічна модель мережі доступу ASN

БС у межах даної моделі – це логічний пристрій, що підтримує набір протоколів IEEE 802.16 і функції зовнішнього сполучення. Логічна БС односекторна, з одним частотним номіналом. Очевидно, що реальна БС являє собою набір декількох логічних БС. Шлюз ASN — це також логічний пристрій, що зв'язує БС одно-



го ASN з іншими мережами доступу і мережею підключення CSN. Шлюз ASN забезпечує зв'язність як на рівні каналів передачі даних, так і на рівні керування. Для кожної MC базова станція логічно пов'язана з одним шлюзом. Але реально функції ASN-шлюзу для кожної MC можуть бути розподілені між кількома шлюзами, що належать одній або декільком мережам доступу. Шлюз ASN опціонально може бути представлений як сукупність двох груп функціональних елементів – блока рішення (DP – Decision Point) і блока виконання (EP-Enforcement Point). EP реалізує функції, пов'язані з передачею потоку даних, у той час як у DP зосереджені функції, безпосередньо не пов'язані з передачею даних (наприклад, функції контролера керування радіоресурсу мережі). Ці два функціональні модулі з'єднані через базову точку R7. Ніде докладно вона не розкрита, але без згадки про можливість такої декомпозиції функцій ASN-шлюзу неможливо пояснити наявність R7. Загалом розподіл функцій між реальними шлюзами і БС визначений так званими профілями ASN. На сьогодні їх затверджено три (А, В і С).

**Мережа підключення CSN** – це власне мережа оператора WiMAX, саме в ній реалізуються функції керування авторизацією, аутентифікацією і доступом (AAA), підключення абонентів WiMAX до глобальних IP-мереж, надання таких послуг, як IP-телефонія, доступ до телефонних мереж загального користування, доступ до Інтернету і приватних мереж тощо. Важливо відзначити, що БМ мережі WiMAX припускає, що однією мережею доступу ASN можуть користуватися кілька сервіс-провайдерів WiMAX. І навпаки, одна CSN може підключатися до мереж різних провайдерів доступу. У CSN реалізовані такі функції, як надання мобільним абонентам IP-адрес і інших мережевих параметрів на період мережевої сесії, сервер політик/контролю доступу та зберігання профілів абонентів, передача (тунелювання) даних між мережами доступу та підключення, білінг абонентів WiMAX і міжоператорські розрахунки, тунелювання даних між різними CSN у разі роумінгу, забезпечення мобільності під час виходу MC за межі однієї ASN. Підтримуються такі WiMAX-послуги, як з'єднання «точка-точка», авторизація та/або підключення до мультимедійних IP-сервісів, функції легального перехоплення трафіка і т.д. CSN може включати такі елементи, як маршрутизатори, сервери (прокси-сервери) для функцій аутентифікації та доступу, бази даних користувачів, шлюзи і т.д. У зв'язку з підтримкою мобільності в базовій моделі мережі WiMAX введено поняття домашніх і гостьових сервіс-провайдерів – H-CSP і V-CSP відповідно.

Домашній NSP — це оператор, який уклав договір про обслуговування з абонентом WiMAX. Саме він реалізує функції авторизації, аутентифікації і контролю доступу (у тому числі білінг і стягнення абонентської плати). Для підтримки роумінгу домашній сервіс-провайдер WiMAX укладає роумінгові угоди з іншими NSP.

Гостьовий NSP (V-NSP) — це оператор, який надає WiMAX-абоненту послуги роумінгу. Перш за все V-NSP забезпечує для такого абонента функції AAA, а також повний або частковий доступ до всіх послуг WiMAX-мережі. При цьому можливі різні варіанти маршрутизації трафіка – через домашню мережу підключення або безпосередньо через гостьову CSN-мережу.

**Базові точки** в рамках БМ мережі WiMAX — це канали зв'язку між базовими модулями. Вони являють собою стандартні інтерфейси, причому не обов'язково фізичні, особливо якщо з'єднані базовою точкою модулі конструктивно знаходяться в одному пристрої.

**Базова точка R1** являє собою канал зв'язку між МС і мережею доступу ASN. Це — бездротовий інтерфейс, відповідний стандарту IEEE 802.16, однак припустимі й додаткові протоколи керування.

**Базова точка R2** — канал між МС і CSN. Вона включає протоколи і процедури, пов'язані з аутентифікацією МС, авторизацією і IP-конфігуруванням. Це суто логічний інтерфейс, йому не відповідає жоден конкретний фізичний інтерфейс між МС і CSN.

**Базова точка R3** містить набір протоколів керування між ASN і CSN для реалізації процедур AAA, виконання різних політик і керування мобільністю. Вона також підтримує функції передачі даних (у тому числі тунелювання) між ASN і CSN.

**Базова точка R4** — це канал зв'язку між ASN-шлюзами різних ASN-мереж або між ASN-шлюзами в межах однієї ASN.

**Базова точка R5** — канал зв'язку між мережею домашнього і гостьового сервіс-провайдерів.

**Базова точка R6** служить інтерфейсом між БС і ASN-шлюзом.

**Базова точка R7** — віртуальний канал всередині ASN-шлюзу для зв'язку двох груп функцій (пов'язаних і не пов'язаних з каналом передачі інформації). Конкретизації протоколів R7 слід очікувати в майбутньому.

**Базова точка R8** — це канал зв'язку безпосередньо між базовими станціями. Він повинен підтримувати передачу керувальних повідомлень і опціонально — безпосередню трансляцію даних (для швидкого й безшовного хендовера).

### 3.1.3. Профілі ASN

Профілями ASN називають розподіл логічних функцій ASN-мереж між фізичними пристроями. У стандарті описано три типи ASN-профілів. Профілю В відповідає як концентрація всіх функцій в одному пристрої, так і їх довільний розподіл. Профілі А і С більш конкретні. На рівні опису вони надзвичайно схожі. Різниця полягає в тому, що функції контролера радіоресурсу (RRC) та керування хендовером у профілі А належать до ASN-шлюзу, а в профілі С — до БС. Однак незначні формальні відмінності на практиці призвели до того, що профіль А був офіційно закритий влітку 2007р. на сесії WiMAX-форуму в Мадриді, а загально-визнаним стандартом став профіль С. Дійсно, профіль А, концентруючи функції керування в ASN-шлюзі, ускладнює сумісність обладнання різних постачальників. У профілі В інтелект БС зростає, вони відіграють важливу роль в керуванні трафіком і мобільністю. Профіль С — найбільш відкрита і тому перспективна система. У ньому на відміну від профілю А БС відповідають за керування радіоресурсом і забезпечення хендовера. В ідеальному випадку всі елементи такої системи взаємозамінні на продукти інших постачальників, сертифікованих WiMAX Forum [3].

### 3.1.4. Підтримка мобільності

Уся робота з опису і стандартизації мереж WiMAX має одну мету — забезпечити глобальну мобільність абонентів WiMAX, їх свободу переміщатися між різними мережами в усьому світі, не втрачаючи зв'язку. Для цього необхідний механізм глобального розподілу загальних мережевих ресурсів між різними операторами-провайдерами. Можливі кілька різних варіантів розподілу мережевих ресурсів: однією ASN-мережею користуються декілька CSN-провайдерів, кілька ASN-мереж (одного або кількох операторів) взаємодіють з різними CSN, одному оператору належить ASN і CSN тощо.

Нагадаємо, що WiMAX — це TCP/IP-мережа. З позиції IP-мережі мобільність — це можливість ідентифікувати пристрої, підключені до різних версій сайту глобальної мережі. Для підтримки мобільності були створені специфікації мобільних IP-мереж (MIP). У мобільних IP-мережах питання забезпечення мобільності пристроїв вирішують на основі двох основних механізмів — призначення глобальної додаткової IP-адреси або використання зовнішнього агента (рис.3.3).

Протокол мобільного IP: у кожного пристрою є дві IP-адреси — основна (HoA), присвоєна йому в домашній мережі, і додаткова (CoA). Якщо пристрій з'являється в новій мережі (зовнішній), йому може бути присвоєна глобальна додаткова IP-адреса (наприклад, на основі протоколу динамічного призначення адрес DHCP). Цю адресу пристрій повідомляє своєму домашньому агенту (HA – home agent) – маршрутизатору, який перехоплює всі повідомлення за основною IP-адресою даного пристрою і направляє їх з додаткового IP (як правило, у режимі тунелювання та інкапсуляції IP-в-IP).

Другий механізм забезпечення мобільності полягає в тому, що в зовнішній мережі використовується так званий зовнішній агент (FA, foreign agent). Це маршрутизатор, у якому пристрій реєструється в разі підключення до зовнішньої мережі. FA як додаткову IP-адресу присвоює пристрою адресу зі свого пулу IP-адрес. Додаткова адреса CoA служить тільки для мережевої взаємодії. Усі користувацькі додатки, наявні на мобільному пристрої і в інших вузлах мережі, застосовують основну IP-адресу (рис.3.4).

WiMAX-мережа орієнтована на підтримку стека протоколів MIP. Проте в мережах WiMAX не всі абонентські пристрої зобов'язані підтримувати мобільний IP. Причому DHCP-сервер може знаходитися як у домашній, так і в гостьовій мережі. Можливе його розміщення і в мережі ASN. У такому випадку інформація про IP-адресу абонентської станції передається в домашню мережу під час її підключення та аутентифікації.

У WiMAX-мережах виділяють два види мобільності — мікро- й макромобільність [3]. Також їх називають ASN- і CSN-мобільність. Таким чином, для ASN-мобільності не потрібна підтримка протоколів рівня MIP. На рівні ASN-мобільності реалізується хендовер у межах однієї ASN-мережі. При цьому до процесу залучаються тільки інтерфейси R6 (між БС шлюзами) і R8 (між базовими станціями).

Відзначимо особливий випадок ASN-мобільності, коли МС виходить за межі однієї ASN і потрапляє в іншу (рис. 3.5). При цьому МС підключається до нового зовнішнього агента, але дані від цього FA передаються до колишнього зов-

нішнього агента по каналу R4. Очевидно, що в даному випадку з боку мережі CSN (тобто домашнього агента) жодних змін не відбулося.

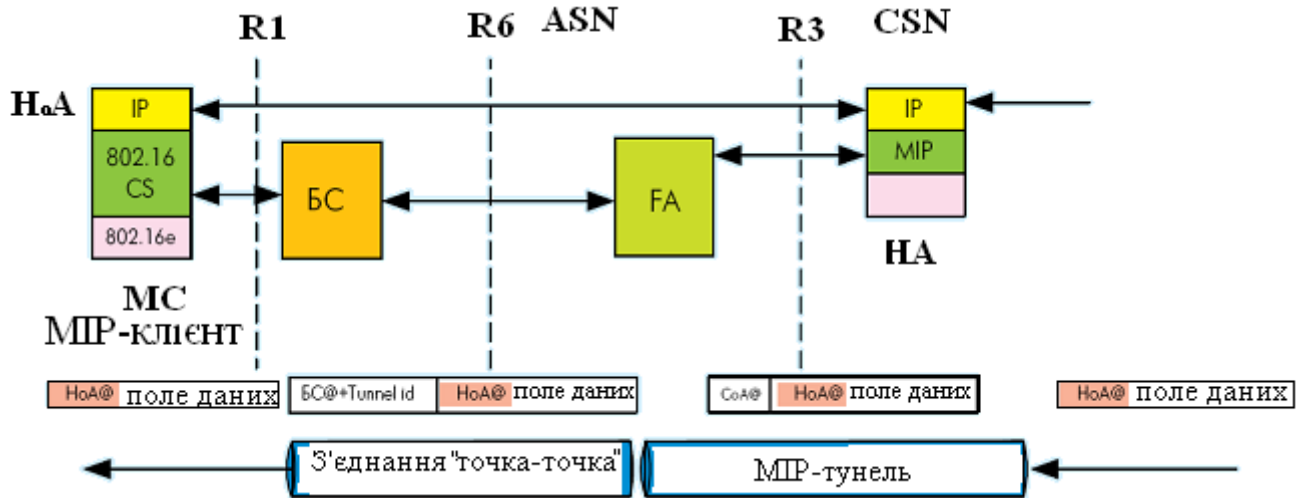


Рис. 3.3. Передача пакетів у WiMAX-мережі з підтримкою MIP

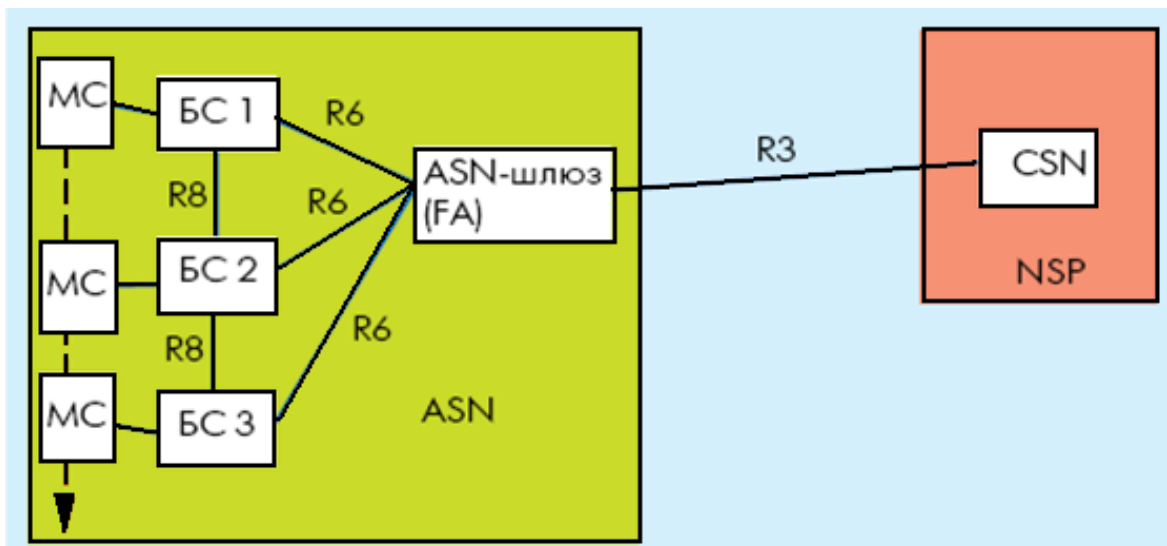


Рис. 3.4. ASN-мобільність за хендвера в межах однієї ASN-мережі

**Макромобільність** — зміна зовнішнього агента, пов'язаного з HA по каналу R3. Зміна зовнішнього агента однозначно обумовлює зміну CoA-адреси MS. У цьому випадку зміни стосуються мережевого рівня, тобто рівня інтерфейсу R3. Тому даний вид мобільності ще називають R3-мобільністю. Оскільки MS можуть не підтримувати функції мобільного IP, стандарт WiMAX-мереж передбачає два сценарії CSN-мобільності — з підтримкою MIP-клієнтів (CMIP) і проксі-мобільний IP (PMIP). У першому випадку MIP-клієнт реалізований у кожній мобільній станції, у другому як мобільний вузол розглядають усю ASN-мережу, а зовнішній агент є MIP-клієнтом і виконує функції проксі-сервера MIP. Важливо зазначити, що різні механізми мобільності можуть співіснувати в межах однієї інтегрованої мережі. Більше того, можлива оптимізація підключення.

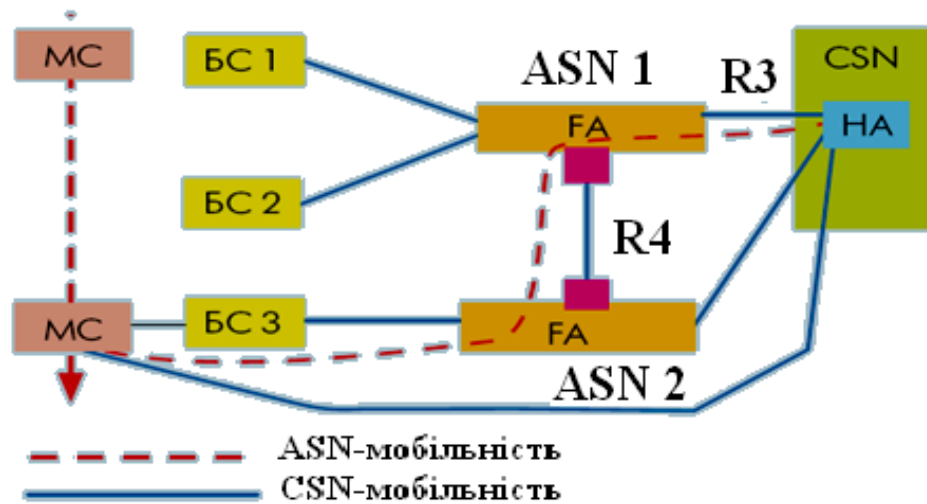


Рис. 3.5. Перехід від моделі ASN-мобільності до CSN-мобільності

Усі розглянуті вище функції належать до основної на сьогодні версії TCP/IP-протоколів — IPv4. Однак на зміну їм прийшла нова версія IPv6. Основна причина її появи — брак адресного простору, обумовлений 32-розрядною IP-адресою, а також відсутність вбудованої підтримки QoS (Quality of Service). У новій версії передбачені 128-розрядні адреси, крім того, що важливо для мобільних мереж, — так звана альтернативна адреса. Вона може бути присвоєна групі пристроїв, розподілених у мережі, але пакет надходить тільки до найближчого вузла з такою адресою. Запланована також маршрутизація, яка виключить обов'язкову передачу пакетів через домашнього агента. Немає необхідності і в зовнішньому агенті, так само як і в інкапсуляції вихідних IP-пакетів під час їх трансляції мобільному вузлу. Замість зовнішнього агента застосовують маршрутизатор доступу (AR — access router).

### 3.1.5. Керування радіоресурсом

Функція ефективного керування радіоресурсами — одна з найважливіших у будь-якій безпроводній мережі. Оскільки стандарт IEEE 802.16 розглядає тільки взаємодію однієї БС з оточуючими її абонентськими станціями, питання спільної роботи декількох базових станцій належать до компетенції стандартів WiMAX-мереж. Ці функції зосереджені в ASN-сегменті або в БС (профіль С), або в ASN-шлюзі (профіль А).

Функції керування радіоресурсами реалізують два логічні пристрої — контролери радіоресурсу:

- Radio Resource Controller (RRC);
- агент радіозасобів (Radio Resource Agent — RRA).

У кожній БС (і тільки в БС) повинен бути свій RRA. Навпаки, контролер RRC може розташовуватися як у БС, так і в ASN-шлюзах або на окремих серверах у межах ASN-мережі. Але, оскільки фактично стандартним став ASN-профіль С, будемо розглядати тільки розміщення функцій RRC у БС. У цьому випадку виникає потреба в додатковому логічному пристрої — RRC-ретрансляторі, розташованому в ASN-шлюзах і призначеному для обміну керувальною інформацією між RRC-контролерами (рис. 3.6). При цьому обмін відбувається через інтерфейси R6

і R4. Однак, якщо БС безпосередньо пов'язані одна з одною каналом R8, можливий обмін повідомленнями між RRC-контролерами даних БС і через цей інтерфейс.

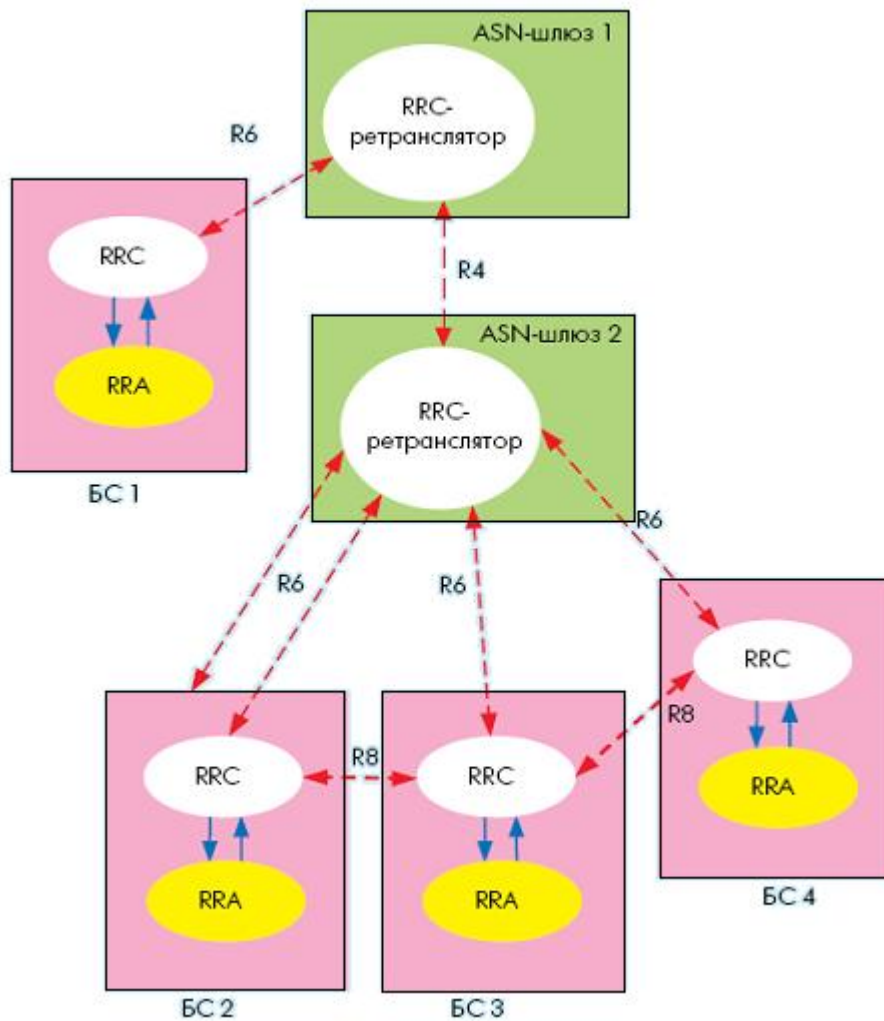


Рис. 3.6. Базова модель системи для ASN-профілю С

Основні функції, які реалізує RRA, — збір інформації про радіостановище навколо БС і керування нею. Види вимірів і методика їх проведення вказані в стандарті IEEE 802.16. Крім того, RRA збирають і інформацію про вимірювання параметрів протоколів верхніх рівнів, наприклад, інтенсивність помилок передачі пакетів MAC-рівня. До завдання цього пристрою входить і трансляція керувальної інформації від RRC до MC радіослуг. Характерний приклад такої інформації — перелік сусідніх БС та їх параметрів. У свою чергу, основна функція контролера RRC — збір і зберігання інформації від пов'язаних із ним RRA та взаємодія з іншими контролерами RRC.

Таким чином, основне завдання керування радіоресурсом — це ініціювання процедур вимірювання параметрів радіомережі, збір цих відомостей від усіх БС та їх збереження в загальнодоступній базі даних мережі. Цю інформацію застосовують для керування хендовером, забезпечення якості обслуговування QoS і т.д. Крім того, стандартом передбачені: можливість вимірювання таких параметрів, як рівень потужності сигналів БС і рівень інтерференції; передача таких керувальних

повідомлень, як реконфігурація субканалів у заданому секторі БС, зміна максимальної потужності сигналу БС, зміна таблиць розподілу ресурсів БС, у тому числі — співвідношення між висхідним і спадним субкадрами в режимі тимчасового дуплексування (TDD), трансляція дескрипторів висхідного/спадного каналів (UCD/DCD) між сусідніми БС, зміна широкомовної інформації та ін.

### 3.1.6. Режим очікування та пейджингу

Важлива особливість мобільних мереж WiMAX — підтримка режиму очікування (idle mode) і пов'язаного з ним пейджингу [3; 14]. Функції даного режиму описані в стандарті IEEE 802.16e, проте їх реалізація можлива лише за використання мережевого обладнання. У режимі очікування МС трансивери вимкнені, короткочасно вмикаються приймачі для визначення місця розташування і з'ясування, чи не спрямоване на їх адресу яке-небудь повідомлення. Оскільки такі пристрої можуть вийти із зони обслуговування певної БС, інформацію для них передають у широкомовному режимі, але не всі БС, а тільки ті, що належать до пейджингової групи, у якій зареєстрована ця МС. МС у періоди короткочасного прослуховування ефіру визначає, чи не вийшла вона за межі своєї пейджингової групи, а якщо вийшла — реєструється в новій. Зазначимо, що стандарт WiMAX-мережі конкретизує визначення пейджингової групи, якого немає у специфікації IEEE 802.16e. З позиції базової моделі WiMAX-мережі пейджингова група — це множина з однієї або декількох БС. Причому до однієї пейджингової групи можуть належати тільки БС, що знаходяться в межах ASN-мережі (мереж) одного провайдера.

Режим очікування підтримують три логічні елементи WiMAX-мережі — пейджинговий агент (РА — Paging Agent), контролер пейджингу (КП) (Paging Controller) і реєстр місцеположення (LR — Location Register). Пейджинговий агент — це логічна функція БС. Вона забезпечує сполучення протоколів пейджингу радіомережі (MAC-рівень стандарту IEEE 802.16e) і протоколів опорної мережі WiMAX. Останній підтримує КП. Він може розташовуватися як безпосередньо в БС (ASN-профіль В), так і поза нею (профіль С). В останньому випадку для зв'язку РА і КП служить інтерфейс R6. Щодо МС контролер пейджингу може бути анкерним (базовим) або ретрансляційним. Кожна МС у режимі очікування пов'язана тільки з одним анкерним КП. Він зберігає і оновлює інформацію про місцезнаходження МС. Якщо МС опиняється в зоні дії БС, безпосередньо не пов'язаної з її анкерним КП по каналу R6, використовують ретрансляційний пейджинговий контролер (або кілька контролерів), який передає інформацію про місцезнаходження МС її анкерному КП по каналах R4.

Реєстр місця розташування — це розподілена база даних, із якою пов'язаний кожен анкерний КП. У цій базі даних для будь-якої МС зберігається інформація про поточну пейджингову групу, пейджинговий цикл і зсув, ідентифікатор останніх БС і останнього ретрансляційного КП. Для МС у режимі очікування в LR також зберігаються мережеві настройки (згідно з IEEE 802.16e) та інформація про сервісні потоки даної МС. Цю інформацію використовує анкерний КП для визначення ймовірного місця розташування МС і передачі їй повідомлень, а

також для спрощення її повторного підключення до мережі після виходу з режиму очікування.

### 3.1.7. Принцип обслуговування

Оскільки мережі WiMAX спочатку розглядали як мережі операторського класу, питання забезпечення QoS у них первинне. Стандарт IEEE 802.16 питання QoS пов'язує з конкретним сервісним потоком. Кожне з'єднання обслуговує окремий сервісний потік із заданими параметрами QoS. Абоненту WiMAX доступний заданий набір сервісних потоків — QoS-профіль. Інформація про це зберігається в системі керування абонентами (наприклад, у базі даних AAA-сервера або в спеціальному сервері політик). У разі статичної моделі керування QoS абонентська станція не може в ході сеансу зв'язку змінювати параметри сервісних потоків або створювати нові сервісні потоки. Однак у випадку динамічної моделі керування QoS абонентська або БС можуть динамічно змінюватись, створювати або видаляти сервісні потоки. Переключення / створення нових сервісних потоків може відбуватися, наприклад, коли МС звертається до будь-якої функції CSN на рівні додатків. Таким чином, основне завдання наземного сегмента мережі WiMAX — забезпечити щодо кожного абонента керування сервісними потоками, визначеними у стандарті IEEE 802.16.

Основні елементи мережі WiMAX, що реалізують функції QoS, — це модуль керування сервісними потоками (SFM – Service Flow Management) і модуль авторизації сервісних потоків (SFA – Service Flow Authorization), а також система зберігання даних про дозволені ресурси абонента. Модуль SFM завжди розташований у БС. Він відповідає за створення, відключення, дозвіл або модифікацію сервісних потоків. Структурно SFM включає функцію керування дозволом (AC – admission control) і базу даних про локальні ресурси. Функція AC на підставі аналізу інформації про локальні радіо- та інші ресурси визначає, чи може бути доданий новий сервісний потік. Модуль SFA призначений для того, щоб постійно забезпечувати SFM заданої БС інформацією про QoS-параметри конкретного абонента. Тобто він служить мостом між БС і глобальною базою даних про параметри абонента, яка зберігається в AAA-сервері або аналогічному пристрої в домашній CSN-мережі абонента. Розташований цей пристрій в ASN-шлюзі. Оскільки мова йде про мобільні абоненти, доцільно ввести поняття анкерного (базового) та сервісного SFA. Анкерний SFA визначається під час підключення МС до мережі і не змінюється до її повторної реєстрації протягом усієї сесії. В анкерний SFA передається інформація про QoS-профілі абонента під час його реєстрації в мережі. Якщо МС опиняється в зоні іншого ASN-шлюзу, вона взаємодіє вже з новим SFA. Такий SFA називають сервісним. Сервісний SFA по каналах R4 виконує функцію ретранслятора між МС і її анкерним SFA (точніше — між модулем SFM БС, із якою в даний момент працює МС, і анкерним SFA для даної МС). У функції анкерного та/або сервісного SFM входить реалізація так званої локальної політики QoS для даної ASN-мережі, пов'язаної із завантаженням і розподілом мережевих ресурсів.



## 3.2. Технологія LTE

### 3.2.1. Загальні відомості про застосування технології LTE

Перехід до технології LTE (Long Term Evolution — довготерміновий розвиток) передбачає кілька важливих переваг для абонентів і операторів мобільного зв'язку.

**Продуктивність і ємність.** Одна з вимог стандарту до систем LTE — підтримувати пікові швидкості завантаження даних із мережі аж до 100 Мбіт/с. Сама технологія дозволяє реалізувати ще вищі швидкості, наприклад більше 200 Мбіт/с. Компанія Ericsson вже демонструвала роботу системи LTE з піковою швидкістю приблизно 150 Мбіт/с. Крім того, час відгуку на посилку короткого пакета даних у радіопідсистемі RAN (Radio Access Network) мережі LTE повинен бути не більше за 10 мс. Це означає, що LTE більше, ніж будь-яка інша технологія відповідає ключовим вимогам, висунутим до систем 4G.

**Легкість у використанні.** Перш за все LTE здатна працювати в смузі частот різної ширини: від 1,5 до 20 МГц. LTE також може бути реалізована на основі різних принципів поділу сигналів: частотного й часового — FDD (Frequency Division Duplex) і TDD (Time Division Duplex). До теперішнього часу 3GPP передбачав для роботи систем LTE десять парних і чотири непарні частотні діапазони. Заплановано виділення інших діапазонів. Це означає, що оператор може спочатку запускати LTE в «нових» діапазонах, де зазвичай простіше отримати смуги 10 МГц або навіть 20 МГц, а потім поступово впроваджувати LTE у всіх доступних діапазонах. Крім того, продукти радіопідсистеми LTE будуть мати набір властивостей, які спростять будівництво мереж наступного покоління та керування ними. Наприклад, такі функції, як автоконфігурація і автооптимізація спростять і знизять витрати на запуск мереж і керування ними. Крім того, мережі LTE будуватимуть в паралельно зі спрощеними, заснованими на IP-протоколі, опорними і транспортними мережами, що дозволить спростити будівництво, експлуатацію систем LTE та введення нових послуг.

**Широкий вибір терміналів.** Крім мобільних телефонів у мережах LTE працюватимуть багато комп'ютерів і пристроїв споживчої електроніки, таких як ноутбуки, нетбуки, ігрові пристрої та камери, оснащені вбудованим модулем роботи з LTE-мережею. Оскільки LTE забезпечує підтримку хендовера та роумінгу з існуючими мобільними мережами, всі ці пристрої з першого дня запуску матимуть переваги вже існуючого покриття мереж 2G/3G. Таким чином, впроваджуючи LTE, оператори зможуть найбільш ефективно використовувати виділені їм частоти, а також досягти поставлених перед ними бізнес-цілей у сфері мобільного широкосмугового доступу (ШСД) і мультимедійних послуг. Є суттєві підстави для різкого зростання мобільного ШСД. Більшість людей вже використовують мобільні телефони і підключають ноутбуки до безпроводних мереж. Крок до повного мобільного ШСД інтуїтивний і зрозумілий, особливо, якщо мова йде про мережі LTE, що забезпечує якісне покриття та роумінг з існуючими мережами 2G і 3G. Крім того, досвід, набутий у процесі експлуатації мереж із підтримкою HSPA, показав, якщо оператор забезпечує якісне покриття, надає необхідні послуги і те-

рмінали, використання мобільного ШСД швидко стає популярним. У багатьох випадках мобільний ШСД може конкурувати з фіксованим ШСД за ціною, продуктивністю, захищеністю і, безумовно, зручністю. Користувачі можуть краще організовувати свій час, використовуючи мобільний доступ, а не налаштовуючи підключення до бездротової LAN, ризикуючи безпекою або втратою покриття. Кількість доступних безпроводних додатків у мобільних мережах істотно зростає. Соціальні мережі, пошукові машини, додатки, що забезпечують індикацію присутності (presence), сайти для спільного використання контенту (YouTube) — це лише кілька їх прикладів. За рахунок мобільності ці програми стають більш цінними для користувачів. Особливо цікавий контент, побудований користувачами (UGC), оскільки його поширення впливає на профіль типового користувача, зокрема, зростають вимоги до аплінку. Високі пікові швидкості і зменшений час відгуку в мережах LTE дозволяють забезпечити підтримку додатків реального часу, таких як геймінг та IPTV.

Мобільні оператори працюють за умов постійного зростання конкуренції і змагаються не тільки з іншими операторами, але і з новими учасниками ринку, новими бізнес-моделями. Однак поява таких бізнес-моделей означає нові можливості. Перевага мобільних операторів полягає в тому, що вони можуть надавати конкурентні послуги мобільного ШСД на базі вже зроблених інвестицій у 2G і 3G. Саме тому оператори активно формулюють стратегії та вимоги до мобільного ШСД, під час роботи з організаціями, які займаються стандартизацією. Деякі оператори, що належать до світових лідерів, вендори і дослідні інститути об'єднали зусилля в межах NGMN (Next Generation Mobile Networks Ltd — мережі мобільного зв'язку наступного покоління). NGMN працює в тісному співробітництві з існуючими організаціями, що займаються стандартизацією, і встановила чіткі цілі з продуктивності, рекомендації фундаментального порядку і сценарії впровадження майбутніх мереж мобільного ШСД з великою територією покриття. Імператив NGMN щодо бачення еволюції технологій після 3G передбачає описані нижче вимоги.

1. Ефективне перевикористання існуючих активів, у тому числі спектра.
2. Конкурентоспроможність у термінах загальної пропозиції для клієнтів (підтримка цінової ефективності, тотального низького часу відгуку) з моменту запуску; випередження конкурентних технологій за рахунок підтримки ефективного за ціною комплексного забезпечення QoS, мобільності та роумінгу.
3. Відсутність впливу на існуючу програму розвитку HSPA.
4. Створення нового режиму IPR, який би підтримав ліцензування так, щоб була забезпечена прозорість і передбачуваність повної вартості IPR для операторів, провайдерів інфраструктурних рішень та виробників пристроїв.

LTE відповідає вимогам NGMN, тому являє собою наступний суттєвий крок у розвитку мобільного радіозв'язку, оформленого як Release 8 3GPP (3rd Generation Partnership Project). LTE застосовує ортогональне мультиплексування з частотним поділом (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) як технологію радіодоступу разом з удосконаленими антенними технологіями.

3GPP — це створена в 1998 р. партнерська асоціація груп телекомунікаційних компаній, головною метою якої є розробка і затвердження стандартів для ме-

режевих технологій третього покоління, стандартизація архітектури мереж та сервісів. Крім LTE зазначений консорціум розробив також «плоску» мережеву архітектуру, засновану на використанні IP. Ця архітектура являє собою частину розробок у межах проекту System Architecture Evolution (SAE, еволюція системної архітектури). Було створено архітектуру та концепції LTE-SAE для ефективної підтримки масового використання будь-яких послуг на базі Інтернет-протоколу. Архітектуру засновано на існуючій базовій мережі GSM / WCDMA з метою спрощення операцій і органічного, ефективного за витратами розгортання. Більше того, було ініційовано взаємодію між 3GPP і 3GPP2 (організація, що займається стандартизацією CDMA) для оптимізації міжмережевої взаємодії CDMA і LTE-SAE. Це означає, що оператори CDMA зможуть розвинути свої мережі до LTE-SAE і зекономити на масштабі та глобальному характері виробництва чипсетів, що сприяло успіху GSM і WCDMA.

Вихідною точкою для стандартизації LTE стала робоча зустріч 3GPP RAN Evolution Workshop, проведена в листопаді 2004 р. у Торонто (Канада). У грудні 2004 р. почалися дослідження, метою яких було встановлення часових меж еволюції технології радіодоступу 3GPP:

- скорочена вартість біта;
- розширення обсягу послуг — більше послуг за меншу ціну;
- гнучке використання існуючих і нових частотних діапазонів;
- спрощена архітектура й відкриті інтерфейси;
- прийнятне енергоспоживання терміналів.

Дане дослідження знадобилося для підтвердження того, що концепція LTE зможе забезпечити набір вимог, сформульованих у 3GPP TR 25.913 Feasibility Study of Evolved UTRA and UTRAN [16]. У розробці LTE виділили на так звані контрольні точки, а графік робіт погодили на пленарних засіданнях 3GPP у Південній Кореї в травні — червні 2007 р. Результати наочно засвідчили, що LTE відповідає вимогам (а іноді й перевершує їх), встановленим щодо пікових швидкостей, пропускної здатності сот і спектральної ефективності, а також продуктивності VoIP і Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS). Було поставлено завдання завершити стандартизацію LTE до кінця 2007 р. Після першого релізу заплановано доопрацювання, пов'язані зі змінами вимог і функціональності.

### 3.2.2. Діапазони частот

Робота з ідентифікації діапазонів наразі не завершена, не можна виключити, наприклад, додавання смуги частот у діапазоні 450 МГц. Далі (табл. 3.1) описано діапазони частот, ідентифіковані 3GPP для розгортання систем TD-LTE і FDD-LTE.

Таблиця 3.1. Діапазони частот

Діапазон	Умовна назва	Частота, МГц				LTE	Смуга, МГц
1	IMT Core Band	1920	1980	1980	2170	FDD	60
2	PCS 1900	1850	1910	1930	1990	FDD	60
3	GSM1800	1710	1785	1805	1880	FDD	75
4	AWS(US&Other)	1710	1755	2110	2155	FDD	45
5	850	824	849	869	894	FDD	25
6	850 (Japan #1)	830	840	875	885	FDD	10
7	IMT Extension	2500	2570	2620	2690	FDD	70
8	GSM900	880	915	925	960	FDD	35
9	1700(Japan)	1750	1785	1845	1880	FDD	35
10	3G Americas	1710	1770	2110	2170	FDD	60
11	1500(Japan #1)	1428	1448	1475	1496	FDD	20
12	US 700	698	716	728	746	FDD	18
13	US 700	777	787	746	756	FDD	10
14	US 700	788	798	758	768	FDD	10
17	US 700	704	716	734	746	FDD	12
18	850 (Japan #2)	815	830	860	875	FDD	15
19	850 (Japan #3)	830	845	875	890	FDD	15
20	DigitalDividend	832	862	791	821	FDD	30
21	1500(Japan #2)	1448	1463	1496	1511	FDD	15
33	TDD 2000	1900	1920			TDD	20
35	TDD 1900	1850	1910			TDD	60
37	PCS Center Gap	1910	1930			TDD	20
38	IMTEtension Center Gap	2570	2620			TDD	50
39	China TDD	1880	1920			TDD	40

### 3.2.3. Архітектура LTE-мережі

Паралельно з радіодоступом LTE опорні пакетні мережі також еволюціонують до плоскої архітектури SAE. Ця архітектура розроблена для оптимізації продуктивності, поліпшення ефективності витрат і спрощення запуску послуг на базі IP для масового ринку. На рівні користувача архітектури SAE є всього два базові

пристрої: БС LTE (eNodeB) і гейт SAE Gateway (рис. 3.7). БС LTE підключені до опорної мережі за допомогою інтерфейсу S1 — Core Network — RAN. Така плоска архітектура скорочує число вузлів, необхідних для забезпечення з'єднання.

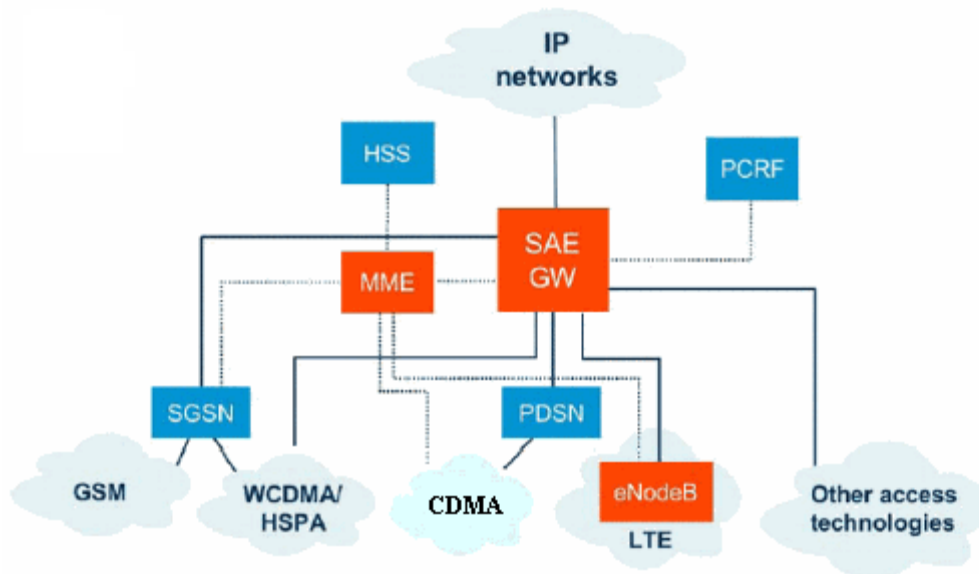


Рис. 3.7. Плоска архітектура LTE і SAE

Існуючі системи 3GPP (GSM і WCDMA / HSPA) і 3GPP2 (CDMA2000 1xRTT, EV-DO) інтегровані в систему LTE за рахунок використання стандартизованих інтерфейсів, що забезпечують оптимізовану мобільність. Для систем 3GPP це означає наявність сигнального інтерфейсу між CDMA RAN і новою опорною мережею. Така інтеграція надасть підтримку як подвійним, так і поодиноким радіохендоверам, а також можливість плавної міграції до LTE. Керування сигналізацією, наприклад, для забезпечення мобільності, підтримує вузол керування мобільністю (Mobility Management Entity, MME), виділений із гейту (Gateway). Це спрощує оптимізацію розгортання мережі і надає можливість гнучкого масштабування її ємності.

Сервер домашніх абонентів (HSS) підключається до пакетної мережі (Packet Core) за рахунок інтерфейсу, заснованого на Diameter, а не на сигналізації SS7, застосованій в мережах GSM і WCDMA. Сигналізація мережі для поліцейського прослуховування і для білінгу (charging) також ґрунтується на Diameter. Це означає, що всі інтерфейси архітектури — це IT-інтерфейси.

Існуючі системи GSM і WCDMA / HSPA інтегровані з системою LTE за допомогою стандартизованих інтерфейсів між SGSN і опорною мережею LTE. Очікують, що спроба інтегрувати CDMA-доступ сприятиме і можливості підтримувати мобільність між мережами CDMA і LTE. Дане об'єднання також повинне забезпечувати як дуальний, так і одиничний хендовер викликів, що полегшить міграцію з мереж CDMA в мережі LTE. У LTE-SAE діє концепція QoS (якості послуги), заснована на понятті класу послуги. Це забезпечує просте, але ефективне рішення, що дозволяє оператору пропонувати диференціювати пакетні послуги.

### 3.2.4. Радіотехнології OFDM

LTE застосовує OFDM для формування спадного каналу, тобто каналу від БС до мобільного пристрою. OFDM відповідає вимогам LTE щодо спектральної гнучкості і дозволяє створювати ефективні за витратами рішення для широкосмугових несучих частот з високими піковими швидкостями передачі даних. Це добре відпрацьована технологія, про що свідчить цілий спектр стандартів: IEEE 802.11a/b/g, 802.16, HIPERLAN-2, DVB та DAB. OFDM застосовує велику кількість вузькосмугових піднесучих для забезпечення передачі даних. Базовий спадний канал LTE на фізичному рівні можна розглядати як частотно-часову решітку. Один ресурсний елемент формує модуляція QPSK, 16QAM або 64QAM. У випадку модуляції 64QAM кожен ресурсний елемент забезпечує передачу 6 бітів інформації. Символи OFDM згруповані в ресурсні блоки, які мають розмір 180 кГц у частотному вимірі і 0,5 мс у часовому. Часовий інтервал передачі (TTI, Transmission Time Interval) складається з двох слотів (Tslot). Кожному користувачеві присвоюється певна кількість так званих ресурсних блоків у частотно-часовій решітці. Чим більше ресурсних блоків призначається користувачеві і чим вищий ступінь модуляції формування ресурсних елементів, тим кращий біт-рейт. Які ресурсні блоки будуть призначені користувачеві і скільки він їх отримає в даний момент часу, залежить від удосконаленого механізму складання частотно-часового розкладу. Механізм складання розкладу в LTE, схожий на застосовуваний у HSPA і забезпечує оптимальне функціонування різних послуг у різних умовах. У висхідному каналі LTE використовує версію OFDM із назвою SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access — множинний доступ з частотним поділом на базі однієї несучої). Це зроблено для того щоб компенсувати витрати на OFDM, який відрізняється дуже високим відношенням пікової потужності до середньої потужності сигналу (PARP – Peak to Average Power Ratio). Реалізація високих значень PARP вимагає використання дорогих і неефективних підсилювачів потужності, що передбачає високі вимоги до лінійності, що позначається на зростанні вартості терміналів і швидкості розрядження батарей. SC-FDMA дозволяє вирішити проблему за рахунок об'єднання ресурсних блоків таким чином, що зменшуються вимоги до лінійності, а також споживаної потужності підсилювача. Низькі значення PARP, крім того, покращують покриття і продуктивність стільника.

### 3.2.5. Удосконалені антени

Удосконалені антенні рішення було розроблено для впровадження HSPA (eHSPA) і їх будуть використовувати в системах LTE. Рішення, в яких передбачено використання кількох антен, відповідають вимогам до мобільних мереж наступного покоління щодо пікових швидкостей передачі даних, розширеного покриття та високої ємності. Удосконалені антенні рішення з використанням декількох антен є ключовими компонентами для досягнення цих цілей. Не існує рішення антенного пристрою, яке б відповідало будь-якому можливному сценарію. Відповідно існує ряд антенних рішень для різних сценаріїв розгортання мережі. Високих пікових швидкостей передачі даних, наприклад, можна досягнути за допомогою

багатошарових антенних рішень, таких як 2x2 або 4x4 MIMO, тоді як розширене покриття зручніше забезпечувати за рахунок використання бімформінгу (англ. beamforming або beam forming — формування променя — технологія формування адаптивної діаграми спрямованості).

### 3.2.6. Частотні діапазони для FDD і TDD

LTE можна застосувати як у парних (FDD), так і в непарних (TDD) ділянках спектра. Перші релізи продукту від лідерів постачання підтримують обидві дуплексні схеми. У цілому FDD забезпечує високі ефективність і потенціал використання пристроїв та інфраструктури, тоді як TDD може виконувати функцію доповнення. Оскільки устаткування LTE практично ідентичне як для FDD, так і TDD (крім фільтрів), оператори, які почнуть зі спорудження мереж із TDD, зможуть згодом зекономити на масштабі, який забезпечить поширення продуктів FDD.

Усі стільникові системи зв'язку сьогодні застосовують FDD. Більше 90% частот, використовуваних системами мобільного зв'язку в усьому світі, — це парні набори смуг частот. У разі FDD трафік «вниз» і «вгору» забезпечується одночасно в різних частотних діапазонах. У системах TDD передача в каналі «вниз» і «вгору» не триває безперервно, що дозволяє використовувати для організації каналу один і той самий частотний діапазон. Наприклад, якщо розділити час між передачею «вгору» і «вниз» у співвідношенні 1:1, то напрям «вгору» займатиме лише половину часу. Середня потужність для кожного сеансу зв'язку також дорівнює половині пікової потужності. Оскільки пікова потужність обмежена регулятором, у результаті виходить, що для тієї ж пікової потужності TDD забезпечує менше покриття, ніж FDD (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Передача в системах FDD і TDD

Оператори хотіли б виділити більше ніж половину своїх ресурсів для організації каналу «вниз» (щоб підвищити пікову швидкість у цьому напрямку). Якщо співвідношення DL/UL дорівнює 3:1, то для реалізації мережі TDD потрібно на 120% більше сайтів, ніж для реалізації мережі FDD (рис. 3.9).

У найближчі роки такі пристрої, як ноутбуки, нетбуки, ігрові пристрої та відеокамери активно використовуватимуть у мережах зв'язку за рахунок технологій HSPA, CDMA2000, а також LTE. Це буде можливо за допомогою стандартизованих вбудованих модулів PCI Express. Багато компаній, що працюють у галузі споживчої електроніки, зможуть ефективно впроваджувати технології мобільного ШСД у процесі створення пристроїв, які забезпечать нову цінність для споживачів. Термінали фіксованого безпроводного зв'язку (FWT — Fixed Wireless Terminals) — це ще одна можливість ефективного використання мобільного ШСД. FWT можна порівняти з DSL-модемами для підключення до Ethernet,

WLAN або POTS різних пристроїв у офісі чи вдома. Основна відмінність полягає в тому, що широкосмугові послуги реалізуються не за допомогою мідного кабелю, а за допомогою радіомережі. FWT дають оператору можливість забезпечувати послугу ШСД ефективним за витратами способом для всіх абонентів, які вже мають настільні комп'ютери з підключенням до Ethernet, або власникам ноутбуків, здатних підключатися до мереж WLAN.

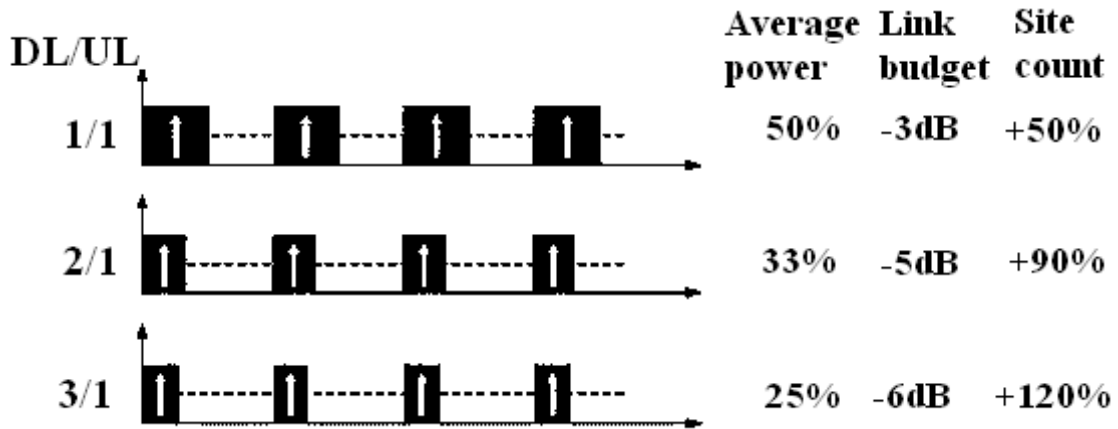


Рис. 3.9. Графічне співвідношення DL / UL

### 3.2.7. Термінальне обладнання

Важливим чинником успіху нової технології є наявність і різноманітність абонентських терміналів. Уже зараз виготовляють абонентське обладнання LTE, причому виробники чипсетів і терміналів LTE є як в ніші 3GSM, так і в ніші WiMax. Компанія Alcatel-Lucent розробила конвергентне рішення для створення безпроводних мереж як на основі однієї, так і декількох технологій. Підсистеми радіодоступу 2G/3G/LTE будують з універсальних мультистандартних БС, комбінованих контролерів, транспортних рішень з єдиною системою керування (рис. 3.10).

Мультистандартні БС 2G/3G/LTE можуть мати вигляд інтегрованих макростанцій і станцій із розподіленою архітектурою. Для реалізації як інтегрованого, так і розподіленого рішення застосовують один і той же модуль цифрової обробки. У шафу встановлюють приймачі-передавачі MC-TRX або однорежимні TRDU. У розподіленому рішенні застосовують мультистандартні виносні радіомодулі MC-RRH або однорежимні RRH. У майбутньому з'являться цілком комбіновані рішення BSC/RNC/MME для 2G/3G/LTE на платформі ATCA. На цій платформі також реалізуються інші модулі: PCRF, IMS, SGSN, HLR. У мультистандартній мережі зростають вимоги до системи керування і забезпечення взаємодії між різними сегментами та ієрархічними рівнями мережі. Компанія Alcatel-Lucent розробила рішення, що гарантують безшовність хендвера під час переходу користувачів із одного рівня (технології) на інший рівень (технологію), а також ефективні системи керування мультистандартними мережами. У зв'язку однотипністю технологій LTE FDD і TDD ці модулі можна застосовувати і для побудови радіомереж ШСД.



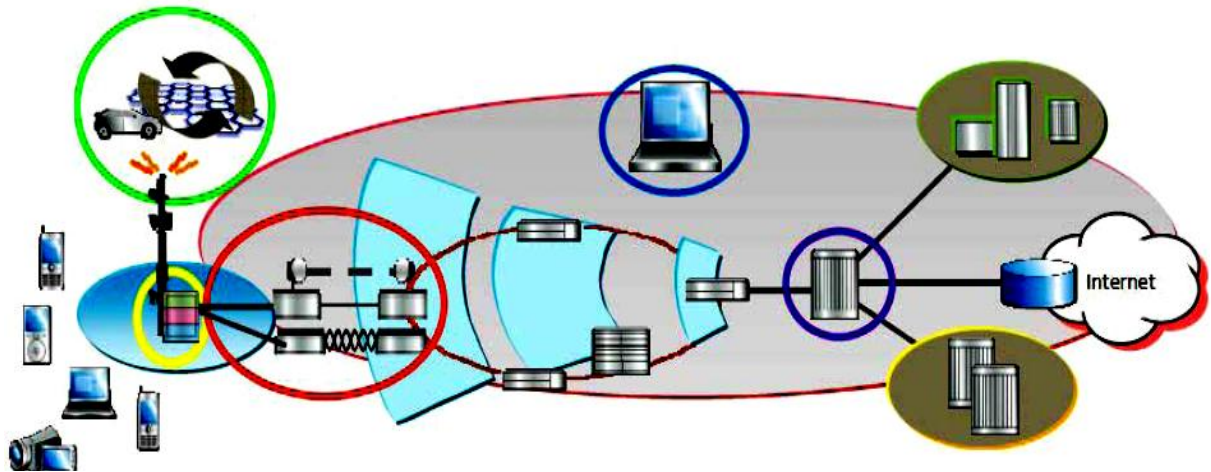


Рис. 3.10. Конвергентна підсистема радіодоступу

### 3.3. Особливості WiMax 16e і LTE Rel.8

Технології WiMax 16e і LTE Rel.8 засновані на одному й тому ж радіоінтерфейсі MIMO-OFDM, однак між ними можна знайти різницю. Для цього глибше розглянемо принципи організації радіоінтерфейсу.

#### 3.3.1. Багатостанційний доступ

На лінії «вниз» технології LTE і лініях «вгору» і «вниз» технології WiMax застосовують OFDMA — БСД на основі ортогонального частотного мультиплексування (OFDM). У LTE на лінії «вгору» відмовилися від OFDM, оскільки в результаті додавання множини ортогональних піднесучих формується сигнал з великим пік-фактором. З метою передачі такого сигналу без спотворень потрібен високолінійний, а отже, дорогий підсилювач. Для спрощення терміналів було вирішено застосовувати технологію SC-FDMA — мультиплексування на одній несучій. Сигнал SC-FDMA має менший пік-фактор, у результаті чого підсилювач може працювати в більш ефективному режимі та з більш високим ККД.

#### 3.3.2. Організація каналних ресурсів

У разі застосування MIMO в технології WiMax ресурси користувачам виділяють слоти, сформовані з піднесучих і символів OFDM. У процесі цього застосовують метод розставлення піднесучих PUSC (Partial Usage of Subcarriers). Піднесучі об'єднуються в субканали (рис. 3.11), розподілені по всій несучій.

У LTE користувачам виділяють ресурсні блоки по 12 сусідніх піднесучих  $\times$  1 субкадр (рис. 3.12). Один ресурсний блок = 12 піднесучих  $\times$  14 символів OFDM = 168 ресурсних елементів. Той факт, що в межах одного ресурсного блока 180 кГц, піднесучі корельовані, дозволяє скоротити кількість пілот-піднесучих для оцінювання каналу на приймальній стороні. На лінії «вниз» у режимі MIMO 2 $\times$ 2 у кожному ресурсному блоці для пілотів резервують 16 позицій із доступних 168 (частка пілотів — 9,5%). На лініях «вгору» і «вниз» розмір ресурсного блока збігається — 168 ресурсних елементів. На лінії «вгору» для пілотів виділяють 36

позицій (частка пілотів — 21,4%). Таким чином, частка пілот-піднесучих в LTE в 1,5 разу менша, ніж у WiMax [2].

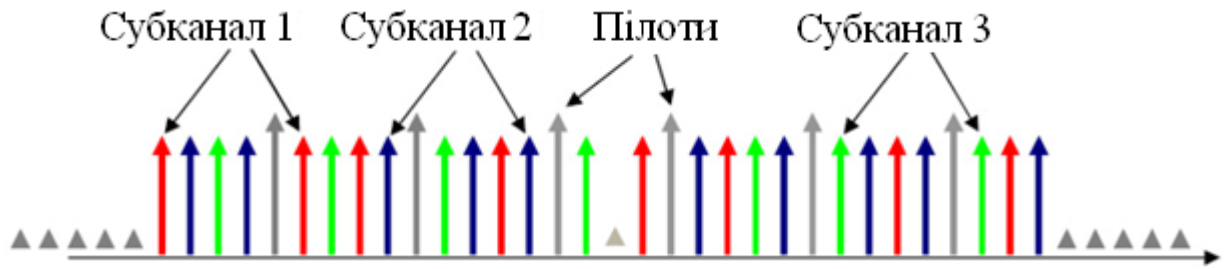


Рис. 3.11. Субканали частотного каналу WiMax

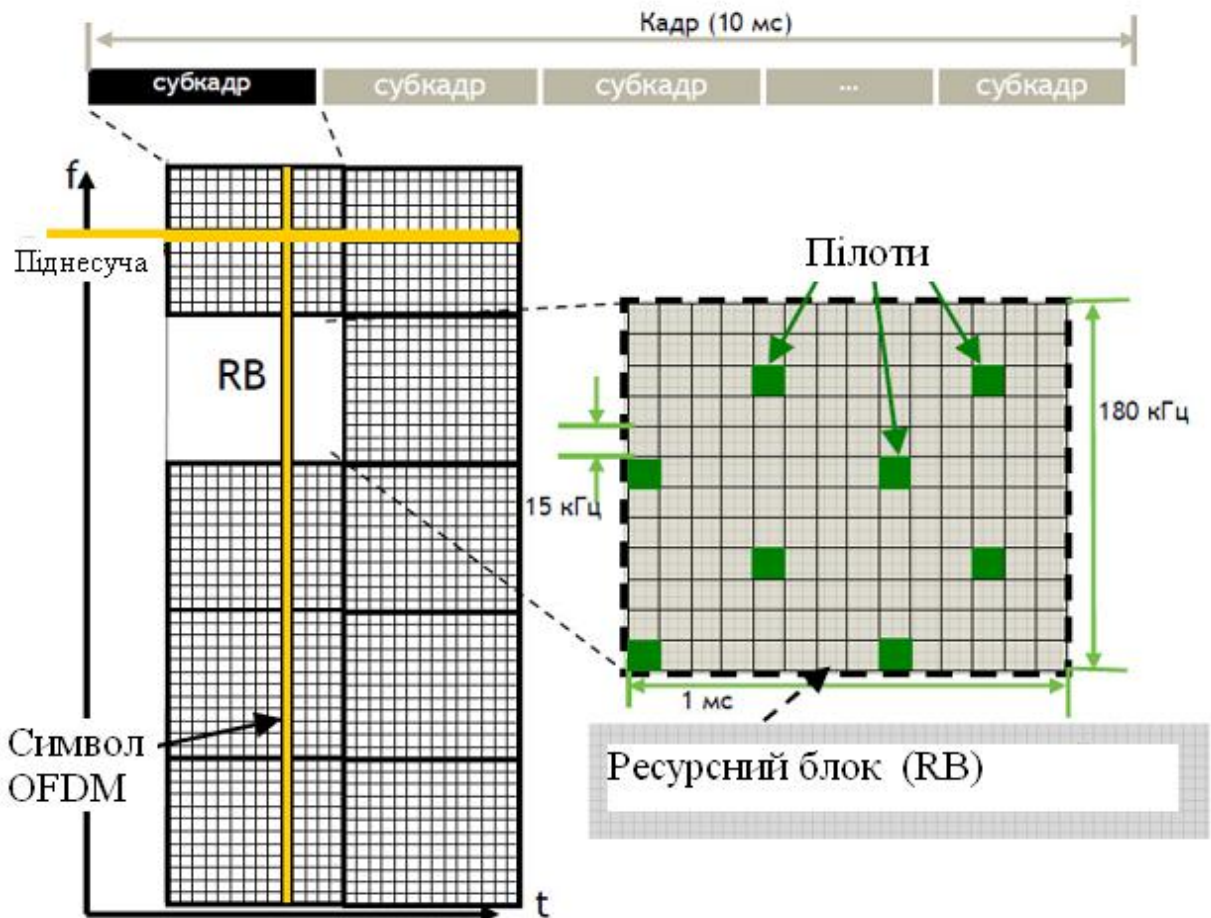


Рис. 3.12. Ресурсні блоки частотного каналу LTE

### 3.3.3. Диспетчеризація частотних ресурсів

У WiMax диспетчеризацію ресурсів у частотній області здійснюють за принципом «frequency diversity scheduling» (частотне планування передачі) — піднесучі, надані користувачеві, розподіляють по всьому спектру каналу. Це потрібно для рандомізації та усереднення впливу частотно-селективних завмирань на широкопasmовий канал. У LTE реалізована інша техніка усунення частотно-селективних завмирань: частотно-селективна диспетчеризація ресурсів «frequency selective scheduling». Для кожної абонентської станції UE (User Equipment) і кож-

ного частотного блока несучої формують індикатори якості каналу CQI (Channel Quality Indicator). Залежно від необхідної для UE швидкості передачі даних БС приймає рішення про кількість ресурсних блоків, виділених для того чи іншого користувача. Вибір частотних блоків визначають за CQI. Користувачам виділяють ті ресурсні блоки, які мають найвищий CQI, а отже, найкраще відношення сигнал/шум. Такий спосіб розподілу ресурсів між користувачами помітно енергетично вигідніший порівняно з рандомізованим.

### **3.3.4. Гібридна процедура повторної передачі на запит**

В системах WiMax 16e і LTE Rel.8 застосовують процедуру повторної передачі HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest). За рахунок спрощеної архітектури LTE (у радіопідсистемах WiMax, як правило, є контролер БС, а в LTE він відсутній) скоротився час на обробку пакетів до 10 мс порівняно з 30 мс у WiMax. Крім того, для об'єднання повторно переданих пакетів у цих технологіях застосовують різні процедури: «Chase combining» – у WiMax і «Incremental redundancy» – в LTE. Під час процедури «Chase combining» відбувається звичайне повторення пакетів, а в приймальному пристрої накопичується енергія у результаті кожної повторної передачі. Під час процедури «Incremental redundancy» внаслідок кожної наступної повторної передачі змінюється шаблон «виколювання» бітів у процесі турбокодування. У декодері внаслідок кожної наступної передачі збільшується число перевірних бітів у декодованому пакеті. Другий метод набагато ефективніший і відрізняється помітним енергетичним виграшем.

### **3.3.5. Адаптація системи до характеристик каналу**

У сучасних системах радіодоступу можна максимально врахувати умови поширення радіохвиль у каналі зв'язку й адаптуватися до них шляхом вибору найбільш придатної схеми модуляції і кодування MCS (Modulation and Coding Scheme). Квадратурна амплітудна модуляція QPSK/16QAM/64QAM може комбінуватися з перешкодостійким кодуванням з різними швидкостями.

У LTE доступні 29 схем MCS. Зазвичай вибирають ту, яка в даних умовах поширення радіохвиль забезпечує максимальну пропускну здатність. Точність налаштування на канал залежно від відношення сигнал/шум становить 1—2 дБ. За високого відношення сигнал/шум може бути застосована швидкість кодування, близька до 1. У WiMax кількість схем MCS у кілька разів менша, налаштування на канал менш точне — 2—3 дБ.

### **3.3.6. Керування потужністю**

У будь-якій мережі підтримуються процедури керування потужністю передавачів абонентських станцій для запобігання завмиранням та компенсації втрат на лінії. У класичному алгоритмі потужність випромінювання сигналів користувачів повинна бути такою, щоб рівні сигналів різних користувачів надходили на вхід приймача БС з відношенням сигнал/шум, тотожним деякому пороговому

значенню. Саме такий алгоритм застосовують у WiMax. У LTE застосовують модифікований алгоритм — часткове керування потужністю FPC (Fractional Power Control). Порогове відношення сигнал/шум змінюється для користувачів залежно від їх положення всередині стільника: чим ближче UE до БС, тим вищий поріг відношення сигнал/шум як критерій регулювання потужності. Таким чином, поблизу БС UE працює з більш високим відношенням сигнал/шум і швидкістю кодування та кратністю модуляції, а отже, з більш високою спектральною ефективністю. Крім того, працюючи з підвищеною потужністю, UE може справлятися з внутрішньосистемною інтерференцією — пригнічувати співканальні перешкоди. Кожна БС LTE контролює рівень перешкод від сусідніх стільників. БС періодично обмінюються індикаторами перевантаження OI (Overload Indicator), що вказують, у якому ресурсному блоці рівень перешкод перевищує порогове значення. Індикатор OI формується за результатами вимірювання базовою станцією рівнів перешкод і фонового шуму для кожного частотного блока в стільнику. Параметри керування потужністю встановлюють залежно від прийнятого OI: якщо для будь-якого блока вказано високий рівень перешкод, то БС передає команду знизити потужність UE, випромінюваної в даному ресурсному блоці.

### 3.3.7. Коефіцієнт перевикористання частот

Базова схема перевикористання частот WiMax побудована на трьох частотних каналах. За трисекторної конфігурації сайтів у кожному із секторів використовують один із трьох частотних каналів (рис. 3.13). Коефіцієнт перевикористання частот у даному випадку дорівнює 3. Мережа LTE працює з коефіцієнтом перевикористання частот, що дорівнює 1, тобто всі БС працюють на одній несучій. Внутрішньосистемні перешкоди в даній системі мінімізуються за рахунок частотно-селективної диспетчеризації, координації перешкод між стільниками, гнучкого частотного плану. Далі (рис. 3.13 б) показано один із варіантів гнучкого частотного плану. Для користувачів у центрі будь-якого стільника можуть бути виділені ресурси з усієї смуги каналу (сіра зона). Користувачам на краях стільників виділяють ресурси тільки з певних піддіапазонів. Таким чином, кожному стільнику відомо, у якому піддіапазоні концентруються перешкоди на його межах. Положення UE скраю стільника або поблизу БС ідентифікують з періодичним звітом UE про рівні сигналів сусідніх стільників (для підтримки хендовера).

### 3.3.8. Схеми MIMO

Якщо в системі MIMO можна передати від приймача до передавача інформацію про характеристики каналу поширення радіохвиль, то на передавальній і приймальній сторонах є можливість оптимально сформувати просторові канали поширення окремих сигнальних потоків так, щоб мінімізувати їх взаємну інтерференцію, а це значно підвищує енергетичний бюджет з'єднання. Саме такий принцип закладено в технологію LTE, у якій реалізується схема MIMO зі зворотним зв'язком CL-MIMO (Closed Loop MIMO) [2]. У приймачі після оцінювання каналу вибирають відповідну прекодувальну матрицю, а номер оптимальної пре-

кодувальної матриці PMI (Precoding Matrix Indicator) посиляється передавачу. Зворотний зв'язок у схемі MIMO WiMax не передбачений. У цих системах розрізняють схеми каналного кодування, що передують обробці MIMO. У WiMax кодування послідовне, а в LTE — паралельне. За паралельної схеми вхідні дані демультимплексуються на два потоки, кожен із яких окремо піддають перешкодостійкому кодуванню. Закодовані потоки надходять у схему MIMO. На приймальній стороні відбуваються зворотні операції. Після зняття перешкодостійкого коду в обох гілках декодовані дані подаються назад у приймач – обробник MIMO: реалізується ітераційний алгоритм спільної демодуляції MIMO і каналного декодування, що дозволяє помітно поліпшити роботу приймача і знизити необхідне відношення сигнал/шум на його вході. Даний алгоритм називають алгоритмом послідовного виключення демодульованого компонента SIC (Successive Interference Cancellation).

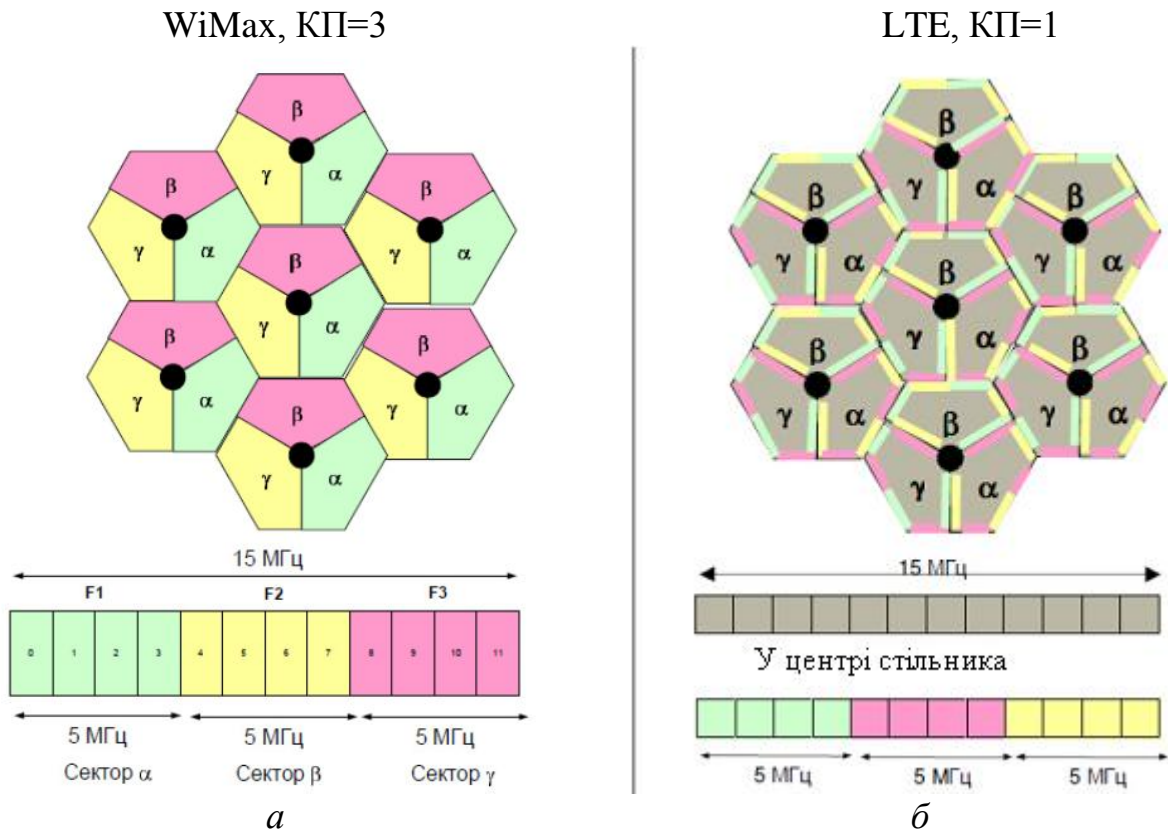


Рис. 3.13. Коефіцієнт перевикористання частот у мережах:  
*a* — WiMax; *б* — LTE

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрианов, В.И. Средства мобильной связи [Текст] / В.И. Андрианов, А.В. Соколов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2001. — 256 с.
2. Варукіна, Л.А. Технологія МІМО в системах LTE [Текст] / Л.А. Варукіна // Електрозв'язок. — 2009. — № 11. — С. 52—55.
3. Вишнеvский, В.М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G [Текст] / В.М. Вишнеvський, С. Портной, И.В. Шахнович. — М.: Техносфера, 2009. — 465 с.
4. Кшиштов, В. Системы подвижной радиосвязи [Текст] / пер. с пол. И.Д. Рудинского; под ред. А.И. Ледовского. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. — 529 с.
5. Галкин, В.А. Цифровая мобильная радиосвязь [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.А. Галкин. — М.: Горячая линия–Телеком, 2007. — 432 с.
6. Горностаев, Ю.М. Перспективные спутниковые системы связи [Текст] / Ю. М. Горностаев, В. В. Соколов, Л. М. Невдяев. — М.: Горячая линия — Телеком; МЦНТИ, ООО «Мобильные коммуникации», 2000. — 132 с.
7. Леонтьев, О.Є. Системи радіозв'язку [Текст]: кКурс лекцій. / О.Є. Леонтьев. Житомир: ЖВІРЕ, 2006. — 228 с.
8. Невдяев, Л.М. Мобильная спутниковая связь 3-го поколения [Текст]: справочник / Л.М. Невдяев. —М.: МЦНТИ, 2000. — 208 с.
9. Норенков, И. П. Телекоммуникационные технологии и сети [Текст] / И.П. Норенков, В.А. Трудоношин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. — 232 с.
10. Радиосвязь [Текст] / О.В. Головин, Н.И. Чистяков, В. Шварц, И.Х. Агиляр / под ред. проф. О.В. Головина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. — 288 с.
11. Ратынский, М. В. Основы сотовой связи [Текст] // М. В. Ратынский / под ред. Д. Б. Зимина. — М.: Радио и связь, 1998. — 248 с.
12. Системы мобильной связи [Текст] учеб. пособие для вузов / под ред. В.П. Ипатова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. — 272 с.
13. Ситник, В.Ф. Телекомунікації в бізнесі [Текст]: навч.-метод. посіб. для самост. вивч. дисципліни / В.Ф. Ситник, І.А. Козак. — К.: КНЕУ, 1999. — 204 с.
14. Соловьев, А.А. Пейджинговая связь [Текст] / А. А. Соловьев. — М.: Эко-Трендз, 2000. — 285 с.
15. Телекоммуникационные системы и сети [Текст]: учеб. пособие: в 3 т. / Б.И. Крук [и др.]; под ред. проф. В.П. Шувалова. — Изд. 2-е, исправл. и дополн. — М.: Горячая линия–Телеком, 2005. — Т. 3: Радиосвязь, радиовещание, телевидение. — 592 с.
16. Тихвинский, В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура [Текст] / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. — М.: Эко-Трендз, 2010. — 284 с.

## ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	1
ВСТУП.....	6
1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ.....	7
1.1. Структурні схеми радіозв'язку .....	7
1.2. Особливості передачі та обробки сигналів у супутникових системах зв'язку .....	8
1.3. Реалізація багатостанційного доступу .....	10
1.3.1. Види каналів зв'язку .....	10
1.3.2. Організація режимів багатостанційного доступу .....	11
1.3.3. Системи з обробкою сигналів у бортовому ретрансляторі.....	12
1.4. Наземні станції супутникових систем передачі.....	13
1.5. Основні параметри сигналів і шумів на вході приймальних пристроїв .....	16
1.5.1. Сигнал на вході приймального пристрою .....	16
1.5.2. Шуми на вході приймальних пристроїв.....	17
1.5.3. Особливості структурних схем бортового ретранслятора .....	19
2. СИСТЕМИ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	22
2.1. Загальні принципи побудови систем стільникового зв'язку .....	22
2.1.1. Характеристики систем стільникового зв'язку .....	26
2.1.2. Структурна схема мобільного телефону.....	27
2.1.3. Базова станція стільникової системи зв'язку .....	28
2.1.4. Центр комутації .....	29
2.2. Ефірний інтерфейс системи стільникового зв'язку.....	30
2.2.1. Інтерфейси та їх стандартизація .....	30
2.2.2. Ефірний інтерфейс стандарту D-AMPS .....	31
2.2.3. Ефірний інтерфейс стандарту GSM.....	31
2.3. Організація роботи систем стільникового зв'язку.....	34
2.3.1. Частотні канали стільникових систем зв'язку.....	34
2.3.2. Фізичні канали систем стільникового зв'язку.....	35
2.3.3. Логічні канали систем стільникового зв'язку .....	35
2.4. Установлення зв'язку в стільникових системах .....	37
2.4.1. Увімкнення та ініціалізація .....	38
2.4.2. Режим очікування.....	38
2.4.3. Установлення зв'язку .....	39
2.4.4. Аутентифікація та ідентифікація абонентів .....	40
2.5. Функціональні можливості стільникових систем зв'язку.....	41
2.5.1. Процедура роумінгу .....	41
2.5.2. Функції стільникового зв'язку .....	41

2.6. Особливості обробки сигналів та оптимізації частотного діапазону .....	43
2.6.1. Смути частот стільникового зв'язку.....	43
2.6.2. Методи організації багатостанційного доступу в системах стільникового зв'язку .....	45
2.6.3. Принципи побудови стільникової системи зв'язку стандарту CDMA (IS-95).....	46
2.7. Цифрова стільникова система рухомого зв'язку стандарту GSM .....	49
2.7.1. Загальні характеристики стандарту GSM .....	50
2.7.2. Узагальнена характеристика канального кодека стандарту GSM .....	53
3. ТЕХНОЛОГІЇ ПОКОЛІННЯ 4G .....	55
3.1. Мережі бездротового доступу WiMAX .....	55
3.1.1. Основні принципи побудови мережі WiMAX.....	55
3.1.2. Базова модель мережі.....	55
3.1.3. Профілі ASN .....	58
3.1.4. Підтримка мобільності.....	59
3.1.5. Керування радіоресурсом .....	61
3.1.6. Режим очікування та пейджингу .....	63
3.1.7. Принцип обслуговування .....	64
3.2. Технологія LTE.....	65
3.2.1. Загальні відомості про застосування технології LTE .....	65
3.2.2. Діапазони частот.....	67
3.2.3. Архітектура LTE-мережі .....	68
3.2.4. Радіотехнології OFDM.....	70
3.2.5. Удосконалені антени .....	70
3.2.6. Частотні діапазони для FDD і TDD .....	71
3.2.7. Термінальне обладнання.....	72
3.3. Особливості WiMax 16e і LTE Rel.8.....	73
3.3.1. Багатостанційний доступ .....	73
3.3.2. Організація каналних ресурсів.....	73
3.3.3. Диспетчеризація частотних ресурсів.....	74
3.3.4. Гібридна процедура повторної передачі на запит .....	75
3.3.5. Адаптація системи до характеристик каналу .....	75
3.3.6. Керування потужністю .....	75
3.3.7. Коефіцієнт перевикористання частот.....	76
3.3.8. Схеми MIMO.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	78