

Державний університет телекомунікацій

Сайко В.Г.

**Основи мережевого планування широкосмугових мереж
бездротового зв'язку**

Навчальний посібник

Київ 2015

УДК 621.396.2

П217

Рецензенти:

Климаш М.М., доктор техн. наук, професор
завідувач кафедри телекомунікацій Національного університету
«Львівська політехніка».

Гряник М.В., доктор техн. наук
технічний директор компанії FreeNet

Сайко В.Г. Основи мережевого планування широкосмугових мереж бездротового зв'язку. **Навчальний посібник.** – К.: ДУТ, 2015. – 78 с.

В навчальному посібнику представлені елементи теорії трафіку мереж цифрового радіозв'язку, принципи енергетичного розрахунку ліній радіозв'язку, методи частотного планування мереж рухомого цифрового радіозв'язку. Наводяться результати впливу характеристик обладнання передавання цифрової інформації на завадостійкість радіоканалу та методика розрахунку зон радіопокриття та параметрів базового обладнання стільникової мережі радіозв'язку.

Видання призначено для студентів, які навчаються за напрямком „Радіотехніка”. Він також буде дуже корисний для аспірантів, інженерів та наукових співробітників, які спеціалізуються у застосуванні, проектуванні та дослідженні систем та комплексів радіозв'язку та їх елементів.

УДК 621.396.2

П217

@ Сайко В.Г.

2015

Зміст

Вступ.....	4
<u>1. Основи теорії трафіку систем і мереж радіозв'язку.....</u>	<u>6</u>
1.1. Поняття і параметри абонентського навантаження, якості обслуговування.....	6
1.2. Основи теорії масового обслуговування.....	9
1.3. Математична модель системи масового обслуговування з блокуванням виклику.....	15
1.4. Математична модель системи масового обслуговування з постановкою в нескінченну чергу.....	17
1.5. Проектування системи зв'язку на основі вимог інтенсивності трафіку, що реалізовується.....	18
<u>2. Принципи енергетичного розрахунку радіоліній зв'язку.....</u>	<u>21</u>
<u>3. Вплив характеристик обладнання тракту передавання (приймання) цифрової інформації на завадостійкість радіоканалу.....</u>	<u>28</u>
3.1. Призначення вузлів лінійного тракту.....	28
3.2. Основні параметри каналу радіозв'язку і фактори, що характеризують ефективність його використання.....	29
3.3. Використання поняття втрат завадостійкості каналу зв'язку при оцінці ефективності радіолінії.....	35
<u>4. Розрахунок зон радіопокриття базових станцій транкінгових мереж зв'язку.....</u>	<u>39</u>
<u>5. Розрахунок основних параметрів стільникової мережі радіозв'язку.....</u>	<u>53</u>
5.1. Розрахунок величини дуплексного розносу між частотними каналами.....	53
5.2. Розрахунок загальної кількості частотних каналів.....	53
5.3. Розрахунок розмірності кластера.....	53
5.4. Розрахунок кількості каналів.....	58
5.5. Розрахунок допустимого телефонного навантаження.....	58
5.6. Розрахунок кількості абонентів, які обслуговуються однією базовою станцією.....	59
5.7. Розрахунок необхідної кількості базових станцій.....	59
5.8. Розрахунок радіуса зони базової станції.....	60
5.9. Розрахунок величини захисної відстані.....	60
5.10. Розрахунок потужності передавача базової станції.....	60
5.11. Розрахунок імовірності помилки.....	61
<u>6. Методика розрахунку цифрової радіорелейної лінії прямої видимості...62</u>	<u>62</u>
6.1. Розрахунок основних характеристик цифрової радіорелейної лінії на основі апаратури РАДАН – 2М*Е1.....	64
6.1.1. Розрахунок плану розрахунку частот.....	64
6.1.2. Визначення середньої довжини хвилі λ_{cp} робочого ствола.....	65
6.1.3. Визначення і побудова профілю інтервалу радіорелейної лінії.....	66
6.1.4. Визначення висоти підвісу антен.....	69
6.1.5. Розрахунок відсотку часу зриву зв'язку.....	70
6.1.6. Перевірка стійкості зв'язку на всій лінії.....	75
Література.....	76

Вступ

У відповідності до загально прийнятої термінології під радіозв'язком розуміють зв'язок, який здійснюється за допомогою радіохвиль. При цьому до радіохвиль відносять електромагнітні хвилі, що розповсюджуються у просторі без штучного хвилеводу, частоти яких обмежені 3000 ГГц. Вказана границя, хоч і являється умовною, проте підкреслює обмеженість частотного ресурсу в системах радіозв'язку.

Згідно «Регламенту радіозв'язку», який затверджений Всесвітньою адміністративною конференцією радіозв'язку у 1979 р., системи радіозв'язку поділяються на наземні і космічні. Космічним рахується «... будь-який радіозв'язок, при якому використовується одна або декілька космічних станцій, або один або декілька відбиваючих супутників, або інші космічні об'єкти. Всі системи радіозв'язку, крім космічних та радіоастрономії, віднесені до наземних. Варто відмітити, що в регламенті радіозв'язку поняття «зв'язок» трактується широко, так що і радіонавігаційні, і радіолокаційні системи являються системами зв'язку. Але в даній книжці таких систем торкатися не будемо.

Регламент радіозв'язку обмежується класифікацією систем, оснований тільки на їх призначенні. Для цілей стандартизації вимог до систем часто використовується додаткова класифікація, яка враховує базові технічні принципи їх побудови. Саме так виділяється клас систем цифрового радіозв'язку, якому і присвячена дана книга.

В наш час цифрові системи радіозв'язку являються найбільш бурно розвиваючим сегментом ринку радіозасобів. Мікромініатюаризація аналогових НВЧ-мікросхем і впровадження мікропроцесорів якісно змінили радіоапаратуру зв'язку: вона стала не тільки засобом спеціального і професійного призначення, але і засобом комунікації масового споживача.

Системи радіозв'язку являються складними радіотехнічними комплексами, в яких можна виділити наступні основні складові: радіоканал, організацію мережі зв'язку і методи доступу до каналів зв'язку, голосоперетворення, завадостійке кодування і шифрування, взаємодія з іншими мережами зв'язку, периферійними пристроями і системами, діагностику стану мережі зв'язку і статистику роботи, керування з'єднаннями і доступом абонентів і т.д.

Основою функціонування будь-якої системи радіозв'язку є радіоканал. Метод формування спектрів сигналу, вид модуляції, схема приймача ВЧ модульованих сигналів, алгоритм відновлення переданого цифрового повідомлення визначають основні експлуатаційні характеристики системи радіозв'язку: число каналів зв'язку у виділеній полосі частот, швидкість передачі інформації в каналі, достовірність і якість прийому інформації.

Більша частина матеріалу присвячена викладенню основ системного проектування мереж і систем цифрового радіозв'язку: основам теорії

телетрафіку, енергетичного розрахунку ліній цифрових систем радіозв'язку, проблемам електромагнітної сумісності мереж радіозв'язку.

Основними проблемами, які вирішуються радіоінженерами при проектуванні мереж, є розрахунок дальності радіозв'язку і частотно-територіальне планування. Розрахунок дальності радіозв'язку заснований на моделі «великої відстані», відповідно до якої середня величина напруженості електромагнітного поля монотонно спадає зі збільшенням відстані від передавача, а випадкові флуктуації величини поля, викликані нерівномірністю рельєфу місцевості або міською забудовою, описуються нормальним логарифмічним законом. Розглядаються методики розрахунку дальності радіозв'язку, які ґрунтуються на експериментальних вимірюваннях напруженості поля і цифрових картах місцевості, рекомендаціях МККР (Міжнародний консультативний комітет з радіозв'язку), рекомендаціях EURO COST (Європейське об'єднання для наукових і технічних досліджень).

Матеріал книги складений на основі ряду лекційних курсів за напрямом «Радіотехніка», що читаються автором протягом багатьох років студентам Державного університету телекомунікацій. Слід відзначити деякі основні принципи, якими керувалися автори як при роботі над лекційними курсами, так і, як наслідок, при відборі матеріалів для даної книги. При написанні навчального посібника дотримувалася його інженерна спрямованість. Тому автор намагався, з одного боку, допомогти читачеві опанувати сучасним математичним апаратом, що використовуються для аналізу і синтезу цифрових систем радіозв'язку, а з іншого боку, не перевантажувати матеріал математичними викладками та доказами. У зв'язку з цим автори по можливості використовували спрощені математичні моделі, для яких одержувані результати виявляються досить зрозумілими, і приділяли відповідну увагу фізичній тлумачення одержуваних результатів та їх прикладної стороні. Виклад доводився до співвідношень, що дозволяє проводити моделювання фізичних процесів, що відбуваються у трактах і пристроях сучасних цифрових систем радіозв'язку, з використанням програмних пакетів MathLab, LabView і VisSim, а також інженерні розрахунки та оцінки. Автор намагався також зазначити, при вирішенні яких практичних завдань слід користуватися положеннями і висновками відповідної теорії.

Істотний вплив на зміст пропонованої увазі читачів книги надала і багаторічна діяльність автора зі створення сучасних систем і апаратури радіозв'язку. Ця обставина значною мірою визначила зміст книги та методику викладення матеріалів у ній. Через це, автор вважає що книга буде корисною інженерам, які зайняті експлуатацією сучасного радіообладнання.

Автор висловлюють глибоку вдячність рецензентам докторам тех. наук М.М. Климашу та М.В. Грянику, колективу кафедри радіотехнологій Державного університету телекомунікацій за корисні зауваження і поради, які були враховані автором.

1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТРАФІКУ СИСТЕМ І МЕРЕЖ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

1.1. Поняття і параметри абонентського навантаження, якості обслуговування

Одним з базових показників будь-якої системи зв'язку є її величина, або об'єм (Sizing of the system), який включає два основні параметри-площу зони обслуговування (Coverage Area) і інтенсивність трафіку, що реалізовується (Traffic Handling Capacity). Інтенсивність трафіку, що реалізовується системою зв'язку, з одного боку визначає можливе число користувачів системи при заданій якості обслуговування, з іншої - необхідне для цього число каналів зв'язку.

Інтенсивність трафіку (Traffic Flow / Traffic Intensity) визначається як витвір числа заявок на встановлення зв'язку або викликів (Calls), що поступають протягом певного проміжку часу, і середньої тривалості обслуговування одного виклику (Average Holding Time). У теорії трафіку за базовий проміжок часу при розрахунку інтенсивності зазвичай приймається 1 год. Таким чином, інтенсивність трафіку

$$E = \lambda \cdot t_h,$$

де λ - інтенсивність вступу викликів (Arrival Rate) [викликів в 1 год.]; t_h - середній час обслуговування одного виклику (Average Holding Time) [1 год. на виклик].

Одиниця виміру інтенсивності трафіку отримала назву «Ерланг» (Erlang) по імені одного із засновників теорії трафіку в телефонних мережах. У США вона також відома як Traffic Unit (TU).

При проектуванні і аналізі систем зв'язку інтенсивність навантаження визначається для так званої години найбільшого навантаження (Peak Busy Hour). Година найбільшого навантаження визначається як безперервний проміжок часу тривалістю 60 хв (1 год.), протягом якого навантаження на систему зв'язку максимальне. Інтенсивність викликів протягом години найбільшого навантаження може додатково усереднюватися по робочих днях тижня.

Для систем стільникового зв'язку (Cellular Radio), наприклад, найбільша інтенсивність навантаження в діловому районі міста доводиться на робочі дні тижня в проміжки між 10.00-12.00 і 13.00-15.00 год. (дані для США). На параметри години найбільшого навантаження робить вплив професійний склад користувачів, розташування зони обслуговування системи зв'язку і ін.

Пояснимо оцінку інтенсивності трафіку системи зв'язку простим прикладом. 1 Хай тривалість викликів, що доводяться на користувачів системи зв'язку, протягом години найбільшого навантаження наступна:

- 0-1 хв - 50% користувачів;
- 1-2 хв - 30% користувачів;
- 2-3 хв - 15% користувачів;
- 3-10 хв - 5% користувачів.

Тоді середня тривалість виклику

$$t_h = 0,5 \cdot 0,5 + 1,5 \cdot 0,3 + 2,5 \cdot 0,15 + 6,5 \cdot 0,05 = 1,4 \text{ хв}$$

Хай розподіл числа викликів між користувачами системи зв'язку протягом години найбільшого навантаження наступний:

- 0-1 виклик - 60% користувачів;
- 1-2 виклику - 30% користувачів;
- 2-10 викликів - 8% користувачів;
- 10 і більш за виклики - 2% користувачів.

Тоді інтенсивність вступу викликів від одного користувача

$$\lambda = 0,5 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 0,3 + 6 \cdot 0,08 + 10 \cdot 0,02 = 1,43 \text{ виклик/год}$$

Таким чином, інтенсивність навантаження системи зв'язку, що створюється одним користувачем, для даного прикладу наступна:

$$E = \frac{1,4}{60} \cdot 1,43 = 0,033 \text{ [Ерл]}.$$

Якщо число користувачів системи зв'язку складає M , то, відповідно, інтенсивність навантаження всієї системи буде

$$E = 0,033 \cdot N \text{ [Ерл]}.$$

Слід зауважити, що створюване абонентське навантаження $E_{\text{абон}} \text{ [Ерл]}$ визначається як витвір числа заявок λ , на встановлення зв'язку протягом певного проміжку часу [виклик/год] на середню тривалість обслуговування одного виклику $h \text{ [год]}$:

$$E_{\text{абон}} = \lambda \cdot h$$

Обслуговане абонентське навантаження визначається як відношення сумарного часу обслуговування всіх заявок протягом певного проміжку часу до тривалості цього проміжку часу:

$$E_{\text{абон}} = \frac{\sum t_i}{T}$$

де t_i -- тривалість обслуговування i -ї заявки; T - тривалість проміжку часу спостереження.

Для системи масового обслуговування з блокуванням виклику (заявка відхиляється, якщо система не має вільних каналів) створюване і обслуговане навантаження співвідносяться таким чином:

$$E_{\text{нїцї}} = \frac{\sqrt{(1 - 2E_{\text{їїїї}})^2 + 4E_{\text{їїїї}}} - (1 - 2E_{\text{їїїї}})}{2}$$

Окрім Ерланга, для виміру інтенсивності трафіку використовуються ще дві одиниці:

- Unit Calls (UC), звана також Hundred Calls Seconds (HCS) або Centum Calls Seconds (CCS). Інтенсивність трафіку, виражена в UC/HCS/CCS, заснована на припущенні, що середній час обслуговування одного виклику складає 100 с;
- Equated Busy Hour Call (EBHC). Інтенсивність трафіку, виражена в EBHC, заснована на припущенні, що середній час обслуговування одного виклику складає 2 мін (120 з).

Співвідношення між основними одиницями виміру інтенсивності трафіку приведені в таблицю 1.

Таблиця 1 Співвідношення між основними одиницями інтенсивності трафіку

Одиниця інтенсивності трафіку	Erlang	CCS	EBHC
1 Erlang, 1 TU	1	36	30
1 CCS, 1 HCS, 1 UC	1/36	1	5/6
1 EBHC	1/30	6/5	1

Для того, щоб будь-який виклик, що приходить, був обслугований без затримок і відмов, викликаних відсутністю в даний момент вільних каналів зв'язку, система зв'язку повинна володіти числом каналів зв'язку, рівним числу користувачів (число фізичних радіоканалів при цьому має бути більше числа користувачів в 2-4 рази залежно від симплексного/дуплексного вигляду зв'язку). Природно що вже при декількох десятках користувачів це стає неможливим таким чином, обмежений ресурс (кінцеве число радіоканалів і, отже, каналів зв'язку) є причиною блокування викликів - виклик, що поступив в мить, коли всі канали зв'язку системи зайняті, обслуговуватись не буде (принаймні, негайно). У цій ситуації користувач повинен буде чекати звільнення каналу зв'язку або повторити виклик пізніше.

Якість обслуговування (GOS – Grade of Service) визначається як відношення числа блокованих викликів до загального числа викликів, що поступили в систему. Таким чином, GOS є мірою недостатності наявних в системі каналів зв'язку для обслуговування користувачів. На практиці GOS визначається як відносне число викликів, блокованих унаслідок недоліку каналів зв'язку протягом години найбільшого навантаження.

У системах стільникового зв'язку величина GOS зазвичай встановлюється на рівні 0,02 і менш. Це означає, що протягом години найбільшого навантаження буде обслужено в середньому 98% викликів користувачів системи стільникового зв'язку. Природно, що в періоди меншого навантаження GOS буде краще і фактично система може працювати взагалі без блокування викликів.

1.2. Основи теорії масового обслуговування

Система зв'язку з точки зору надання послуг зв'язку користувачам (абонентам) відноситься до так званих систем масового обслуговування. Робота системи масового обслуговування полягає у виконанні поступаючого на нього потоку вимог (заявок, викликів) шляхом надання каналів обслуговування (в разі системи зв'язку - каналів зв'язку). Заявки поступають одна за одною в деякі випадкові моменти часу. Обслуговування заявки що поступила, проводиться деякий час, після чого канал звільняється і знову готовий для прийому наступної заявки. Кожна система масового обслуговування в залежності від наявного числа каналів і їх продуктивності володіє якоюсь пропускнуною спроможністю, що дозволяє їй більш менш успішно справлятися з потоком заявок. Предмет теорії масового обслуговування полягає у встановленні залежності між характером потоку заявок, продуктивністю окремого каналу, числом каналів і успішністю (ефективністю) обслуговування.

Під пропускнуною спроможністю у вузькому сенсі слова зазвичай розуміють середнє число заявок, яке система може обслужити в одиницю часу. Разом з цим часто розглядають відносну пропускну спроможність - середнє відношення числа обслужених заявок до тих, що поступили. Пропускна спроможність (як абсолютна, так і відносна) в загальному випадку залежить не лише від параметрів системи, але і від характеру потоку заявок. Якби заявки поступали регулярно, через строго певні проміжки часу, і обслуговування кожної заявки теж мало строго певну тривалість, розрахунок пропускнуною спроможності системи не представляв би жодної трудності. На практиці зазвичай моменти вступу заявок випадкові, випадкова і тривалість обслуговування заявки. У зв'язку з цим, процес роботи системи протікає нерегулярно: у потоці заявок утворюються місцеві згущування і розрідження. Згущування можуть привести або до відмов в обслуговуванні, або до утворення черг. Розрідження можуть привести до непродуктивних простоїв окремих каналів або системи в цілому. На ці випадковості, пов'язані з неоднорідністю потоку заявок, накладаються ще випадковості, пов'язані з різною тривалістю обслуговування окремих заявок. Таким чином, процес функціонування системи масового обслуговування є випадковим процесом. Аби дати рекомендації по раціональній організації системи, з'ясувати її пропускну спроможність і пред'явити до неї обґрунтовані вимоги, необхідно вивчити випадковий процес, що протікає в системі, і описати його математично.

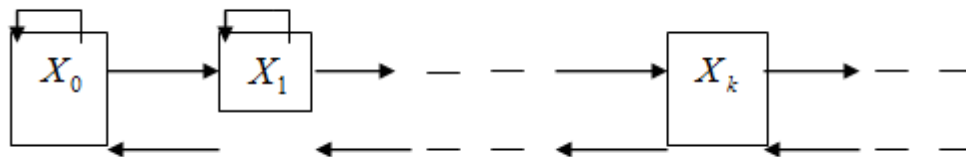
Випадковий процес, що протікає в системі масового обслуговування, полягає в тому, що система у випадкові моменти часу переходить з одного стану в інше (міняється число зайнятих каналів, число заявок, що стоять в черзі, і тому подібне). Таким чином, система масового обслуговування є фізичною системою дискретного типу з рахунковою безліччю станів, а перехід системи з одного стану в інше відбуваються стрибком, в мить, коли здійснюється яка-небудь подія (прихід нової заявки, звільнення каналів і тому подібне). Системи зв'язку відносяться до систем масового обслуговування з безперервним часом (перехід системи з одного стану в

інше можливий у будь-який момент часу) і з оборотними переходами (канал зв'язку після обслуговування заявки, що поступила, звільняється і може використовуватися далі).

Система зв'язку може бути представлена у вигляді фізичної системи X з рахунковою безліччю станів $X_0, X_1, X_2, \dots, X_k$ (мал. 1):

- X_0 - всі канали вільні ;
- X_1 - зайнятий рівно один канал;
-
- X_k - зайнято рівно k каналів;
-

Стрілками на малюнку змальовані можливі переходи між станами системи: прихід нової заявки (заняття каналу), відхід обслуженої заявки(звільнення каналу), а також відсутність змін в змозі (жодна заявка не поступила, жоден канал не звільнився)



Мал. 1. Схема можливих станів системи масового обслуговування і можливих переходів із стану в стан

У будь-який момент часу t система X може бути в одному з цих станів. Позначимо $p_k(t)$ ($k=1,2,n,.$) вірогідність того що у момент t система буде знаходитися в стані X_k . Вочевидь, що для будь-якого t

$$\sum_{k=1}^{\infty} p_k(t) = 1$$

Сукупність вірогідності $p_k(t)$ для кожного моменту часу t характеризує даний перетин випадкового процесу, що протікає в системі. Ця сукупність не є вичерпною характеристикою процесу (вона, наприклад, не відображає залежності між перетинами), але проте досить добре описує процес і для ряду практичних вживань виявляється достатньою. Під потоком подій в теорії вірогідності розуміється послідовність подій, що відбуваються одне за іншим в якісь моменти часу. При моделюванні систем зв'язку найширше використовується простий (або

стаціонарний пуассонівський) потік, що володіє такими основними властивостями, як:

- стаціонарність - вірогідність попадання того або іншого числа подій на ділянку часу завдовжки τ залежить лише від довжини ділянки і не залежить від його розташування на осі часу. Умові стаціонарності задовольняє потік заявок, імовірнісні характеристики якого не залежать від часу. Зокрема, для стаціонарного потоку характерна постійна щільність (середнє число заявок в одиницю часу). На практиці, проте, потік заявок не може вважатися стаціонарним протягом всього часу експлуатації системи (наприклад, вночі щільність викликів будь-якій системі зв'язку значно менше, ніж вдень). Тому система аналізується зазвичай для якихось середніх або найгірших умов експлуатації (в разі сухопутної рухливої служби - для години найбільшого навантаження);

- відсутність післядії - для будь-яких ділянок часу, що не перекриваються, число подій, що потрапляють на один з них, не залежить від числа подій, що потрапляють на інших. Умова відсутності післядії - найбільш істотне для простого потоку - означає, що заявки поступають в систему незалежно один від одного;

- ординарність - вірогідність попадання на елементарну ділянку часу $\Delta t \rightarrow 0$ двох або більше подій дуже мала з вірогідністю попадання однієї події або вірогідність відсутності події. Умова ординарності означає, що заявки приходять поодиноці, а не парами, трійками і так далі

При дотриманні вказаних умов число подій, що потрапляють на будь-який фіксований інтервал часу, буде розподілено за законом Пуассона (мал. 2).

Вірогідність того, що за час t станеться рівно m подій, наступна:

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda \cdot \tau)^m}{m!} \cdot e^{-\lambda \cdot \tau},$$

де λ - щільність потоку (середнє число подій, що доводиться на одиницю часу).

Зокрема, вірогідність того, що за час t не станеться жодної події, буде

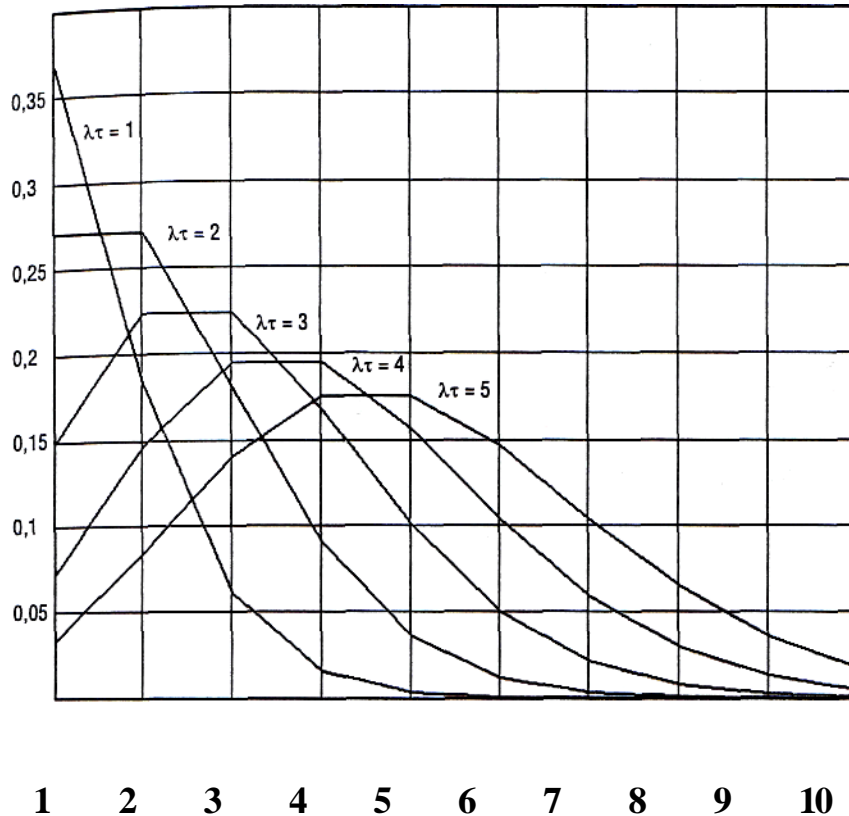
$$P_0(\tau) = e^{-\lambda \cdot \tau}.$$

Важливою характеристикою потоку є закон $F(t)$ розподілу довжини проміжку між сусідніми подіями. Вірогідність того, що на ділянці часу завдовжки t , що починається у момент появи однієї з подій потоку, не з'явиться жодного з наступних подій, буде

$$1 - F(t) = P_0(\tau) = e^{-\lambda \tau} \quad (t > 0),$$

Звідки

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \tau} \quad (t > 0)$$



Мал. 2. Закон розподілу Пуассона дискретної випадкової величини

Диференціюючи, знайдемо щільність розподілу довжини проміжку між сусідніми подіями потоку:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \tau} \quad (t > 0)$$

Закон розподілу з такою щільністю вірогідності називається показовим законом, а величина λ - його параметром (мал. 3). Математичне очікування і дисперсія величини, розподіленої по показовому закону:

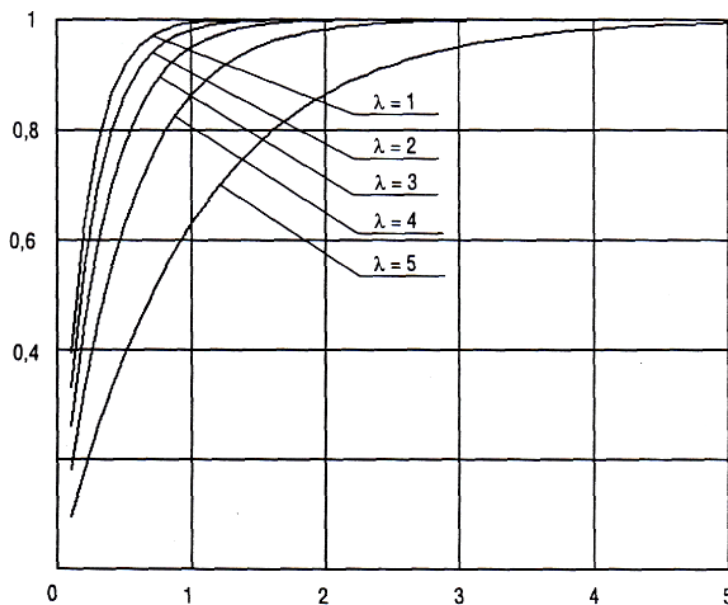
$$m_t = 1/\lambda,$$

$$D_t = 1/\lambda^2.$$

Одна з основних властивостей показового закону полягає в тому, що якщо проміжок, розподілений по такому закону, вже тривав деякий час t , то це ніяк не впливає на закон розподілу частини проміжку, що залишилася, - він буде таким же, як і закон розподілу всього проміжку. Показовий закон -- єдиний, такий, що володіє такою властивістю. Цим властивістю показового закону є, по суті, інше формулювання «відсутності післядії», яка є основною властивістю простого потоку, окрім характеристик вхідного потоку заявок режим роботи системи масового обслуговування залежить ще від характеристик продуктивності самої системи: каналів S і часу обслуговування однієї заявки t_h . В загальному випадку остання величина є випадковою. Для практики особливий інтерес представляє випадок, коли час обслуговування має показовий розподіл:

$$g(t) = \mu \cdot e^{-\mu t} (t > 0),$$

де параметр μ - величина, зворотна середньому часу обслуговування t_h однієї заявки



Мал. 3. Показовий закон розподілу безперервної випадкової величини

Причина, по якій цей закон використовується для характеристики часу обслуговування, полягає у вже згадуваній властивості відсутності наслідків: якщо в якийсь момент відбувається обслуговування заявки, то закон розподілу часу обслуговування, що залишився, не залежить від того, скільки часу обслуговування вже продовжувалося. Показовий закон не є універсальним законом розподілу часу

обслуговування. Проте пропускна спроможність і інші характеристики системи масового обслуговування порівняно мало залежать від вигляду закону розподілу часу обслуговування, а залежать, головним чином, від його середнього значення. Тому в теорії масового обслуговування найчастіше користуються допущенням, що час обслуговування розподілено по показовому закону. Ця гіпотеза дозволяє сильно спростити математичний апарат, вживаний для вирішення завдань масового обслуговування, і у ряді випадків отримати прості аналітичні формули для характеристик пропускної спроможності системи. Допущення про пуассонівському характеру потоку заявок і про показовий розподіл часу обслуговування дозволяють застосувати в теорії масового обслуговування апарат марківських випадкових процесів. Процес, що протікає у фізичній системі, називається марківським (або процесом без післядії)! якщо для кожного моменту часу вірогідність будь-якого стану системи в майбутньому залежить лише від стану системи зараз і не залежить від того, яким чином система прийшла в цей стан. Марківський процес можна описати за допомогою звичайних диференціальних рівнянь, в яких невідомими функціями є вірогідність стані системи.

Реальні потоки в мережах зв'язку і особливо в мережах передачі даних не завжди є стаціонарними пуассонівськими, наприклад, через періодичні коливання інтенсивності потоків залежно від години доби. Якщо такі коливання досить плавні, тобто час обслуговування запиту багато менше, ніж середній час, протягом якого інтенсивність потоку може розглядатися як деяка постійна, то пуассонівська модель може застосовуватися на інтервалах постійності інтенсивності потоку.

Якщо ж коливання інтенсивності мають різкий характер, слід взяти за модель потоку так званий потік або його окремий випадок ВМАР (batch Markovian arrival process) - ММРР (Markovian modulated Poisson process).

Питання про допустимість апроксимації реального потоку стаціонарним пуассонівським потоком досить легко вирішується за наявності результатів спостереження за моментами вступу запитів реального потоку за допомогою λ^2 - критерія Пірсона.

На інтуїтивному рівні ММРР потік легко трактується таким чином. Є $W, \omega < +\infty$ рівнів постійності потоку. На кожному r -м рівні постійності в систему поступає стаціонарний пуассонівський потік інтенсивності $\lambda_r (r = \overline{1, N})$. Тривалість знаходження потоку на r -м рівні постійності має експоненціальний розподіл з параметром φ_r . Після завершення перебування на r -м рівні постійності потік перескакує на r' -й рівень постійності з ймовірністю $P_{r,r'} (r' = \overline{1, W}, r = \overline{1, W})$.

Таким чином, ММРР потік можна задати числом W рівнів постійності, наборами $\{\lambda_1, \dots, \lambda_W\}$ і $\{\varphi_1, \dots, \varphi_W\}$ інтенсивностей і матрицею

$$P = \left\| P_{r,r'} \right\|_{r,r'=\overline{1,W}} \text{ вірогідності переходу між рівнями.}$$

Моделювання реального потоку в термінах ММРР потоку зводиться до апроксимації траєкторії інтенсивності реального потоку частково-постійною функцією.

Відмітимо, що для точнішої апроксимації реального потоку слідє виділити велике число рівнів постійності. Проте слід шукати розумний компроміс, оскільки значне збільшення числа рівнів може привести до виникнення проблем при чисельній реалізації викладених нижче за методи.

Складнішою на практиці виявляється і функція розподілу часу обслуговування. Така функція може описуватися гіперекспоненціальним законом, розподілом Ерланга к-го порядку, рівномірним розподілом, виродженим розподілом.

В цілому системи масового обслуговування можна розділити на двох основних типів:

- система з відмовами - заявка, що поступила в мить, коли всі канали обслуговування зайняті, негайно дістає відмову (анулюється), покидає систему і надалі в процесі обслуговування не бере участь;

- система очікування- заявка, що застала всі канали обслуговування зайнятими, систему не покидає, а стає в чергу і чекає, поки не звільниться який-небудь канал. Час чекання заявки в черзі може бути як кінцевим, так і необмеженим залежно від параметрів системи (ємкості буфера).

1.3. Математична модель системи масового обслуговування з блокуванням виклику

Нехай є S-канальна система масового обслуговування з відмовами. Розглянемо її як фізичну систему X з кінцевою безліччю станів:

- X_0 - вільні всі канали;
- X_1 - зайнятий лише один канал;
- X_k - зайнято рівно k каналів;
- X_s - зайняті всі S каналів.

Схема можливих переходів в системі X представлена на мал. 4.

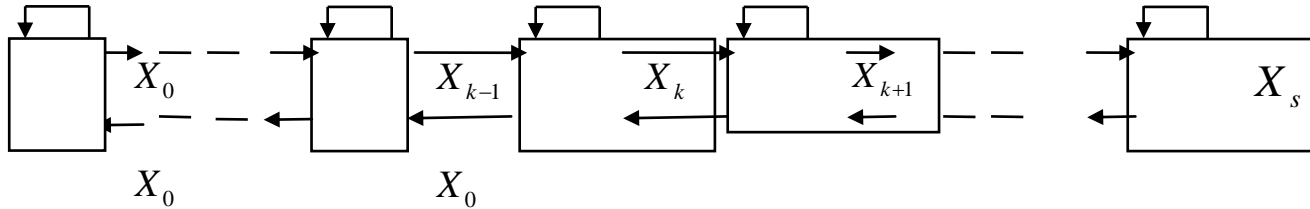
Хай потік заявок - простий з щільністю λ і час обслуговування має показовий розподіл з параметром $\mu = 1/t_h$:

$$g(t) = \mu \cdot e^{-\mu t} \quad (t > 0)$$

Відмітимо, що параметр μ в останньому вираженні повністю аналогічний параметру λ показового закону розподілу проміжку часу між двома сусідніми подіями простого потоку:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (t > 0)$$

Параметр λ має сенс «щільності потоку заявок». Аналогічно, величину μ можна тлумачити як «щільність потоку звільнень» зайнятого каналу. Оскільки обидва потоки - заявок і звільнень - прості, процес, що протікає в системі, буде марківським



Мал. 4. Схема можливих переходів між станами в системі з відмовами

У нинішній момент часу система повністю описується набором ймовірностей $p_0(t), p_1(t), \dots, p_s(t)$ знаходження в тому або іншому стані.

З урахуванням того, що стани системи є повною групою подій:

$$\sum_{k=0}^s p_k(t) = 1$$

Вірогідність невступу жодної заявки за інтервал часу Δt наступна:

$$p_0^B(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t}$$

Вірогідність вступу однієї заявки за інтервал часу Δt наступна:

$$p_0^B(\Delta t) \approx 1 - p_1^b(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda \Delta t}$$

Вірогідність незвільнення жодного каналу з q зайнятих каналів наступна:

$$p_0^{o.\hat{e}}(\Delta t) \Big|_q = (e^{-\mu \Delta t})^q$$

Вірогідність звільнення одного каналу з q зайнятих каналів наступна:

$$p_1^{o.\hat{e}}(\Delta t) \Big|_q \approx q(1 - p_0^{o.\hat{e}}(\Delta t) \Big|_1) = q(1 - e^{-\mu \Delta t}).$$

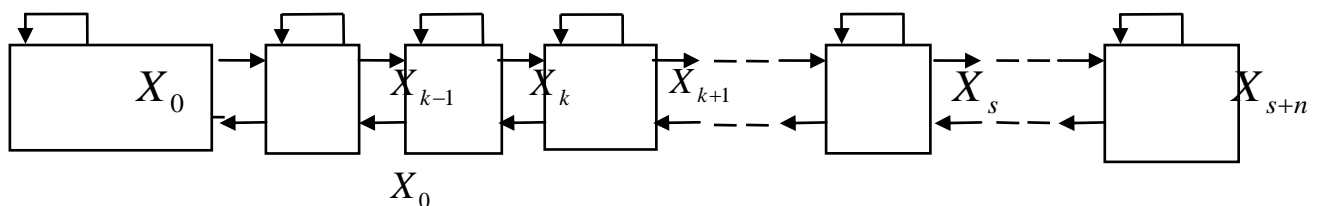
Сукупність рівнянь, приведених вище, спільно з схемою можливих переходів між станами в системі представляють математичну модель системи масового обслуговування з блокуванням виклику.

1.4. Математична модель системи масового обслуговування з постановкою в нескінченну чергу

Хай є система масового обслуговування, в якій заявка, що застала всі канали зайнятими, стає в чергу і чекає звільнення каналу необмежений час (так звану чисту систему з чеканням). Такий випадок є природним узагальненням завдання Ерланга для системи з відмовами. Роздивимось систему масового обслуговування з S каналами як фізичну систему X з безкінечними (хоча і рахунковим) в загальному випадку безліччю станів:

- X_0 - вільні всі канали (черги немає);
- X_1 - зайнятий лише один канал (черги немає);
- X_k - зайнято рівно k каналів (черги немає);
- X_S - зайняті всі S каналів (черги немає);
- X_{S+1} - зайняті всі S каналів, одна заявка стоїть в черзі;
- X_{S+n} - зайняті всі S каналів, n заявок коштують в черзі.

Схема можливих переходів в системі X представлена на мал. 5.



Мал. 5. Схема можливих переходів між станами в системі з безкінечною чергою

Хай потік заявок - простий з щільністю λ , і час обслуговування має показовий розподіл з параметром $\mu = 1/t_h$. Тоді у теперішній момент часу система повністю описується набором вірогідності $p_0(t), p_1(t), \dots, p_{S+n}(t)$ (n прагне до нескінченності) знаходження в тому або іншому стані.

З урахуванням того, що стани системи є повною групою подій:

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k(t) = 1$$

Вірогідність невступу жодної заявки за інтервал часу Δt наступна:

$$p_0^{\hat{A}}(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t}$$

Вірогідність вступу однієї заявки за інтервал часу Δt наступна:

$$p_1^{\hat{A}}(\Delta t) \approx 1 - p_0^{\hat{A}}(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda \Delta t}$$

Вірогідність незвільнення жодного каналу з q зайнятих каналів наступна:

$$p_0^{o.\hat{e}}(\Delta t) \Big|_q = (e^{-\mu \Delta t})^q$$

Вірогідність звільнення одного каналу з q зайнятих каналів наступна:

$$p_1^{o.\hat{e}}(\Delta t) \Big|_q \approx q(1 - p_0^{o.\hat{e}}(\Delta t) \Big|_1) = q(1 - e^{-\mu \Delta t}).$$

Сукупність рівнянь, приведених вище, спільно з схемою можливих переходів між станами в системі представляють математичну модель системи масового обслуговування з постановкою в безкінечну чергу.

1.5. Проектування системи радіозв'язку на основі вимог інтенсивності трафіку, що реалізовується

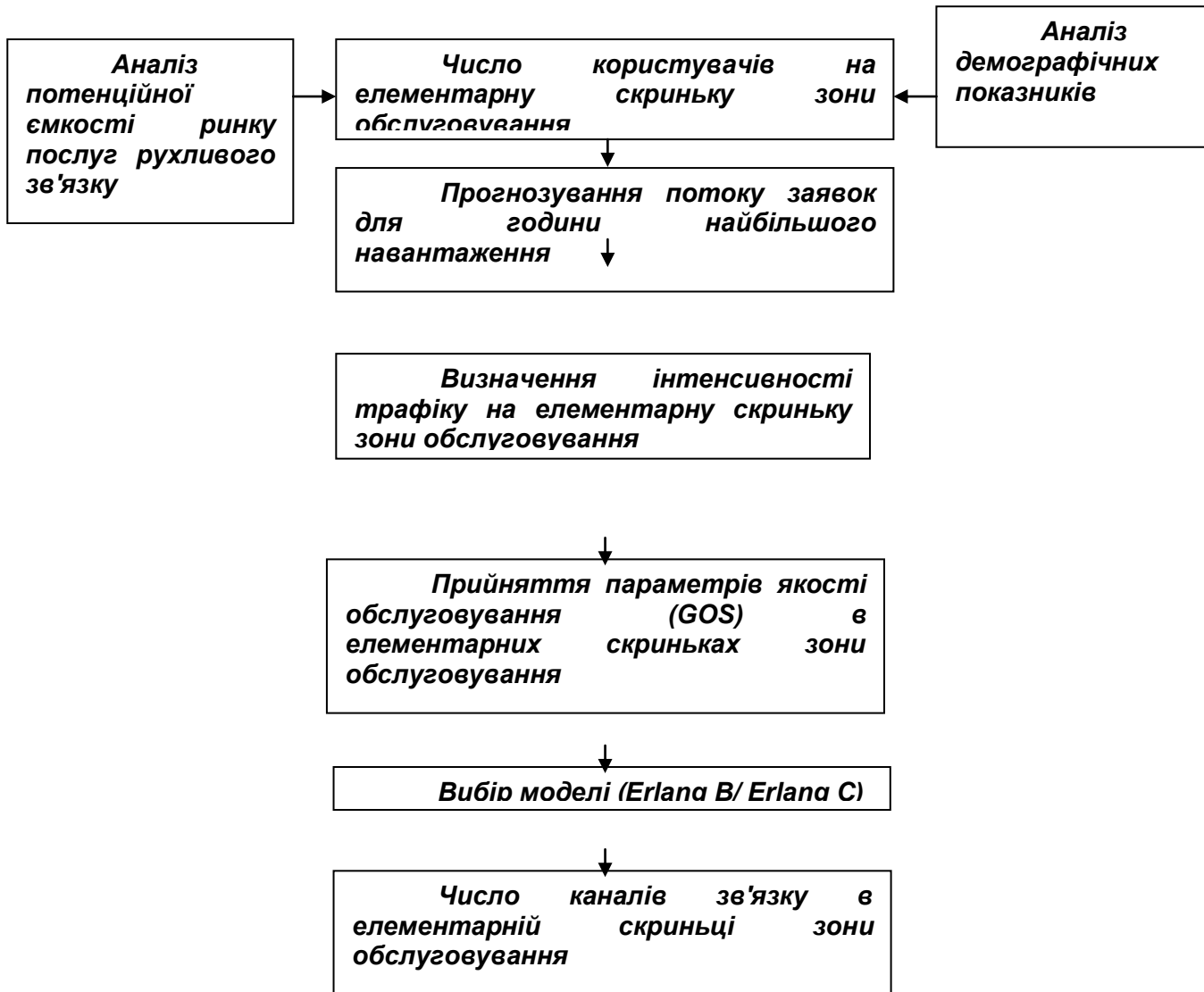
Завданням будь-якої системи зв'язку зрештою є надання користувачам (абонентам) системи послуг зв'язку. Аби визначити кількість каналів зв'язку, необхідних для реалізації цього завдання, в першу чергу слід спрогнозувати інтенсивність трафіку системи зв'язку.

Визначення інтенсивності трафіку проектованої системи зв'язку ґрунтується на аналізі демографічних показників (зокрема, щільність населення) і прогнозованої ємності ринку послуг рухливого зв'язку в зоні обслуговування. Спрощена процедура проектування системи зв'язку по критерію інтенсивності трафіку, що реалізовується, представлена на мал. 10.

Залежно від вигляду зв'язку для визначення числа каналів зв'язку використовуються різні моделі системи масового обслуговування (таблиця. 1).

Таблиця 1 Вірогідність блокування для різних моделей СПС

Модел	Вірогідність блокування (у момент вступу кліку всі S каналів зв'язку виявляються вільними)	Примітки
Erlang	$P_b = (E^S / S!) / \left(\sum_{k=0}^S E^k / k! \right)$	Блоковані виклики анулюються
Erlang	$P_b = \frac{(E^S / S!)[S / (S - E)]}{\sum_{k=0}^{s-1} (E^k / k!) + \{(E^k / S!)[S / (S - E)]\}}$ $T_{wait} = \sum_{n=S}^{\infty} \frac{(n - S + 1)h}{S} \frac{\left(\frac{E^S}{S!} + \frac{E^S E^{n-S}}{S! S^{n-S}} \right)}{\sum_{k=0}^S \frac{E^k}{k!} + \frac{E^S E}{S! S - E}}$	Блоковані виклики стають в чергу і обслуговуються по мірі звільнення каналів зв'язку (час чекання не обмежено)



Мал. 10. Процедура проектування СПС по критерію інтенсивності трафіку, що реалізовується.

2. ПРИНЦИПИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ ЛІНІЙ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Середовище, через яке поширюються радіохвилі між пунктами передачі і прийому, робить сильний вплив на роботу системи радіозв'язку. Отже, при розгляді питань використання частотного спектру необхідне знання характеристик поширення радіохвиль (РРВ).

Від лінії (каналу) радіозв'язку потрібне виконання певної функції. Її виконання пов'язане з передачею інформації з одного місця в інше, а оцінка якості виконання цієї функції пов'язана як з об'ємом інформації, яка передається протягом заданого відрізка часу, так і з точністю відтворення (якість прийому) інформації на виході системи.

При плануванні і розміщенні радіосистем перед фахівцями виникають завдання вибору пунктів розміщення станцій, вибору робочих частот і визначення необхідної апаратури кінцевих пунктів, яка повинна забезпечити виконання певних вимог, що пред'являються до зв'язку. Інші радіосистеми (наприклад, радіолокації) виконують інші функції, але завдання узгодження параметрів апаратури і параметрів середовища РРВ залишається.

Тут доречно відзначити відмінність робочих характеристик апаратури від робочих характеристик радіосистеми: останні включають робочі характеристики апаратури спільно з характеристиками поширення сигналів (перешкод) в середовищі РРВ.

Втрати енергії при поширенні РРВ є одним з основних параметрів, який повинен враховуватися при визначенні реального розміру зони обхвату радіосистеми і рівня неумисних перешкод. Строго кажучи, важко повністю відокремити вплив характеристик РРВ на використання радіоспектру від впливу характеристик вживаної апаратури радіосистем і їх вплив слід було б розглядати в комплексі. Проте в цілях аналізу будь-якого складного завдання її часто розділяють на простіші і розглядають окремо, а отримані результати використовуються при вирішенні завдань синтезу.

Найважливішою вимогою до ліній (мережам) радіозв'язку є якість передачі інформації, що зазвичай задається достовірністю і надійністю. Їх досягнення можливе при виконанні двох умов:

- спотворення сигналу в передавачі, середовищу РРВ і приймачі не повинні перевищувати допустимих меж
- потужність сигналу $P_{\text{прм}}$ (або напруженість поля E_c) в пункті прийому повинна перевершувати раз (або в раз) сумарну потужність перешкод P_p (або напруженість поля перешкод E_p) і власних шумів на вході (або напруженість поля) приймача $P_{\text{ш}}$

$$P_{\text{прм}} / (P_p + P_{\text{ш}}) \geq K_{\text{доп}}^2 \quad (1)$$

або

$$E_c / (E_n + E_{ш}) > K_{доп}$$

З нього виходить, що навіть при рівні зовнішніх перешкод на вході приймача, рівному нулю ($P_n = 0$), якість сигналу, що приймається, обмежується власними шумами приймача, чутливістю останнього.

Необхідне значення $K_{доп}$ залежить від того:

- який клас випромінювання використовується
- яка достовірність прийому допускається (залежить від термінального устаткування, зокрема)
- чи використовується корегуюче кодування
- яка надійність зв'язку потрібна і ін.

Чим строгіші вимоги до якості радіозв'язку, тим більше має бути коефіцієнт $K_{доп}$, тобто тим більшим має бути перевищення рівня сигналу, що приймається, над рівнем перешкод, наведених в приймальній антені.

Відзначимо, що в загальному випадку якість прийому визначається співвідношенням сигнал/(перешкода + спотворення + шум) на виході радіоприймача. Для кожного типу модему можна встановити взаємозалежність між співвідношеннями сигнал/перешкода (або сигнал/шум) на виході приймача і на його вході.

Оскільки в природному середовищі РРВ величини E_c і E_n випробовують безперервні випадкові зміни, то достовірність прийому оцінюється за порівняно короткі відрізки часу, коли E_c / E_n можна вважати незмінним. За довгі інтервали часу відношення E_c / E_n змінюється і при глибоких падіннях E_c / E_n необхідна достовірність прийому може взагалі не забезпечуватися.

Характеристика стійкості роботи радіолінії – надійність радіозв'язку, під яким розуміється відношення сумарного часу зв'язку із заданою достовірністю до загального часу зв'язку (за умови справності всіх технічних засобів). Чим довше сеанс зв'язку, тим більше можуть змінюватися E_c і E_n . Тому надійність роботи лінії радіозв'язку прийнято відносити до певного інтервалу часу (за добу, місяць, рік). Одним із способів підвищення надійності радіозв'язку є використання адаптивних радіосистем.

Сучасні вимоги по достовірності визначаються вірогідністю помилкового прийому знаку $P_{ош.зн}$ і складають:

$$P_{ош.зн} < 10^{-3} \text{ для телеграфних повідомлень}$$

$P_{ош.зн} < 10^{-6} \dots 10^{-7}$ при передачі даних (вірогідність прийому помилкової команди передбачаються не більш $P_{лож} < 10^{-9}$, а вірогідність пропуску команди $P_{проп}$ не гірше 10^{-5}).

Основою для визначення допустимих P_c / P_n на виході тракту прийому при передачі/прийомі аналогових повідомлень є їх необхідна розбірливість, досліджувана методами артикуляцій.

Суб'єктивній оцінці якості зв'язку відповідають значення розбірливості, приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Зв'язок між якістю зв'язку і співвідношенням сигнал/шум

Оцінка якості зв'язку	Складова розбірливість	Смислова розбірливість	P_c/P_n , (дБ)
відмінно	80... 90	98 ... 99	80... 100;
добре	60 ... 80	97 ... 98	(16...20) дБ
.	40 ... 60	95 ... 97	20 ... 80; (13 ... 16)дБ

При смисловій (фразовій) розбірливості менше 90 % контакт між абонентами порушується.

Задана якість згідно (1) реалізується на відстані r між кореспондентами, називається дальністю радіозв'язку.

Таким чином, дальність радіозв'язку знаходиться у взаємній залежності від:

- класу випромінювань
- умов РРВ на трасі зв'язку (у обслуговуваній територіальній зоні)
- електромагнітної обстановки в місцях прийому радіосигналів
- енергетичних параметрів радіопередавальних і радіоприймальних пристроїв, включаючи антенні пристрої.

Використовуючи (1), можна вивести основне рівняння для енергетичного розрахунку радіоліній.

Взаємозв'язок між необхідною потужністю на вході приймача $P_{прм}$, потужністю передавача $P_{пер}$ і параметрами середовища РРВ виводиться з наступних міркувань.

Потік потужності у вільному просторі через одиничний майданчик сфери на відстані r від випромінювача пропорційний величині

$$P_{пер} \eta_{Апер} G_{Апер} / 4\pi r^2, \quad (2)$$

де $\eta_{Апер}$, $G_{Апер}$ – ККД фідера і коефіцієнт посилення передавальної антени, $4\pi r^2$ – площа сфери радіусу r .

Коефіцієнт посилення антени – відношення потужності на вході еталонної антени до потужності, що підводиться до входу даної антени, за умови, що обидві антени створюють в даному напрямі на однаковій відстані рівні напруженості поля або такої ж щільності потік потужності. За відсутності вказівки про напрям значення коефіцієнта посилення антени відповідає напрямку максимального випромінювання. Коефіцієнт посилення може виражатися в децибелах.

Приймальна антена "перехоплює" лише ту частину енергії цього потоку, яка пропорційна ефективній площі приймальної антени S_A . Так, для апертурних антен

$$S_A = G_{A\text{прм}} \lambda^2 / 4\pi ,$$

де $G_{A\text{прм}}$ – коефіцієнт посилення приймальної антени λ – довжина хвилі сигналу, що приймається.

Ефективна площа приймальної антени – площа, визначувана відношенням максимальної потужності, яка може бути віддана приймальною антеною в погоджене навантаження, до потужності, що доводиться на одиницю площі в падаючій плоскій хвилі.

Тому потужність, що підводиться до фідера приймальної антени, складе

$$P_{\text{пер}} \eta_{\text{ф пер}} G_{A\text{пер}} G_{A\text{прм}} (\lambda^2 / 16\pi^2 r^2)$$

Величина потужності на вході приймача залежить ще від ККД фідера приймальної антени $\eta_{\text{ф прм}}$, і двох коефіцієнтів: узгодження передавальної і приймальної антен по поляризації ($K_{\text{согл.1}}$) і узгодження ($K_{\text{согл.2}}$) вхідного опору приймача $Z_{\text{прм}} = K_{\text{прм}} + j X_{\text{прм}}$ з приймальною антеною ($Z_A = R_A + jX_A$), визначуваного виразом

$$K_{\text{согл.1}} = 4R_A R_{\text{прм}} / |Z_A + Z_{\text{прм}}|^2 ,$$

і рівна

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{пер}} \eta_{\text{ф пер}} \eta_{\text{ф прм}} G_{A\text{пер}} G_{A\text{прм}} K_{\text{согл.1}} K_{\text{согл.2}} \lambda^2 / 4\pi r^2 . \quad (3)$$

Коефіцієнт $W_0 = (4\pi r)^2 / \lambda^2$ називають загасанням енергії радіохвиль у вільному просторі. При використанні логарифмічних одиниць величина W_0 виражається в дБ. В цьому випадку вона застосована як для розрахунків потужностей, так і для розрахунків напруженості поля.

При грубій оцінці вираження (3) можна представити у вигляді

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{пер}} G_{A\text{пер}} G_{A\text{прм}} / W_0$$

Знаходить вживання інше вираження для напруженості поля при поширенні хвиль у вільному просторі, отримане через вектор Пойнтінга

$$\Pi = E_A H_D \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

де E_A – значення напруженості електричного поля радіохвилі, що діє, H_D – значення напруженості магнітного поля радіохвилі, що діє

$$H_D = E_A / 120\pi \text{ [А/м]}.$$

Тут величина 120π є хвилевим опором вільного простору. Після підстановки H_D в попереднє вираження, отримуємо

$$\Pi = E_A^2 / 120\pi \text{ [Вт/м}^2\text{]}.$$

Після підстановки отриманого співвідношення у формулу, що відображає визначення (дефініцію) вектора Пойнтінга

$$\Pi = P_{\text{івл}} / (4\pi r^2),$$

і дозволу відносно E_A отримаємо вираження для обчислення значення напруженості електричного поля, що створюється передавачем з ізотропною антеною на відстані, що діє r [м]:

$$E_A = \sqrt{30P_{\text{івл}}} / r \text{ [В/м]}.$$

Далі, зв'язавши $P_{\text{івл}}$ з $P_{\text{пер}}$ через $\eta_{\text{ф пер}} \cdot G_{\text{А пер}}$, а E_A через $\eta_{\text{ф прм}} \cdot G_{\text{А прм}}$, можна отримати вираження для E_A через технічні параметри апаратури при використанні реальних антен. Згадані параметри знаходяться під знаком радикала. На реальній трасі зв'язку детерміноване загасання енергії хвиль ($W_0 W_T$) відрізняється від W_0 .

Тому

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{пер}} G_{\text{А пер}} G_{\text{А прм}} / W_0 W_T. \quad (4)$$

Дозвіл нерівності відносно $P_{\text{пер}}$ призводить до основного рівняння для енергетичного розрахунку радіоліній

$$P_{\text{пер}} \geq \frac{(P_{\text{п}} + P_{\text{ш}}) K_{\text{доп}}^2 W_0 W_{\text{Г}}}{\eta_{\text{ф пер}} \eta_{\text{ф прм}} G_{\text{А пер}} G_{\text{А прм}}}. \quad (5)$$

Після логарифмування права частина вираження стає алгебраїчною сумою (у дБ). Співвідношення (4) може бути використане не лише для визначення потужності сигналу на вході приймача, але і для визначення рівнів перешкод від відомих джерел радіоперешкод (або від передбачуваних джерел випромінювань планованих до розгортання радіосистем). У ньому під $P_{\text{пер}}$ розуміється потужність джерела перешкод, під $P_{\text{прм}}$ – потужність перешкод в точці розміщення рецептора перешкод. Згадані розрахунки обов'язково мають бути виконані для забезпечення територіального рознесення засобів в цілях забезпечення їх ЕМС. Дозволивши (4) відносно $P_{\text{п}}$, можна знайти максимальний рівень перешкоди, вище за який якість радіозв'язку не забезпечується.

Засоби зменшення рівнів перешкод і складають основний зміст проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС) технічних засобів.

Найбільш невизначеними параметрами в (4) є рівень перешкод в точці прийому $P_{\text{п}}$ та додаткові втрати енергії на трасі зв'язку $W_{\text{Г}}$.

У різних методиках вони враховуються по-різному. Зокрема, це пояснюється випадковим характером кожного зі згаданих параметрів траси.

У багатьох випадках вплив рельєфу місцевості може призвести до великих коливань рівнів, як корисного, так і небажаного (заважає) радіосигналів. При застосуванні деяких методів визначення затухання при розповсюдженні необхідне знання особливостей місцевості.

Корисно знати дані про різні типи місцевості (таблиця 2), таких як море, інші водні басейни, пустеля, густий ліс, ліс, сільські, приміські та міські зони.

Таблиця 2 - Електричні параметри різних типів місцевості

Поверхня	ϵ	σ , см/м
Море в спокійному	80	1...6
Прісна вода річок і озер	80	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Вологий ґрунт	10..	$3 (10^{-})$
Сухий ґрунт	3...	$10^{-5} \dots 10^{-3}$
Мерзлий ґрунт	3...	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Сніг ($t = -10^{\circ}\text{C}$)	1	10^{-6}
Лід ($t = -10^{\circ}\text{C}$)	4...	$10^{-2} \dots 10^{-}$

Різноманітність видів рельєфу і структур місцевості при РРВ прямою хвилею уздовж поверхні Землі (наприклад, в системах мобільного радіозв'язку) можуть бути причиною різного механізму РРВ в конкретній обстановці. Хвилі можуть відбиватися дзеркально (за законами оптики) від гладких поверхонь будов або дифузно від грубо-шорстких, а також огинати перешкоди, розміри яких менше довжини хвилі.

Викладене аргументує велика кількість моделей розповсюдження радіохвиль на трасах зв'язку, в яких слід враховувати як детерміновані, так і випадкові параметри середовища розповсюдження радіохвиль. Так, тільки на дециметрових хвилях при проектуванні систем мобільного зв'язку знаходять застосування ряд моделей.

Побудова профілів трас на підставі топографічних карт традиційно виробляється уручну. Це трудомісткий і тривалий процес. Проте картографічні інститути провели великий об'єм робіт зі створення карт в цифровій формі для окремих географічних районів (скорочено – цифрових географічних карт). З цих карт можна витягувати важливі відомості для цілей прогнозування поширення радіохвиль.

У перспективі можуть стати доступними такі дані, як висота рельєфу місцевості, рослинність на земній поверхні, висота будівель і щільність забудови, ширина вулиць, геологія ґрунту. У інших випадках інформація про місцевість може бути також отримана з даних аерофотозйомки або на підставі зображень, отриманих зі супутників. На жаль, доступ до цифрових карт місцевості проблематичний: ринкова вартість пакетів програм для ведення цифрових карт і спеціалізованих геоінформаційних систем може досягати сотень тисяч доларів.

Роздільна здатність (необхідний масштаб карт) даних визначається ємкістю цифрової пам'яті і точністю топографічних зйомок, а також залежить від даного діапазону частот. Вона може мінятися від 1/100000 для УВЧ/СВЧ до 1/5000000 для ВЧ. Точність даних (висоти перешкод) має бути в межах від 10 м-коду до 1000 м-коду (також залежно від діапазону частот).

Використовуючи дані, що зберігаються, про місцевість, можна побудувати профіль висот на трасі між будь-якими двома географічними пунктами, включеними в базу даних про місцевість. Ці профілі корисні при визначенні пунктів на трасі прямої видимості або явищ екранування (радіозатінювання) навколишньою місцевістю. Не можна при цьому ігнорувати висоти будівель, особливо в міських або приміських зонах. Автоматичний доступ до бази даних про місцевість може бути забезпечений при вживанні комп'ютерних методів розрахунку втрат поширення РРВ.

3. ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАДНАННЯ ТРАКТУ ПЕРЕДАВАННЯ (ПРИЙМАННЯ) ЦИФРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ РАДІОКАНАЛУ

3.1. Призначення вузлів лінійного тракту

У тракті передачі цифрових даних, крім цифрової обробки, застосовується й аналогова обробка сигналів. Аналогова обробка виконується в тракті, до складу якого входять і досліджувані вузли селекції. Розглянемо основні види аналогової обробки і відповідні вузли, що входять до складу ЛТ.

Підвищувальний конвертор забезпечує перетворення частоти модульованого сигналу в частоту, на якій виконується передача. Таку процедуру виконують за допомогою одного чи декількох перетворень частоти. Кількість перетворень вибирають такий, щоб запобігти поразенню спектру сигналу комбінаційними складовими і міжканальними перешкодами при мінімальній вартості устаткування.

Понижуючий конвертор застосовують для перетворення частоти прийнятого сигналу на частоту демодуляції. У цьому конверторі виконується попередня селекція сигналу, режекція побічних коливань, викликаних процедурою перетворення частоти. Понижуючий конвертор забезпечує необхідний рівень сигналу на вході демодулятора. У його склад може входити тракт основної селекції, що забезпечує: мінімізацію шумів на вході демодулятора, реалізацію смуги Найквіста, нормування рівня сигналу на вході демодулятора при мінімальному переключуванні фазочастотної (ФЧХ) і амплітудно-частотної (АЧХ) характеристик тракту. Конвертор може включати і засоби аналогової корекції АЧХ і ФЧХ тракту.

Малошумлячий підсилювач забезпечує необхідне відношення сигнал/шум на вході приймача при мінімальному переключуванні сигналу в широкому діапазоні його рівнів.

Вузли селекції можуть входити до складу конверторів і забезпечують селекцію прийнятого сигналу за рахунок придушення:

- перешкоди на дзеркальній і інших комбінаційних частотах;
- позасмугової перешкоди;
- гармонік випромінюваного сигналу й ін.

Підсилювач потужності забезпечує необхідний рівень сигналу для передачі його по радіотракту. Внесені підсилювачем потужності переключування не повинні перевищувати припустимий рівень.

Антени (приймачна і передавальна) забезпечують узгодження параметрів радіотрактів і середовища поширення.

3.2. Основні параметри каналу зв'язку і фактори, що характеризують ефективність його використання

На ефективність використання радіочастотного ресурсу впливають наступні фактори:

а) пропускна здатність каналу зв'язку.

При підвищенні пропускної здатності збільшується кількість переданої інформації за одиницю часу, тобто підвищується ефективність використання радіочастотного ресурсу (РЧР).

Пропускна здатність, зокрема, підвищується при підвищенні позиційності модуляції;

Позиційність модуляції визначає відстань між крапками сигнального сузір'я (констеляційними символами). Чим вище число позицій даної модуляції, тим менше відстань між символами, а значить і нижче завадозахищеність.

Евклідова відстань d між сусідніми крапками в багатомірному (n -мірному)

просторі є величина $d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}$

В сигнальному сузір'ї в системі КАМ з L рівнями модуляції визначається виразом

$$d = \sqrt{2} / (L-1) \quad (1)$$

Аналогічно при ФМ:

$$d = 2 \sin(\pi/M) \quad (2)$$

де M – число фаз

L – визначається із $M = 2^L$.

Так, наприклад, при $M=16$ ($L=4$) $d_{\text{кам}}=0,471$ і $d_{\text{фм}}=0,390$,

а при $M=64$ ($L=6$) $d_{\text{кам}}=0,283$, $d_{\text{фм}}=0,196$.

б) підвищення ефективності часового використання каналу зв'язку, мінімізація простоїв;

Використання радіочастотного ресурсу без простоїв і переривів зв'язку дозволяє більше інформації передати у визначеному ресурсі, а, виходить, підвищити ефективність його використання.

в) багаторазове використання ресурсу;

Технологія, що застосовує багаторазове використання ресурсу, дозволяє в тім же ресурсі передати більшу кількість інформації.

г) підвищення енергопотенціалу радіолінії

Дозволяє підвищити завадозахищеність каналу зв'язку, а, отже, підвищити швидкість передачі, обслужити більше число абонентів в однаковому ресурсі.

б) завадозахищеність і перешкодозахищеність каналу зв'язку

Їхнє підвищення дозволяє підвищити швидкість передачі, надати більше число додатків і послуг більшому числу користувачів.

г) зниження внутрісистемних і взаємних перешкод, перекручувань у каналі зв'язку приводить до підвищення завадозахищеності, а, значить, і до підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу (РЧР).

е) збільшення розміру зони обслуговування дозволяє охопити послугами більше число користувачів у незмінному РЧР

Розмір зони обслуговування – забезпечується коефіцієнтом підсилення антен системи і потужністю сигналу передавача (ЕІВП системи), частотою помилок на прийомі – ЕІВП, тип завадостійкого кодування, перекручування в радіотракті

ж) інформаційна швидкість (пропускна здатність) – швидкість у каналі без надмірності завадостійкого кодування (іноді віднімаються також накладні витрати

з) займана смуга частот визначається швидкістю в каналі, перекручуваннями в радіотракті, поділом передавачів (частотне, просторове, частотно-просторове, часове, інформаційне і т.д.), наданою службою.

Частина зазначених факторів обумовлюється наданими службами, частина досягнутим рівнем електромагнітної сумісності технічних засобів (ЕМС ТЗ), частина параметрами радіотрактів (передавачів і приймачів).

Основними параметрами, що визначають якість каналу, а виходить, і ефективність РЧР, є пропускна здатність і завадостійкість каналу зв'язку.

Пропускна здатність каналу зв'язку характеризує можливість каналу передати визначену кількість інформації в одиницю часу. Пропускна здатність вимірюється числом біт, що можуть бути передані по каналу з необхідною якістю тобто, з максимальною швидкістю передачі в каналі. Одиниця виміру – біт/с.

Пропускна здатність каналу характеризується відношенням потужності сигналу до потужності шуму в каналі і смугою пропускання каналу зв'язку F , частотою помилок. Граничне значення визначене теоремою Шенона, що показав, що в оптимально побудованій системі зв'язку можлива безпомилкова передача інформації, якщо виконується співвідношення:

$$R = F \log_2 (1 + P_s/P_n), \quad (3)$$

де R – швидкість передачі;

P_s і P_n потужності корисного сигналу і шуму, що діють у каналі.

Теоретично зазначене значення швидкості може бути досягнуто, але не може бути перевищено. Неоптимальність системи передачі інформації, наявність перекручувань у тракті не дозволяють досягти границі Шенона.

Підвищення потужності сигналу і зниження рівня шуму дається звичайно непросто, тому ефективність каналу зв'язку досягається створенням оптимального приймача.

Завадостійкість каналу зв'язку визначається залежністю імовірності бітової помилки від відношення середньої потужності сигналу до середньої потужності адитивного білого гаусового шуму. (в іноземній технічній літературі імовірність бітової помилки зветься частота бітової помилки – bit error rate – BER)

Цей параметр, природно, визначає завадостійкість каналу зв'язку в еталонних умовах і є основою для порівняння каналів і його устаткування. У реальних умовах, коли шум не є чисто гаусовим, при впливі факторів, що заважають, навмисних і ненавмисних перешкод, статистика яких відрізняється від розподілу Гауса, неідеальності тракту поведження каналу не детерміновано з абсолютною точністю. Тобто, у реальних умовах канал з більш високою завадостійкістю може забезпечити більш низьку якість, чим менш завадостійкий, що спеціально спроектований для даного застосування. Наприклад, канал, що забезпечує імовірність помилки, рівну 10^{-6} в умовах впливу перешкод з гаусовою статистикою може виявитися непрацездатним умовах впливу зовнішніх детермінованих радіочастотних перешкод, якщо приймач не забезпечує достатнього рівня електрогерметичності (здатність придушувати на своїх вузлах наведення від зовнішніх сигналів, що заважають,).

Реалізація заходів щодо забезпечення електрогерметичності приймача може привести до збільшення шуму (а, отже, до зниження завадостійкості) але в цілому дозволить передавати інформацію з прийнятною якістю. Слід зазначити, що гаусівський шум, який володіє максимальною ентропією, є найбільш небезпечним. Найбільш ефективними для підвищення якості зв'язку в умовах впливу гаусового шуму є енергетичні методи – підвищення рівня сигналу, зниження рівня шуму, а також методи завадостійкого кодування. Можна сказати, що завадостійкість відбиває поведження каналу в реальних умовах, з такою же точністю, як і еквівалентна шумова температура входу відбиває якість сигналу на виході лінійного підсилювача при впливі на нього перешкод.

У цілому можна сказати, що завадостійкість каналу зв'язку визначається завадостійкістю демодулятора, реалізаційними втратами в

каналоутворюючому устаткуванні, ослабленням сигналу на трасі. До істотного зниження завадостійкості приводить вплив факторів, що заважають, що впливають на канал. Це, наприклад, завмирання через багатопроневе поширення, екранування, доплерівського розсіювання й інших факторів.

Здатність каналу забезпечувати ефективно функціонування в умовах впливу усіх видів перешкод характеризується перешкодозахищеністю, що у загальному випадку кількісно характеризується коефіцієнтом справної дії ($K_{\text{и}}$).

$K_{\text{и}}$ визначає імовірність того, що канал зв'язку буде працездатним у довільно обраний момент часу функціонування.

Коефіцієнт справної дії визначається добутком коефіцієнтів, що характеризують функціонування радіолінії при впливі випадкових і навмисних перешкод, що виникають від різних джерел.

$$K_{\text{и}} = \sum_{i=1}^m t_i / T = K_{\text{и}_{\text{епд}}} \cdot K_{\text{и}_{\text{емс}}} \cdot K_{\text{и}_{\text{зим}}} \quad (4)$$

де $K_{\text{и}_{\text{епд}}}$, $K_{\text{и}_{\text{емс}}}$, $K_{\text{и}_{\text{зим}}}$ – коефіцієнти, що характеризують функціонування радіолінії при впливі випадкових і навмисних перешкод, що виникають від засобів радіоелектронного придушення (ЕПД), електромагнітного імпульсу висотних ядерних вибухів (ЕМІ), і від інших радіоелектронних засобів при порушенні ними умов електромагнітної сумісності (ЕМС);

m – кількість інтервалів часу t_i безупинної дії каналу;

T – загальний час функціонування, при цьому

$$K_{\text{и}_{\text{епд}}} = t_{\text{р}_{\text{епд}}} / (t_{\text{р}_{\text{епд}}} + t_{\text{рл}}),$$

де $t_{\text{р}_{\text{епд}}}$ – час реакції комплексів електронного придушення;

$t_{\text{рл}}$ – час реакції радіолінії.

Для систем з підвищеними вимогами до безперервності роботи (наприклад, військові системи зв'язку) коефіцієнт справної дії повинний бути не менш 0,85.....0,95.

Крім пропускну здатності і завадостійкості якість каналу зв'язку характеризується низкою додаткових параметрів.

Енергетична ефективність дозволяє порівнювати різні види модуляції в каналі і характеризується залежністю імовірності бітової помилки (BER) від відношення середньої енергії на біт до спектральної щільності потужності шуму – СПМШ (чи значення відношення середньої енергії на біт до СПМШ при заданому BER), визначається в дБ.

Енергетична ефективність відображає ефективність використання потужності передавача в процесі функціонування каналу зв'язку.

Спектральна ефективність (η_f) стосовно до каналу зв'язку визначається як ефективність використання смуги частот; виражається питомою швидкістю передачі – числом переданих біт у секунду приведену до смуги 1 Гц (біт/з·Гц)

$$\eta_f = R / \Delta f_p \quad (5)$$

де η_f - спектральна ефективність каналу

R – швидкість передачі

Δf_p – смуга пропускання каналу зв'язку.

При оцінці якості каналу використовують поняття потужності сигналу на вході приймача (S), потужність шуму на вході приймача в смузі, займаної сигналом (N), значення спектральної щільності потужності шуму (S_0), спектральну щільність потужності сигналу – потужність сигналу в смузі 1 Гц (N_0) і зв'язані з ними відносини C/N , C_0/N_0 , $(C_0 + N_0)/N_0$, C/N_0 , C_0/N_0 а також відношення енергії на 1 біт до N_0 – E_b/N_0 .

Не приводячи досить прості висновки, запишемо вираження, що зв'язують ці параметри:

$$C/N = 3 - N_0 \cdot 10 \lg (F_{ш}), \text{ дБ},$$

де $F_{ш}$ – шумова смуга каналу (Гц), що може бути визначена по застосовуваному в каналі фільтру основної селекції.

$$C_0 = 3 - 10 \lg (F_c), \text{ дБВт/Гц},$$

де F_c – смуга частот, займана сигналом, Гц, приймається рівній смузі пропускання тракту основної селекції каналу;

$$N_0 = N - 10 \lg (F_{ш}),$$

$$\text{для модуляції QPSK } F_c = R/2,$$

де R — швидкість передачі, біт/с.

У цьому випадку:

$$C/N_0 = C - N_0, \text{ дБ/Гц}$$

$$C_0 = 3 + 3 - 10 \lg (R), \text{ дБВт/Гц}$$

$$C = 3_0 - 3 + 10 \lg (R), \text{ дБВт}$$

$$C - N_0 = C_0 - 3 + 10 \lg (R) - N_0, \text{ дБ/Гц}$$

$$C/N_0 = C_0/N_0 - 3 + 10 \lg (R), \text{ дБ/Гц}$$

Відношення E_b/N_0 іноді визначається як E_{bc}/N_0 для композитної швидкості, що містить у собі інформаційну швидкість і накладні витрати і як E_{bt}/N_0 для швидкості передачі R .

$$E_{bc}/N_0 = C/N_0 - 10 \lg (IR + OH),$$

де IR – інформаційна швидкість, біт/с

OH – накладні витрати (overhead), біт/с

Слід зазначити, що накладні витрати не містять у собі надмірність, внесену завадостійким кодуванням.

Якщо в каналі використовується безпосереднє виправлення помилок (forward error correction – FEC), то обчислюється швидкість передачі як добуток композитної швидкості і зворотної величини швидкості кодування. У цьому випадку E_b/N_0 визначається як

$$E_{bt}/N_0 = C/N_0 - 10 \lg(R),$$

де R – швидкість передачі, біт/с

Поняття смуги радіосигналу

Радіосигнали без багаторівневої маніпуляції займають смугу частот, ширина якої залежить лінійно від швидкості передачі даних. Тому при передачі середньо- і високошвидкісних сигналів застосовують такі види багатопозиційної частотної, фазової й амплітудно-фазової маніпуляцій:

ЧМ-4, ФМ-4, ВФМ-4, ВФМ-8, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256. У стадії експериментальних досліджень знаходиться багатопозиційна модуляція виду КАМ-1024.

Необхідна мінімальна частотна смуга пропускання лінійного тракту для передачі сигналів ВФМ і КАМ складає

$$P_{\min} = B / \log_2 M, \quad (6)$$

де B - швидкість передачі, M - обсяг алфавіту, що використовується для передачі даних. Однак, на практиці з метою зменшення міжсимвольної інтерференції, звичайно

$$P_{OFM,КАМ} \approx (1,1...1,2)B / \log_2 M \quad (7)$$

Для сигналів ВФМ-4 зі зсувом (ДВФМ зі зсувом, офсетної ФМ) необхідна смуга

$$P_{OF,КАМ} \approx (1,1...1,2)B, \quad (8)$$

У випадку M -кратної частотної маніпуляції необхідна частотна смуга складає

$$P_{чм} = \frac{(1,1...1,2)B}{\log_2 M} (M - 1) \Delta f_{zc} \quad (9)$$

де Δf_{zc} - зсув частоти між сусідніми частотними позиціями сигналів.

Видно, що спектр ЧМ сигналів визначається, крім швидкості передачі, ще і рознесенням частот між суміжними позиціями сигналів.

На основі аналізу цифрових РРС європейських країн у табл. 1 розрахована по приведеним вище формулам ширина спектра сигналів з різними швидкостями передачі і методами модуляції. Таблиця також дає представлення про взаємозв'язок швидкостей і методів модуляції. Ширина спектра сигналів із ЧМ не приведена, оскільки в цьому випадку використовується устаткування аналогових ліній, і рознос частот у кожному конкретному випадку залежить від рівня цифрового сигналу, що подається на аналоговий частотний модулятор.

Знаком "+" у таблиці позначені швидкості, для яких використовується частотна модуляція.

Таблиця 1.

Швидкість передачі Мбіт /с	Ширина спектру сигналів, МГц									
	ЧМ -2	ЧМ -3	ЧМ -4	ВФМ- 2	ВФМ- 4	ВФМ- 8	ВФМ- С	КАМ- 16	КАМ -64	КАМ- 256
2		+	+	2.3-2.5	1.1-1.2		2.3-2.5			
8		+	+	9.3-10.1	4.7-5.1		9.3-10.1			
34			+	37.8-41.2	18.9-20.6	12.6-13.7	37.8-41.2	9.5-10.3	6.3-6.9	
140					76.6-83.6	51.0-55.7		38.3-41.8	25.5-27.9	
280					154-168	103-112		77-84	51-56	38-42
560								154-168	102-112	77-84

3.3. Використання поняття втрат завадостійкості каналу зв'язку при оцінці ефективності радіолінії

Потреба в оцінюванні ефективності радіолінії виникає як у процесі експлуатації системи передачі даних, так і в процесі створення технічних засобів радіолінії.

Для розгляду позначеного питання основним є використання уявлення енергетичні втрати в радіолінії і можливість компенсації впливу небажаних заважаючих факторів (ЗФ) за допомогою збільшення рівня сигналу в тракту, тобто збільшення відносини сигнал/шум на вході демодулятора каналу зв'язку. Природно, що така передумова обмежена факторами, зв'язаними, наприклад, із впливом великого рівня перешкоди. Через нелінійність тракту можуть бути породжені гармонічні чи інтермодуляційні складові спектру, що приведуть до зниження якості прийнятого сигналу (отже, до додаткових помилок). Тобто збільшенням рівня сигналу не завжди можна відновити вихідне значення бітової помилки, і в цьому випадку застосоване поняття втрат завадостійкості стає некоректним.

Однак такий підхід себе цілком виправдує і широко застосовується у випадку невеликих відхилень від ідеального випадку. Занадто великий вплив ЗФ свідчить про некоректне проектування радіоканалу, або про неправильне його використання. У цьому випадку для виправлення ситуації потрібно вжити заходів щодо зміни конструкції чи схемотехнічних рішень. Проте й у цьому випадку зазначений підхід дозволяє оцінити ступінь невідповідності устаткування каналу умовам експлуатації.

Сутність методу складається в припущенні, що якість прийнятого радіосигналу в умовах впливу ЗФ можна привести у відповідність до якості при умовах відсутності ЗФ, збільшивши рівень інформаційного сигналу на величину ΔP_c . Ці самим збільшується відношення сигнал/шум у лінії на величину $\delta = \Delta P_c / P_c$. Значення швидкості бітових помилок BER у каналі при цьому залишиться незмінним.

За формальними ознаками це відповідає збільшенню енергії на біт E_b за умови незмінного значення спектральної щільності потужності шуму N_0 . Оскільки якість сигналу зберігається незмінним зі збільшенням відношення E_b/N_0 , спостерігається зниження енергетичної ефективності каналу зв'язку.

З цієї причини значення потрібного сигналу називають «енергетичними втратами» чи «утратами завадостійкості» каналу передачі даних у результаті впливу ЗФ.

У випадку впливу декількох ЗФ можна припустити що їх взаємна дія може компенсувати викликані спотворення сигналу (чи передаточної характеристики тракту). Однак через випадковий характер впливу ЗФ, прогнозування з достатньою імовірністю, результату спільної дії декількох факторів, як правило, не можливе. Тому, оцінюючи ефективність, розглядають найбільш поганий випадок – чисто адитивний вплив різних ЗФ. Тоді сумарне значення енергетичних утрат θ через вплив і факторів, виражений у децибелах, дорівнює сумі втрат, викликаних кожним фактором окремо: $\theta = \sum_i \theta_i$. Такими факторами є як зовнішні перешкоди, так і внутрішньосистемні відхилення тракту від ідеального – так називані реалізаційні втрати.

Вплив перешкод на канал зв'язку залежить від виду переданого сигналу (модуляція), від типу перешкоди (Гаусової, зосереджена і т.п.), формату сигналу (цифровий, аналоговий) і ін.

У випадку аналогового сигналу з АМ – перешкоди спотворюють огинаючу сигналу, порушуючи форму переданого сигналу, при ФМ – спотворюється фаза і частота сигналу, з'являється паразитна амплітудна модуляція.

Основна перевага дискретних систем у порівнянні з аналоговими – менший вплив зміни параметрів лінії зв'язку і перешкод у каналах зв'язку на передані сигнали.

При демодуляції ураженого перешкодою цифрового сигналу зменшується кодова відстань між демодульованими символами.

При впливі шумової (гаусової) перешкоди констеляційні крапки перетворюються в кола з "розмитими" границями. Перешкоди іншого типу "розмивають" границі констеляційних крапок по різному і границі є ламаними лініями.

"Розмиття" границь приводить до погіршення завадостійкості каналу зв'язку, зменшуючи кодову відстань.

При цьому для визначення необхідного відношення сигнал/шум у каналі зв'язку не можна складати потужність шуму і перешкоди, оскільки вони не адитивні в змісті результату впливу. Але з достатньою точністю умові адитивності підкоряються енергетичні втрати, викликані перешкодою кожного типу.

Відзначимо, що в цьому випадку складаються енергетичні втрати (а не рівні перешкод). Вплив перешкод на параметри каналу зв'язку індивідуально для кожної перешкоди і визначати відношення сигнал/сумарна потужність перешкод для результуючої оцінки завадостійкості – некоректно.

На якість прийому цифрових сигналів можуть впливати майже всі характеристики лінійного тракту, зокрема:

- смуга пропускання лінійного тракту;
- амплітудні лінійні перекручування (нерівномірність модуля коефіцієнту передачі за частотою), породжувані фільтророзв'язуючими, селективними трактами прийому і власне середовищем поширення;
- перекручування групового часу запізнювання, обумовлені тими самими причинами;
- нелінійні перекручування, що викликають у приймачі ефекти типу блокування і придушення комбінаційними складеними.

Якщо включити до розгляду причин утрати завадостійкості характеристики модему (який, по суті, не є лінійним пристроєм), то можна додати ще і такі фактори:

- помилки у визначенні тактових крапок (моментів відліку);
- джитер, породжуваний як каналом зв'язку, так і нестабільністю системи синхронізації;

– дрейф порогів пристрою, що розв'язує, обумовленим дрейфом коефіцієнта передачі каналу і якістю роботи системи АРУ.

Явище міжсимвольної інтерференції (МСІ), що часто виділяється в окрему причину зниження завадостійкості по суті породжується нерівномірністю групового часу запізнювання по частоті і багатопрореневістю (яка може бути частотно-незалежною).

Як причини втрат завадостійкості можна визначити і такі:

- некоректність вибору формату (наприклад, занадто коротка преамбула не забезпечує точне відновлення несучої і може привести до помилок розв'язуючої схеми демодулятора; некоректну побудову преамбули веде до порушення роботи схеми тактової синхронізації й ін.);
- нестабільність частоти і фази несучої, котра зменшує кодову відстань, порушує роботу системи стеження демодулятора;
- нестабільність коефіцієнта підсилення лінійного тракту, що особливо небезпечно для систем з амплітудною модуляцією, а також КАМ-систем;
- невідповідність тракту основної селекції принципу відліковості – занадто широка смуга пропускання приводить до збільшення рівня шумів у тракті, а занадто вузька – до втрат через МСІ).

На втрати завадостійкості впливають не тільки абсолютне значення нерівномірності, але і форма АЧХ і ФЧХ. Виявляється, що втрати залежать від виду модуляції, а їхня величина залежить від характеру перекручувань частотної залежності параметрів тракту.

Внутрішньосистемними перешкодами, що погіршують загальне відношення сигнал/перешкода, є:

- перешкода в сусідніх каналах прийому;
- перешкода в основному каналі прийому;
- зовнішня чи перешкода шум в основному каналі прийому.

Деякі дані про вимоги до відношення сигнал/шум, лінійності тракту, допусків на АЧХ для забезпечення необхідної інтенсивності помилок для різних методів маніпуляції приведені у табл. 2

Таблиця 2. Вимоги до відношення сигнал/шум, лінійності тракту, допусків на АЧХ

Метод маніпуляції	Відношення сигнал/шум при BER = 10 ⁻⁹ , дБ	Припустимий рівень придушення інтермодуляційних складових третього порядку, дБ	Припустиме відхилення АЧХ тракту від оптимального, дБ
ВФМ-4	16	-30	1,0
КАМ-16	23	-35	0,3
КАМ-64	29	-40	0,2
КАМ-256	35	-50	0,1

4. РОЗРАХУНОК ЗОН РАДІОПОКРИТТЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ ТРАНКІНГОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

Оцінка зони дії базових станцій проводиться в різних умовах оточуючого середовища. Відома велика кількість методик розрахунку зон дії обладнання транкінгових мереж радіозв'язку. Дані методики ґрунтуються на результатах теоретичних та практичних досліджень розповсюдження радіохвиль в реальних умовах. Процес оцінки зони дії базових станцій складається з декількох етапів.

На першому етапі визначають потужність сигналу, випромінювану в ефір.

На другому – середню потужність сигналу на приймальній антені, при якій забезпечується задана чутливість приймача.

За результатами цих етапів визначають допустимий рівень втрат на трасі розповсюдження радіосигналу.

На третьому етапі вибирають модель розрахунку втрат на трасі та на її основі будують залежність втрат від відстані. За даним графіком визначають середню дальність радіозв'язку з врахуванням запасу на забезпеченість зв'язком за місцем та часом.

Розглянемо цю процедуру більш детально.

Випромінювана потужність сигналу:

$$P_{\text{вип}} = P_S + G_A + B_C \text{ [дБ]} \quad (1)$$

де P_S – потужність передавача; G_A – коефіцієнт підсилення антени; B_C – коефіцієнт передачі фідера та інших ланцюгів між передавачем та антеною.

Необхідна потужність сигналу на приймальній антені:

$$P_A = P_{\text{пр}} - G_{\text{ПА}} - B_{\text{ПС}} + \Delta_C \text{ [дБ]} \quad (2)$$

де $P_{\text{пр}}$ – чутливість приймача; $G_{\text{ПА}}$ – коефіцієнт підсилення приймальної антени; $B_{\text{ПС}}$ – коефіцієнт передачі фідера та інших ланцюгів між антеною та приймачем; C – коефіцієнт забезпеченості зв'язком за місцем та часом. Даний коефіцієнт вносить поправку для забезпечення з заданою ймовірністю перевищення потужності сигналу на вході антени відносно середнього значення. Значення коефіцієнту визначається багатьма факторами, в тому числі характером розповсюдження радіохвиль, щільністю забудови території забезпечення зв'язку. Наприклад, при $\Delta_C = 0$ дБ потужність сигналу на вході приймача буде перевищувати заданий рівень в 50% випадків прийому, при $\Delta_C = 10$ дБ – в 90% випадків.

Допустимий рівень втрат на трасі розповсюдження радіосигналу:

$$L_d = P_{\text{вип}} - P_A = P_S + G_A + B_C - P_{\text{пр}} + G_{\text{ПА}} + B_{\text{ПС}} - \Delta_C \text{ [дБ]} \quad (3)$$

Методика оцінки L_d передбачена стандартом TETRA, ґрунтується на моделі Hata, котра дозволяє прогнозувати усереднені втрати при розповсюдженні радіосигналу у відкритому просторі, сільській місцевості та в місті.

Вихідними даними для оцінки втрат слугують:

h_b – висота встановлення антени базової станції;

h_m – висота встановлення антени мобільної станції;

f_c – несуча частота сигналу.

Коефіцієнт втрат у вільному просторі визначається виразом:

$$L_{OA} = 27,81 + 27,72 \lg(f_c) - 13,82 \lg(h_b) - (1,1 \lg(f_c) - 0,7) h_m + (44,9 - 6,55 \lg(h_b)) \lg(R) - 4,78 (\lg(f_c))^2 \quad [\text{дБ}] \quad (4)$$

де R – відстань від передатчика до точки оцінки втрат.

У відповідності до методики розрахунку коефіцієнт втрат при розповсюдженні радіосигналу в сільській місцевості визначимо за формулою:

$$L_{RA} = L_{OA} + 10 \quad [\text{дБ}] \quad (5)$$

а при розповсюдженні радіосигналу в місті:

$$L_{OA} = 63,35 + 27,72 \lg(f_c) - 13,82 \lg(h_b) - (1,1 \lg(f_c) - 0,7) h_m + (44,9 - 6,55 \lg(h_b)) \lg(R) - 2 (\lg(f_c/28))^2 \quad [\text{дБ}] \quad (6)$$

Розрахуємо коефіцієнти втрат при $f_c=415$ МГц та умовних $h_m=30; 50; 100$ м для сільської місцевості та для міста. Графіки результатів наведені в рисунку 1 та рисунку 2:

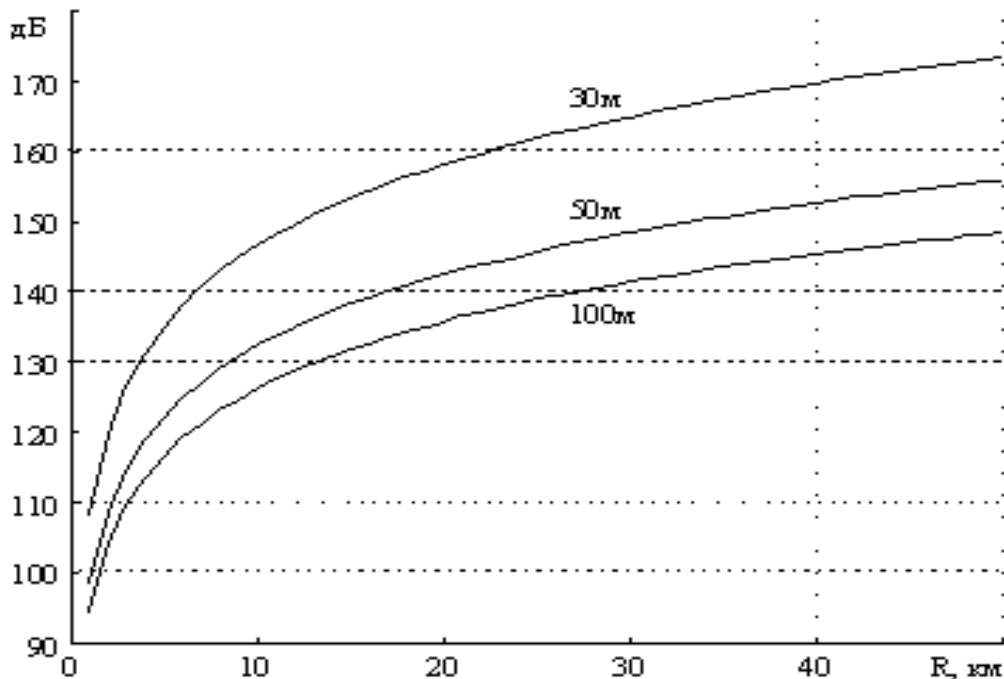


Рисунок 1 – Графік залежності $L_{OA}=f(R)$ для сільської місцевості

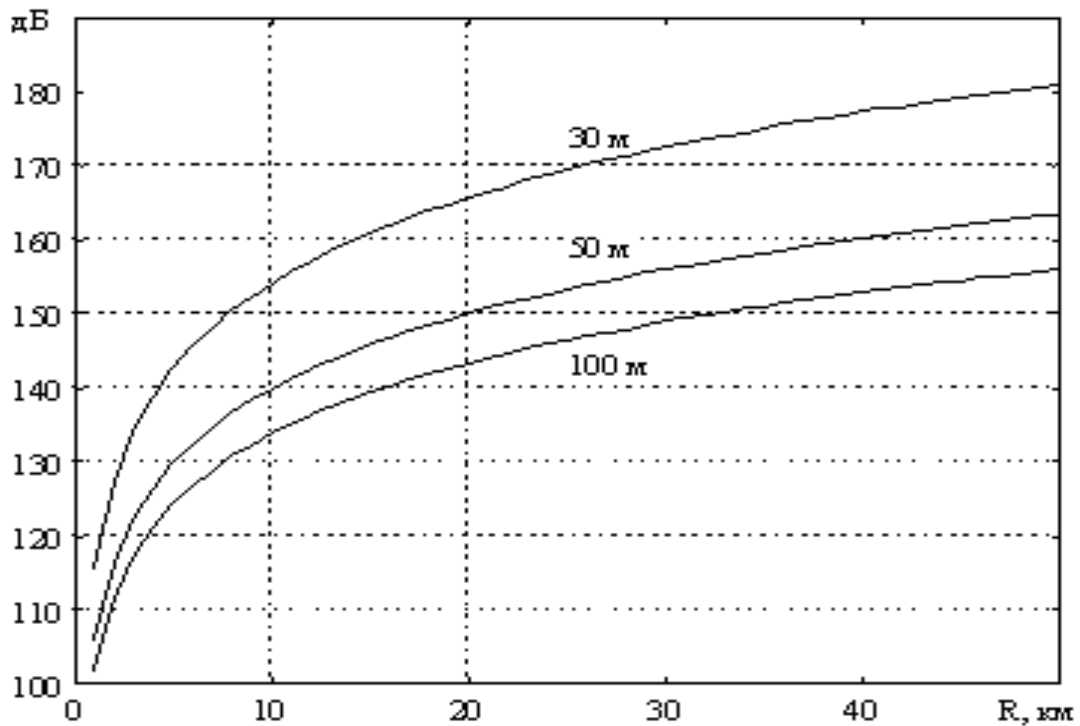


Рисунок 2 – Графік залежності LOA=f(R) для міста

У відповідності з приведеною методикою оцінимо зони дії базових станцій для сільських та міських умов розповсюдження радіосигналу при вихідних даних, наведених в табл. 1

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку зони дії радіообладнання

Параметр	Базова станція	Мобільна станція	Переносна станція
Потужність передавача, дБм	44	40	30
Коефіцієнт передачі фідера, дБм	-6	-2	0
Коефіцієнт підсилення антени, дБм	8	2	-4
Чутливість приймача, дБм	-106	-103	-103
Висота встановлення антени, м	50	1,5	1,5
Несуча частота, МГц	415		

Оскільки, як правило, енергетичний потенціал радіохвиль зверху донизу (від базової станції до абонентів) вище, ніж у зворотному напрямку, то оцінку зони дії базових станцій будемо проводити для напрямку “рухомий абонент – базова станція” при динамічних умовах розповсюдження радіосигналу.

Для кожного варіанту з врахуванням умов розповсюдження радіосигналу підставимо відповідні значення в формули та за графіками, приведеними на

рис. 1 та 2, відповідно до результату знайдемо дальність дії. Результати для сільської місцевості та міста із забезпеченістю зв'язком за місцем 50% та 90% наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків дальності дії радіообладнання

Напрямок зв'язку	Мобільна станція – базова станція		Переносна станція - базова станція	
	50%	90%	50%	90%
Відсоток забезпеченості зв'язком	50%	90%	50%	90%
Дальність зв'язку в сільській місцевості, динамічні умови, км	33	15	12	6
Дальність зв'язку в місті, динамічні умови, км	19	9,5	7	3,9

Відсоток забезпеченістю зв'язком, наведений в таблиці, забезпечується на межі зони обслуговування та в середині області і складає 75% та 95% відповідно. Надані дальності зв'язку обмежуються чутливістю приймача базової станції, враховуючи шумові завади.

Таблиця 3 - Розміщення базових станцій

ІН сайту	Координати розташування сайтів базових станцій		Параметри розташування антенної системи			
	Північної довготи	Західної широти	Висота будівлі, м	Висота існуючої щогли, м	Висота щогли в розрахунках, м	центр діаграми спрямованості антени (висота
BS1601	46°28'51"	30°43'57"	20	-	12	32
BS1602	46°35'05"	30°46'51"	30	-	12	42
BS1603	46°24'44"	30°43'15"	30	-	12	42
BS1604	46°26'08"	30°45'05"	52	-	12	64
BS1605	46°26'36"	30°38'46"	-	30	30	30
BS1606	46°23'48"	30°44'03"	7	-	40	40
BS1607	46°31'46"	30°38'56"	-	27	27	27
BS1608	46°28'00"	30°43'17"	17	-	12	29

BS1609	46°26'27"	30°42'38"	16	-	12	28
BS1610	46°28'26"	30°42'50"	8	-	9	17
BS1611	46°30'13"	30°43'28"	6	-	9	15

Для розрахунку точніших зон радіопокриття використовується програмне забезпечення Radio Mobile версії 9.2.8.

До складу програмного забезпечення входять цифрові електронні географічні мапи міст України та їх околиць з особливостями рельєфу місцевості з врахуванням висоти будівель та споруд.

При проведенні розрахунків використані вихідні дані, наведені у табл. 3 та 4.

При проведенні розрахунків приймається:

- тип місцевості – місто,
- щільність забудови – 100%.

Таблиця 4 - Електричні параметри базових станцій

ІН сайту	Параметри базової станції				Параметри антено-фідерної системи		Тип місцевості, щільність забудови
	Потужність передавача на виході комбайнера, В	Чутливість приймача, dBm	Нижня межа смуги частот, МГц	Верхня межа смуги частот, МГц	Коефіцієнт підсилення антени, dBm	Затухання антено-фідерної системи, dBm	
BS1601	25	-107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1602	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1603	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1604	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1605	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1606	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1607	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1608	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1609	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1610	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%
BS1611	25	- 107	418	422	11,5	2,5	місто, 100%

Розрахунок проведений для найбільш жорсткого режиму експлуатації мережі транкінгового радіозв'язку: режим роботи базової станції – прийом сигналу (Rx), режим роботи користувальницького радіотерміналу – передача сигналу (Tx).

При розрахунках в якості радіотерміналу користувача приймається портативний термінал Motorola MTP850.

Таблиця 5 - Параметри портативного терміналу MTP850

Назва радіо терміналу	Вихідна потужність, Вт	Чутливість приймача, dBm	Коефіцієнт підсилення антени, dBi	Середня висота піднесення антени, м
Портативний термінал Motorola MTP 850	1,0	- 107	1	1,7

Розрахунок зон радіопокриття базових станцій

Схему розміщення базових станцій на території міста (рис. 8).

Результати розрахунків зон радіопокриття базових станцій BS1601...BS1607 наведені на рисунках 3 - 10.

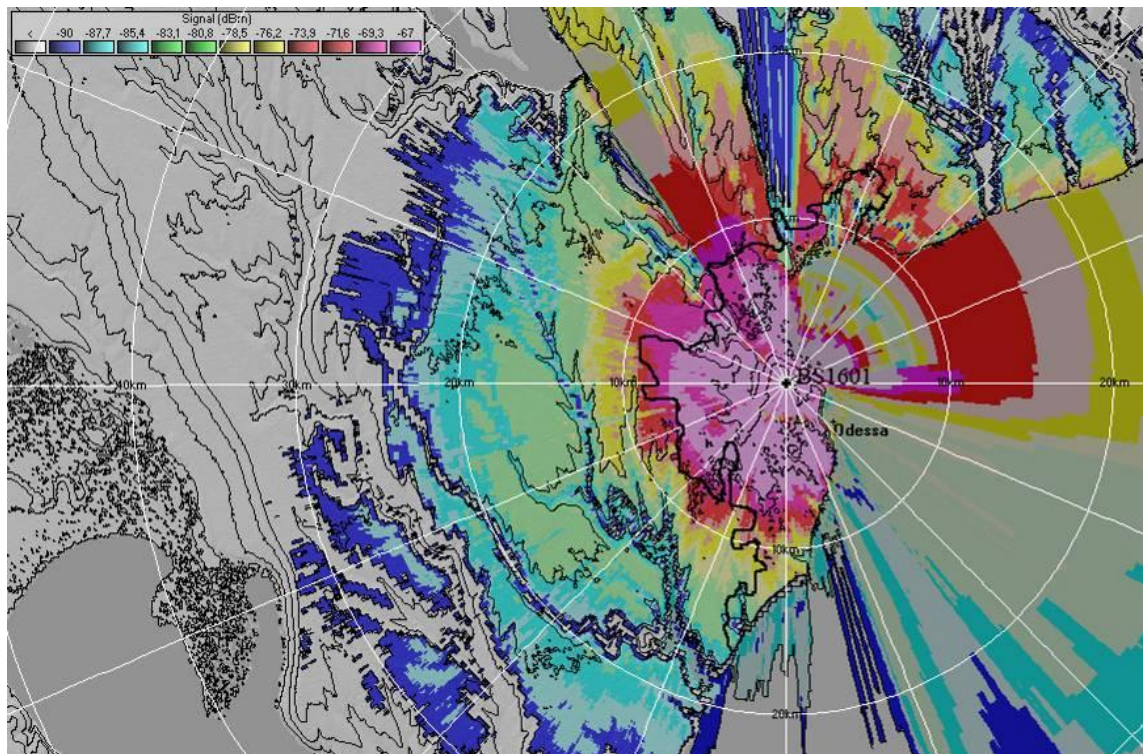


Рисунок 3 - Розрахункова зона радіопокриття базової станції BS1601

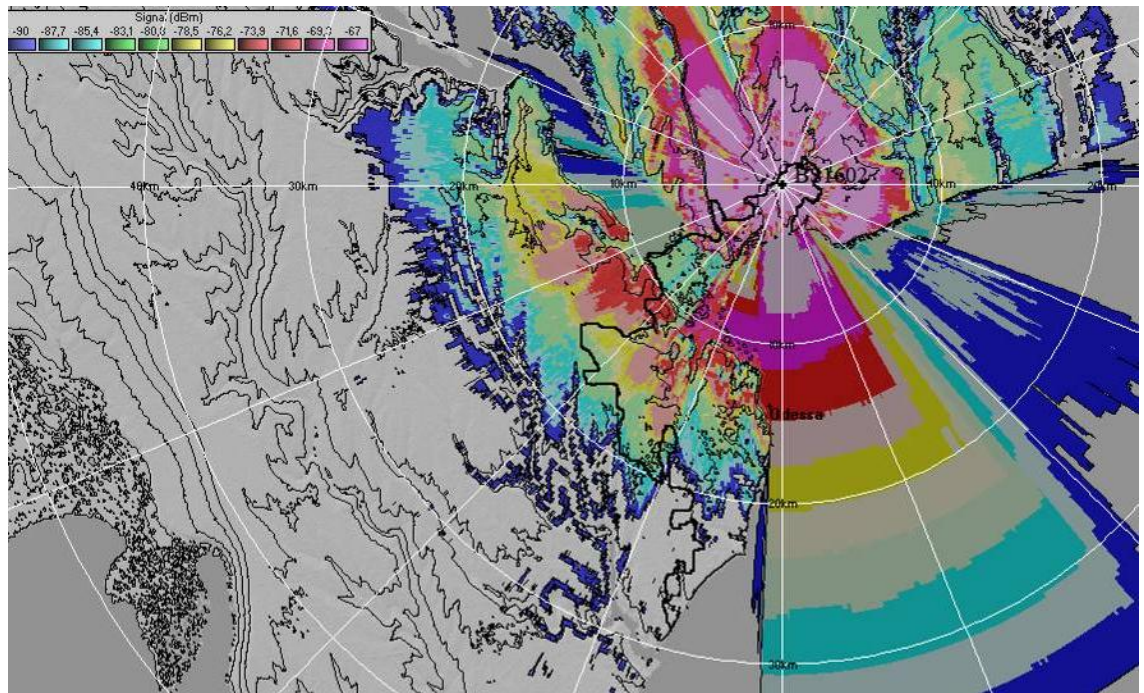


Рисунок 4 – Розрахункова зона радіопокриття базової станції BS1602

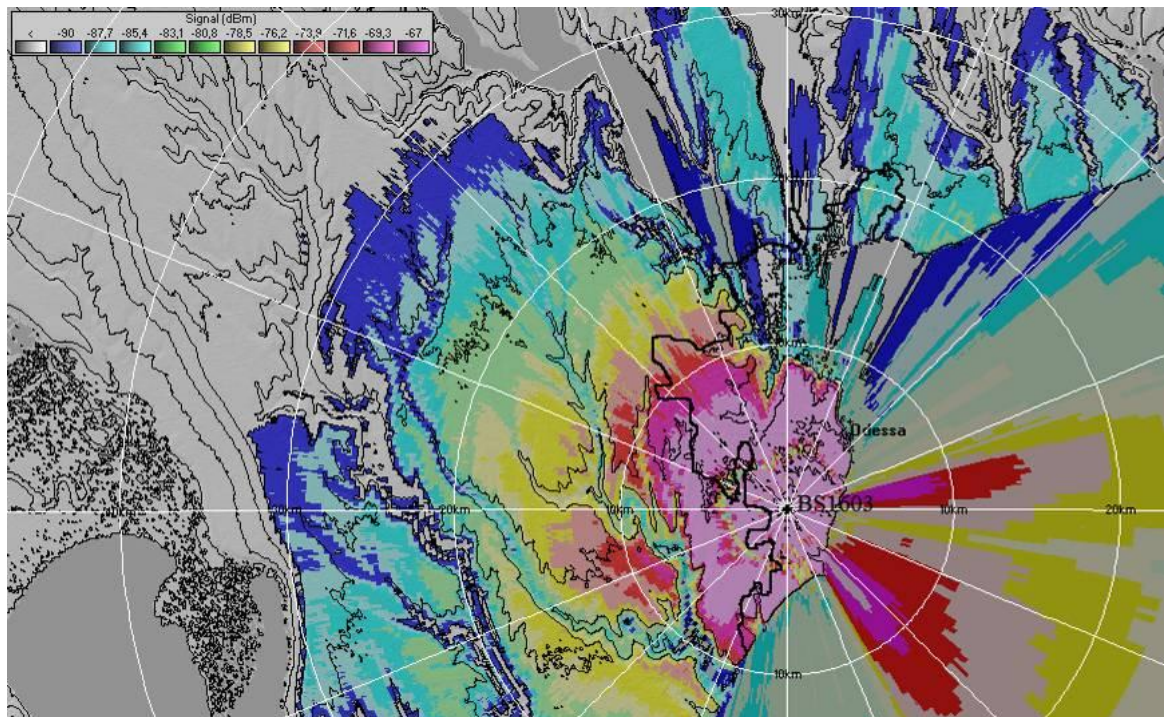


Рисунок 5 – Розрахункова зона радіопокриття базової станції BS1603

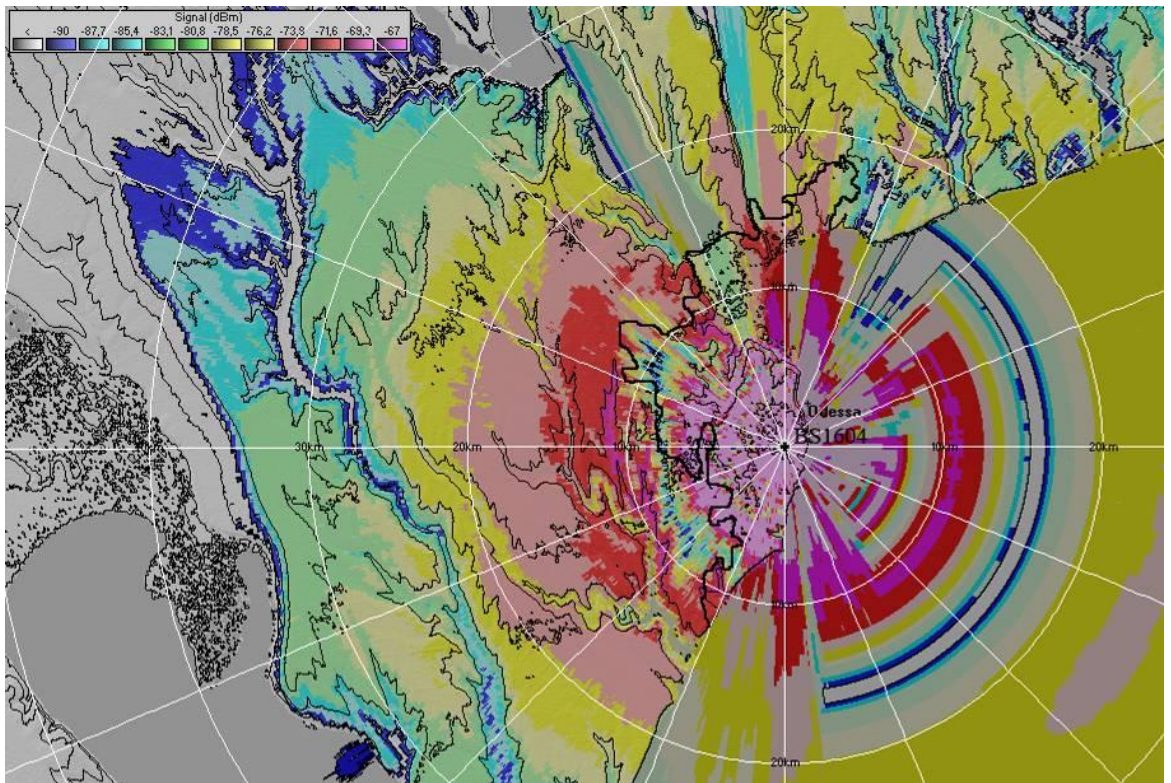


Рисунок 6 – Розрахункова зона радіопокриття базової станції BS1604

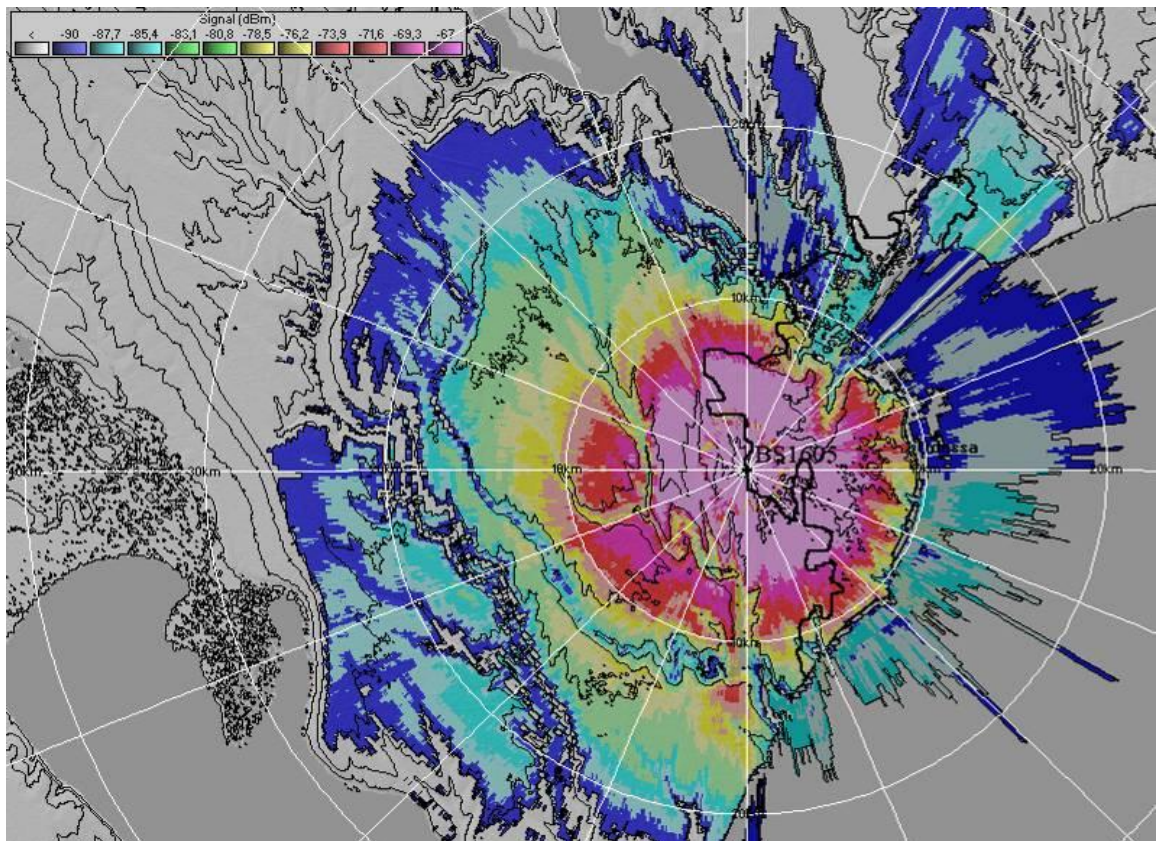


Рисунок 7 – Розрахункова зона радіопокриття базової станції BS1605

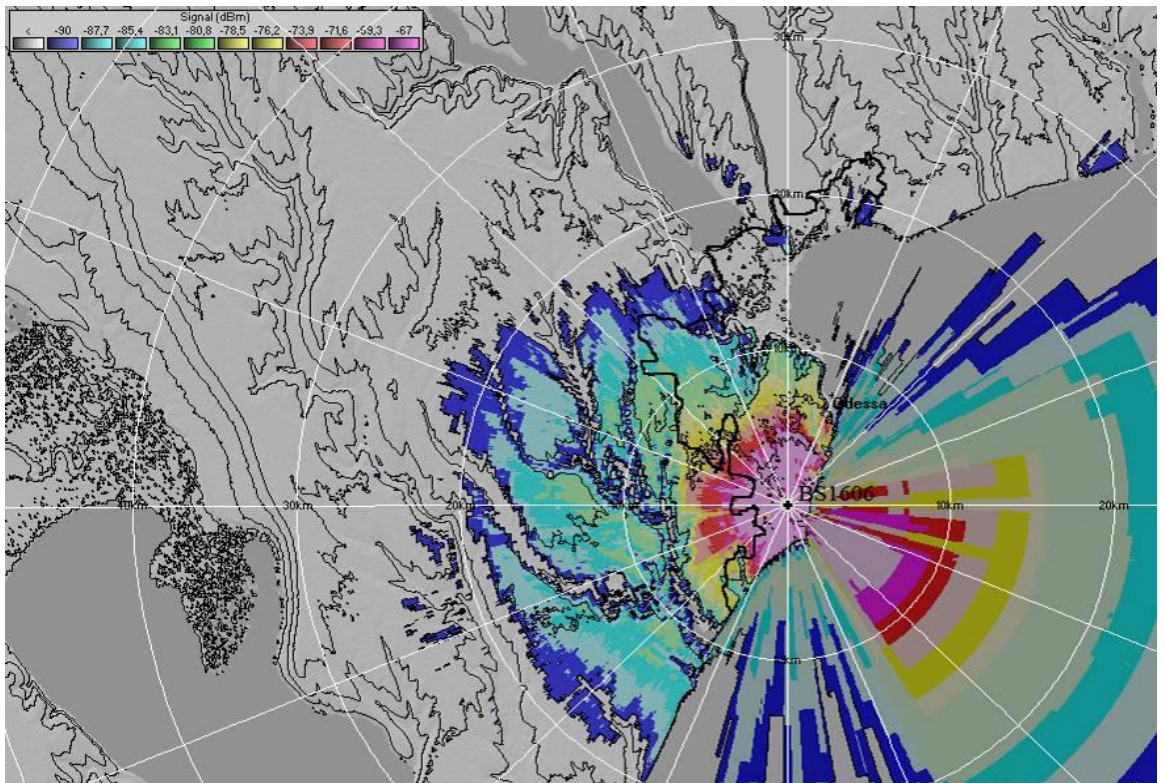


Рисунок 8 – Розрахункова зона радіопокриття базової станції BS1606

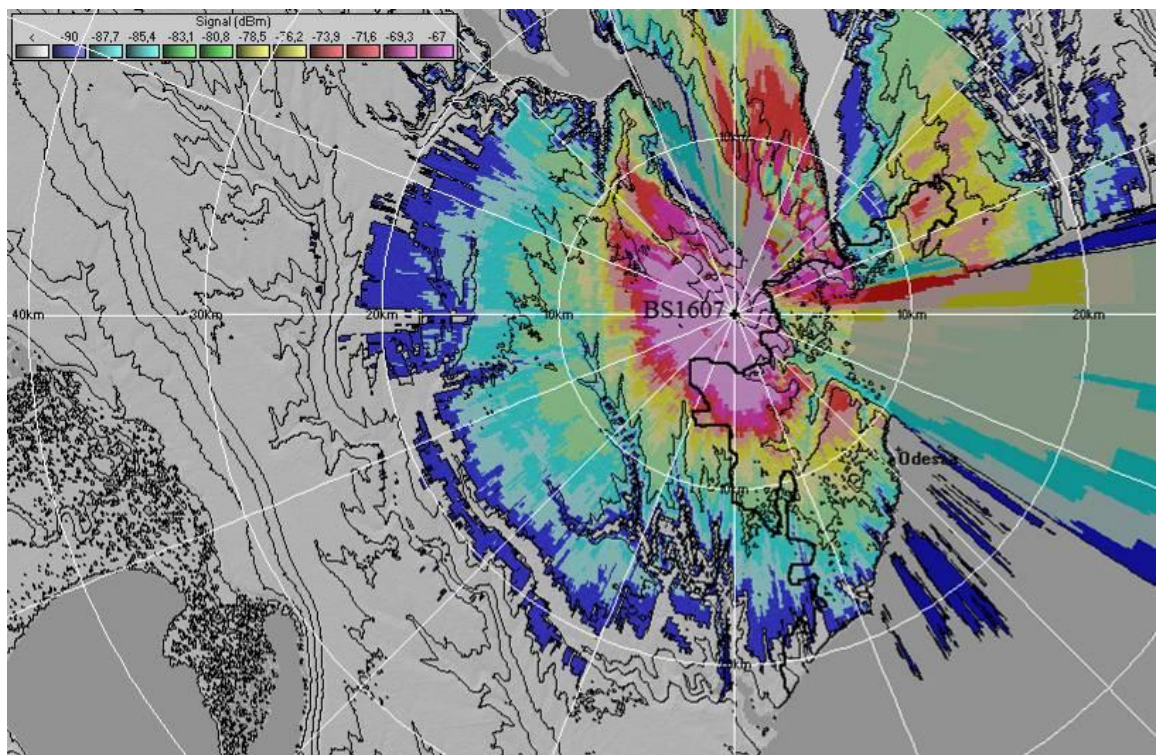


Рисунок 9 – Розрахункова зона радіопокриття базової станції BS1607

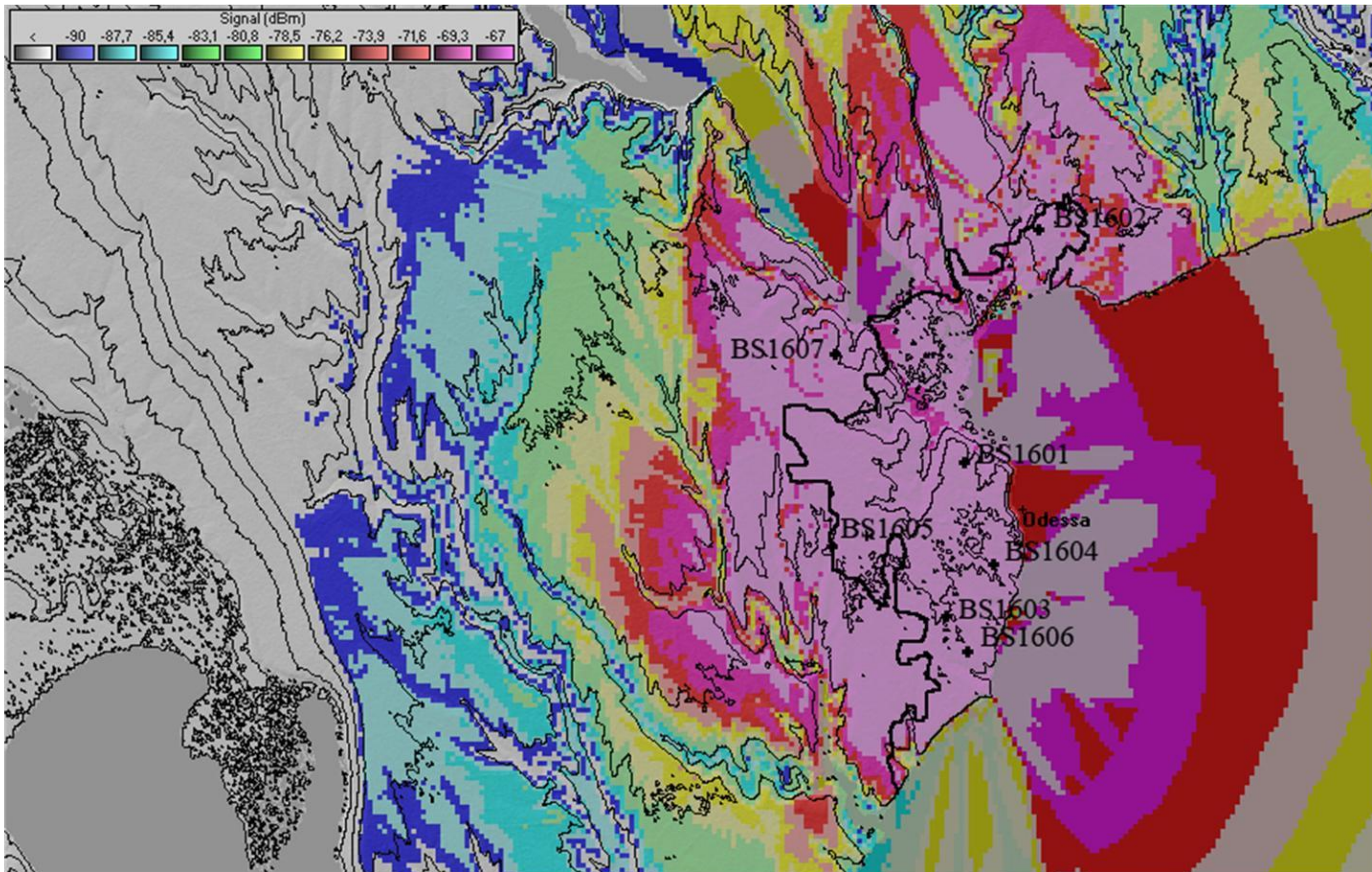


Рисунок 10 - Розрахункова зона радіопокриття сайтів базових станцій BS1601- BS1607 системи транкінгового радіозв'язку МВС України стандарту TETRA для м. Одеси

Таблиця 6 - Аналіз обстежених об'єктів будівництва сайтів базових станцій

ІН сайту	Переваги
BS1601	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечує зону радіопокриття центру міста та прибережної смуги; • площа зони гарантованого радіопокриття понад 350 кв.км; • висота будівлі 20 м, достатньо будівництво щогли висотою 12 м.
BS1602	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечує зону радіопокриття північної частини міста; • площа зони гарантованого радіопокриття близько 250 кв.км; • висота будівлі 30 м, достатньо будівництво щогли висотою 12 м.
BS1603	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечує зону радіопокриття південної частини міста з мертвими зонами у районі аеропорту; • площа зони гарантованого радіопокриття близько 200 кв.км; • достатньо будівництво щогли 12 м.
BS1604	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечує зону радіопокриття південної та центральної частини міста; • площа зони гарантованого радіопокриття понад 350 кв.км; • висота будівлі 52 м; • достатньо будівництво щогли висотою 12 м.
BS1605	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечує зону радіопокриття південно-західної частини міста, аеропорту, промислового ринку та прилеглих до нього територій ; • площа зони гарантованого радіопокриття близько 280 кв.км; • існуюча щогла висотою 30м;
BS1606	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечує зону радіопокриття південної частини міста та району "Чорноморка"; • площа зони гарантованого радіопокриття близько 80 кв.км; • існуюча щогла висотою 15 м;
BS1607	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечує зону радіопокриття західних районів центральної частини міста, Пересипі, південної Суворовського району, курорту "Куяльник" та с. Усатово; • площа зони гарантованого радіопокриття близько 100 кв.км; • існуюча щогла висотою 27 м;

Таблиця 7 – Карта радіопокриття міста та передмість м. Одеси

Район міста	ІН сайту						
	BS16 01	BS16 02	BS16 03	BS16 04	BS16 05	BS16 06	BS16 07
Залізний мис	-	-	+/-	+/-	+/-	+	-
Чорноморка	-	-	+/-	+/-	+/-	+	-
Дача Ковалевського	-	-	+/-	+/-	+/-	+	-
Великий Фонтан	+/-	-	+/-	+	-	+	-
Ім. Гаїрова	-	-	+	+/-	+/-	+	-
Дерибасівська	+/-	-	+	+	+/-	+/-	-
Середній Фонтан	+/-	-	+/-	+	-	+/-	-
Черемушки	+/-	-	+	+/-	+/-	-	-
Чубаївка	+/-	-	+/-	+	+/-	-	-
Аркадія	+/-	-	+/-	+	-	-	-
Ближні мельниці	+/-	-	+/-	+	-	-	-
Малий Фонтан	+/-	-	-	+	-	-	-
Дальні мельниці	+/-	-	+/-	+/-	+	-	+/-
Воронцовка	+	-	+/-	+/-	+/-	-	-
Сахалинчик	+	-	-	+	-	-	-
Молдаванка	+	-	-	+/-	+/-	-	-
ім. Держинського	+/-	-	+/-	+/-	+	-	+/-
Аеропорт	-	-	+	-	+	-	-
Промисловий ринок	-	-	+/-	-	+	-	-
Ленінське	-	-	+/-	-	+	-	+/-
Залізничний	-	-	+/-	-	+	-	+/-
Ланжерон	+	-	-	+/-	-	-	-
Крива Балка	-	-	-	-	-	-	+
Слобідка	+	-	-	+/-	-	-	+/-
Лиманчик	+	-	-	+/-	-	-	+
Пересип	+/-	+/-	-	-	-	-	+
Солдатська слобідка	+/-	+/-	-	-	-	-	+
Усатово	-	+/-	-	-	-	-	+
Котовка	-	+/-	-	-	-	-	+
Жевахова гора	-	+/-	-	-	-	-	+
Набережне	-	+/-	-	-	-	-	+
Курорт "Куяльник"	-	+	-	-	-	-	+/-
Зернове	-	+	-	-	-	-	+/-
Лузановка	-	+	-	-	-	-	-

сел. Шевченко	-	+	-	-	-	-	-
ім. Котовського	-	+	-	-	-	-	-
Корсунці	-	+	-	-	-	-	-
Крижанівка	-	+	-	-	-	-	-

	«+» Гарантоване радіопокриття для портативного терміналу Motorola MTP 850
	«+/-» Гарантоване радіопокриття мобільного терміналу Motorola MTM 800, негарантоване покриття для Motorola MTP 850
	Негарантоване радіопокриття для обох типів радіо терміналів

Висновки по результатам моделювання зон радіопокриття

Згідно до результатів аналізу радіопокриття можливих місць розміщення сайтів базових станцій визначено:

Для повного радіопокриття зони зазначеної в ТЗ, з вірогідністю до 90%, необхідно і достатньо будівництво чотирьох сайтів БС, а саме BS1601, BS1602, BS1603 та BS1605, при цьому вихід з ладу хоча б однієї базової станції призведе до втрати покриття близько 40% території міста, що ускладнить функціонування системи.

Для забезпечення повного і гарантованого радіопокриття міста і передмість Одеси з ймовірністю 99%, необхідно передбачити будівництво сімох сайтів базових станцій BS1601...BS1607.

Розміщення сайтів системи транкінгового радіозв'язку МВС України стандарту TETRA для м. Одеси див. Рисунок 11.

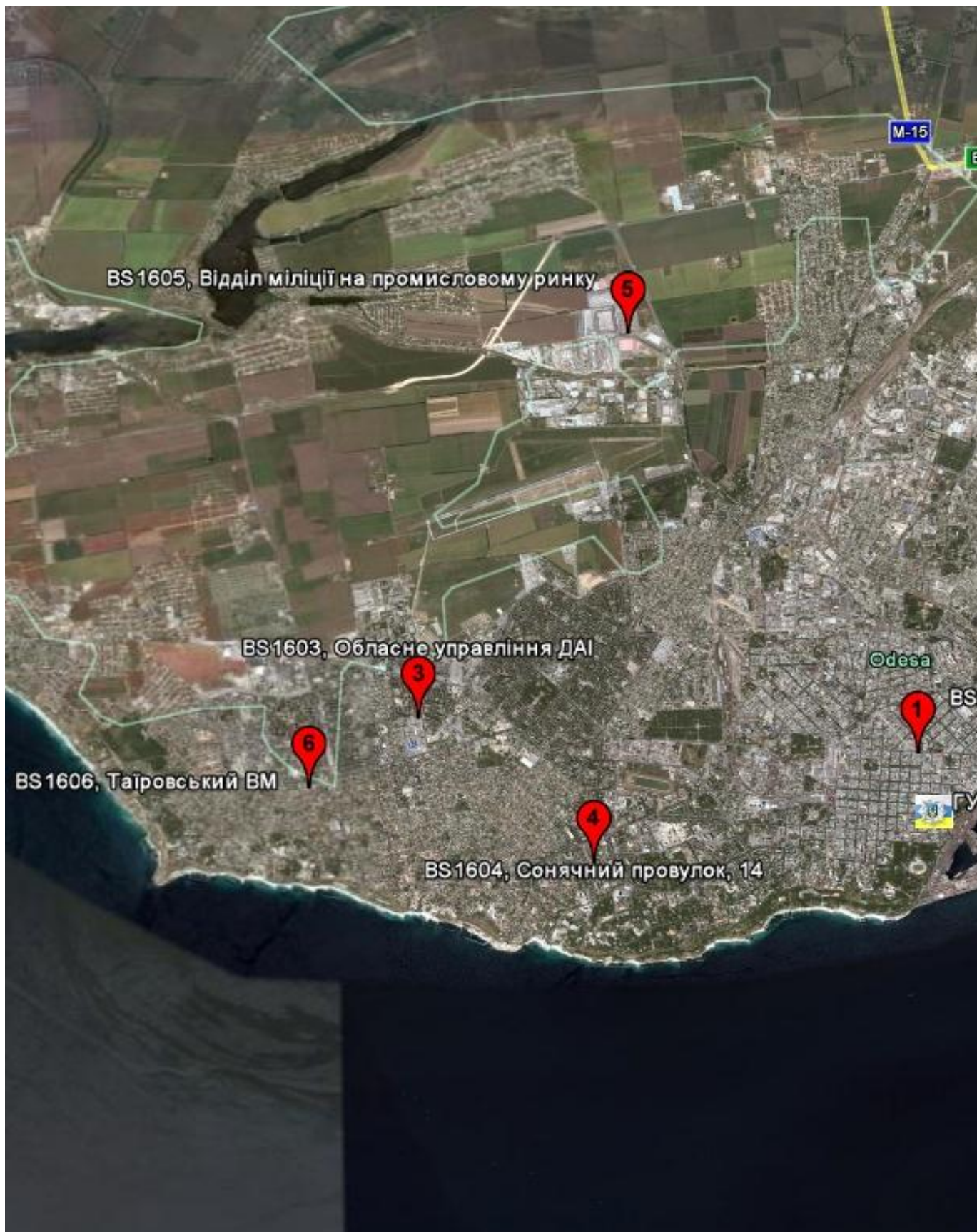


Рисунок 11 - Розміщення сайтів системи транкінгового радіозв'язку системи транкінгового радіозв'язку МВС України

5. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

5.1. Розрахунок величини дуплексного розносу між частотними каналами

Величина дуплексного розносу визначається співвідношенням:

$$F_d = F_{c\max 2} - F_{c\max 1} = F_{c\min 2} - F_{c\min 1}, \quad (1)$$

де $F_{c\max 2}$, $F_{c\max 1}$ – верхня (максимальна) частота піддіапазонів частот, виділених для роботи ССЗ;

$F_{c\min 2}$ і $F_{c\min 1}$ – нижня (мінімальна) частота цих же піддіапазонів.

5.2. Розрахунок загальної кількості частотних каналів

Загальна кількість каналів ССЗ n_k визначається формулою

$$n_k = \left[\frac{F_{cc}}{\Delta F_k} \right], \quad (2)$$

де $]a[$ - ціла частина “а”.

5.3. Розрахунок розмірності кластера

Відсоток часу, протягом якого відношення сигнал/взаємна завада ($P_c/P_{вз}$) на вході приймача АС буде менше від допустимого значення відношення сигнал/взаємна завада ($P_c/P_{вз}$) залежить від вибраного значення розмірності кластера C і визначається співвідношенням:

$$P(c) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right] 100\% \quad (3)$$

Інтеграл у дужках – це Q – функція. Значення Q – функції наведені у таблиці Б.1.

Нижня межа інтегрування в (3) визначається із співвідношення:

$$X = \frac{10 \lg \frac{1}{\beta_M} - \rho_0}{a_\rho}, \quad (4)$$

де ρ_0 - мінімально допустима величина відношення сигнал/завада, дБ;

β_M – визначається співвідношенням

$$\beta_M = \sum_{i=1}^M \beta_i e^{\frac{\gamma^2 (a^2 - a_M^2)}{2}}. \quad (5)$$

В свою чергу α_ρ и α_M визначаються формулами

$$\alpha_\rho = \sqrt{\alpha^2 + \alpha_M^2};$$

$$\alpha_M^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left[1 + (e^{\gamma^2 \alpha^2} - 1) \frac{\sum_{i=1}^M \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^M \beta_i \right)^2} \right], \quad (6)$$

де α - параметр, що визначає діапазон випадкових флуктуацій рівня сигналу у точці приймання (для сотових систем $\alpha = 6 \dots 12$ дБ);

$$\gamma = 0,1 \ln 10 = 0,23.$$

Значення β_M и M залежать від виду діаграми спрямованості антени БС (кругова чи секторна).

При використанні антен із круговою ДСА ($\varphi = 360^\circ$) і секторними ДСА ($\varphi = 120^\circ$ і $\varphi = 60^\circ$) значення M складають 6, 2 і 1 відповідно. Величина M визначає собою кількість «заважаючих» базових станцій, які розташовані у сусідніх кластерах, а β_i - величину, обернену відношенню потужності сигналу до потужності завади, яка створює і – а «заважаюча» базова станція.

Як відомо, наближене значення відношення сигнал/взаємна завада $\frac{P_c}{P_{vv}}$ визначається так:

$$\frac{P_c}{P_{вз}} = \frac{1}{M} \left(\frac{D-R}{R} \right)^k . \quad (7)$$

де D – відстань від АС до БС, що «заважає» ;
 R – радіус зони БС ;
 k – параметр згасання радіохвиль.

При поширенні радіохвиль у вільному просторі $k = 2$, а для сотових систем зв'язку $2 < k < 5$.

Відношення сигнал/взаємна завада + шум на вході приймача АС у загальному випадку визначається співвідношенням

$$\frac{P_c}{P_{вз+ш}} = \frac{P_c}{\sum_{i=1}^M P_{n_i} + P_{ш}} , \quad (8)$$

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

$\sum P_{n_i}$ – потужність взаємних завад від M базових станцій, розташованих у сусідніх кластерах і працюючих на частоті прийому АС. Нехтуючи величиною $P_{ш}$ у порівнянні з $\sum P_{n_i}$ (тому що звичайно $P_{ш} \ll \sum P_{n_i}$), то відношення (8) можна звести до виду

$$\rho = \frac{P_c}{\sum_{i=1}^M P_{n_i}} , \quad (9)$$

Як відомо, $P_c \sim D^{-k}_{АС-БС}$ ($D_{АС-БС}$ - відстань від АС, що її обслуговує БС),
 $P_{n_i} \sim D^{-k}_{АС-БС_i}$ ($D_{АС-БС_i}$ - відстань від АС до базових станцій, розташованих у сусідніх кластерах і працюючих на частоті прийому АС), то співвідношення (9) можна перетворити до виду

$$\frac{P_c}{P_{вз}} = \rho = \frac{D^{-k}_{АС-БС}}{\sum_{i=1}^M D^{-k}_{АБ-БС_i}} . \quad (10)$$

Якщо БС встановлені в центрах сот, то $D^{-k}_{АС-БС} \sim R^{-k}$.

Якщо базові станції з секторними антенами ($\varphi=120^\circ$) розміщені в загальних кутах кожної з трійки сот ("сотові ґрати" одного з видів 3/9, 4/12 або 7/21), то $D^{-k}_{АС-БС} \sim (2R)^{-k}$.

Значення D^{-k}_{AC-BCi} для попередніх наближених розрахунків можна взяти однаковими і рівними захисному проміжку D , що, у свою чергу, визначається співвідношенням $D = R\sqrt{3C}$.

Для більш точного визначення відстань між АС і базовими станціями (D_{AC-BCi}), що працюють на співпадаючих частотах, необхідно використовувати геометричні моделі територіального розміщення цих БС.

Так, наприклад, використовуючи наведену на рис.4.1 геометричну модель розміщення БС з круговими ДСА для $C = 3$ можна знайти значення D_{AC-BCi} , виражені через величину радіуса соти R , або через відносну захисну

відстань $q = \frac{D}{R}$.

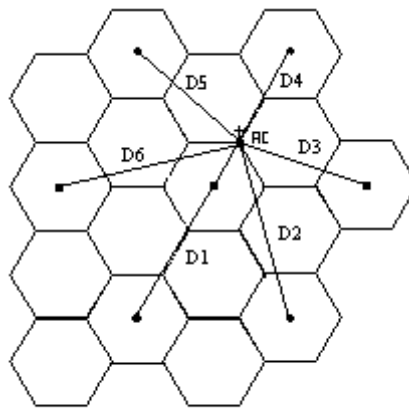


Рисунок 4.1

З рис. 1 можна визначити:

$$D_1 = 4R; \quad D_2 = R\sqrt{\left(4\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + 1^2} = \sqrt{13}R = 3,6R;$$

$$D_3 = R\sqrt{(2,5)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{7}R = 2,65R; \quad D_4 = 2R;$$

$$D_5 = D_3 = 2,65R; \quad D_6 = D_2 = 3,6R;$$

Значення β_i визначаються так:

$$\beta_i = \left(\frac{D_{AC-BCi}}{R}\right)^{-K} = \left(\frac{D_i}{R}\right)^{-K}.$$

Значення β_i для всіх шести БС (рис. 1):

$$\beta_1 = \left(\frac{D_1}{R}\right)^{-K} = 4^{-K}; \quad \beta_2 = \left(\frac{D_2}{R}\right)^{-K} = 3,6^{-K};$$

$$\beta_3 = \left(\frac{D_3}{R}\right)^{-K} = 2,65^{-K}; \quad \beta_4 = \left(\frac{D_4}{R}\right)^{-K} = 2^{-K};$$

$$\beta_5 = \left(\frac{D_5}{R}\right)^{-K} = 2,65^{-K}; \quad \beta_6 = \left(\frac{D_6}{R}\right)^{-K} = 3,6^{-K}.$$

Як відомо, величина захисної відстані (D) визначається співвідношенням $D = R\sqrt{3C}$, а величина відносної захисної відстані (q) визначається співвідношенням $q = \sqrt{3C}$. Оскільки в розглянутому прикладі $C=3$, то $q=3$. Тому отримані співвідношення, що визначають β_i , можна записати у виді:

$$\beta_1 = (q+1)^{-k}; \quad \beta_2 = (q+0.6)^{-k};$$

$$\beta_3 = (q-0.35)^{-k}; \quad \beta_4 = (q-1)^{-k};$$

$$\beta_5 = (q+0.35)^{-k}; \quad \beta_6 = (q+0.6)^{-k}.$$

Для коефіцієнта згасання радіохвиль $k = 4$ значення β_i (для $i = 1,2\dots6$) відповідно дорівнює $3,9 \cdot 10^{-3}$; $5,95 \cdot 10^{-3}$; $2,02 \cdot 10^{-2}$; $6,25 \cdot 10^{-2}$; $2,02 \cdot 10^{-2}$; $5,95 \cdot 10^{-3}$. Аналогічним чином можна визначити значення β_i для будь-яких можливих значень кластера C з урахуванням варіанта розміщення БС (в центрі або кутах шостикутових сот).

Отримані значення β_i використовуються далі для визначення β_M (5), α_M (6) і середнього значення відношення сигнал/взаємна завада на вході приймача АС.

$$\left(\frac{\overline{P_C}}{\overline{P_{\epsilon_3}}}\right)_{\text{дБ}} = \overline{\rho} = 10 \lg\left(\frac{1}{\beta_M}\right). \quad (11)$$

Величина нижньої межі інтегрування у формулі (3) дорівнюватиме:

$$X = \frac{\overline{\rho} - \rho_0}{\alpha_\rho}. \quad (12)$$

Після визначення величини X по таблиці Б.1 визначається відсоток часу (P_t), протягом якого відношення сигнал/взаємна завада на вході приймача АС для вибраної розмірності кластера буде нижчим від допустимого значення ρ_0 .

Якщо виконується нерівність $P(C) \leq P_t$, то вибране значення частотного параметра C відповідає заданим вимогам. Якщо ж $P(C) > P_t$, то необхідно шукати нове значення розмірності кластера C.

5.4. Розрахунок кількості каналів

Кількість каналів в одному секторі зони БС визначається співвідношенням

$$n_{KS} = \left\lceil \frac{n_K}{N_s \cdot C} \right\rceil, \quad (13)$$

де $\lceil a \rceil$ - ціла частина «а»;

N_s - число секторів. Величина N_s може дорівнювати 3 (ДСА з $\varphi=120^\circ$) і 6 (ДСА з $\varphi=60^\circ$).

Якщо на БС використовується антена з круговою діаграмою спрямованості, то

$$n_{K_{BC}} = \frac{n_K}{C}. \quad (14)$$

5.5. Розрахунок допустимого телефонного навантаження

Величина допустимого телефонного навантаження в одному секторі або в зоні однієї БС (для БС із круговою ДСА) визначається одним зі співвідношень

$$A = n_0 \left[1 - \sqrt{1 - (P_0 \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}})^{\frac{1}{n_0}}} \right], \quad \text{якщо } P_0 \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}, \quad (15)$$

і

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln(P_0 \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}})} - \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad \text{якщо } P_0 > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}, \quad (16)$$

де $n_0 = n_{KS} \cdot n_H$; n_H - кількість абонентів, що можуть працювати на одній частоті. Зокрема, у системі GSM-900 на одній несучій організується 8 тимчасових каналів, тобто $n_H = 8$. Якщо на БС використовуються антени з круговою ДСА, то $n_0 = n_{K_{BC}} \cdot n_H$;

P_0 - імовірність відмови в обслуговуванні абонента. Величину цієї імовірності можна визначати за формулою Ерланга:

$$P_0 = \frac{A^{n_0}}{n_0!} \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_0} \frac{1}{i!} A^i} .$$

У додатку В наведена таблиця В.1, яка пов'язує між собою кількість каналів n_0 , телефонне навантаження A і імовірність відмови в обслуговуванні P_0 [3]. Кожна з величин може бути визначена з цієї таблиці, якщо відомі значення двох інших. Зокрема, при відомих значеннях n_0 і P_0 можна визначити величину допустимого телефонного навантаження (A) і порівняти її з значенням, отриманим розрахунками за формулами (15) або (16).

5.6. Розрахунок кількості абонентів, які обслуговуються однією базовою станцією

Кількість абонентів, що обслуговуються базовою станцією, залежить від кількості секторів допустимого телефонного навантаження і активності абонентів:

$$N_{абвс} = N_s \left\lceil \frac{A}{P_a} \right\rceil , \quad (17)$$

де $\lceil a \rceil$ – ціла частина “а”;

P_a – імовірність активності абонента;

$N_s = 1, 3$ чи 6 у залежності від виду ДСА, базової станції ($N_s=1$ для кругової ДСА, $N_s=3$ і $N_s=6$ – для секторних ДСА з $\varphi=120^\circ$ і 60° відповідно).

При використанні “сотових ґрат” слід урахувувати їх особливості – кожний з трьох секторів “ґрати” є одною з сот.

5.7. Розрахунок необхідної кількості базових станцій

Необхідна кількість базових станцій на заданій території обслуговування визначається співвідношенням

$$N_{BC} = \left[\frac{Na\bar{b}_\Sigma}{Na\bar{b}_{BC}} \right], \quad (18)$$

де $Na\bar{b}_\Sigma$ - задана кількість абонентів, яких необхідно обслуговувати на території заданої площі.

5.8. Розрахунок радіуса зони базової станції

Величину радіуса зони БС можна визначити зі співвідношення

$$N_{BC} = 1,21 \frac{R_0^2}{R^2} = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2},$$

звідки

$$R = \sqrt{1,21 \frac{S_0}{\pi N_{BC}}}, \quad (19)$$

5.9. Розрахунок величини захисної відстані

Величина захисної відстані між БС з однаковими частотними каналами визначається співвідношенням

$$D = R\sqrt{3C}.$$

5.10. Розрахунок потужності передавача базової станції

Необхідну потужність передавача БС ($P_{ПД\text{ БС}}$, дБ·Вт) можна визначити, використовуючи співвідношення

$$P_{ПД\text{ БС}} = P_{ПМ\text{ АС}} - G_{\text{ АС}} - G_{\text{ БС}} + \eta_{\text{ БС}} + \eta_{\text{ АС}} - (1,1 \lg f - 0,7) h_{\text{ АС}} + \\ + 70 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_{\text{ БС}} + (45 - 6,55 \lg h_{\text{ БС}}) \lg D_{\text{ АС-БС}} + |x| \alpha, \quad (20)$$

де $P_{\text{ПМАС}}$ - чутливість приймача АС, дБ·Вт;

G_{BC} , G_{AC} - коефіцієнти підсилення антен БС і АС відповідно, дБ;

η_{BC} , η_{AC} - коефіцієнти, що враховують втрати в антенно-фідерному тракті БС і АС відповідно, дБ;

h_{BC} , h_{AC} - висота антен БС і АС відповідно, м;

f - найвища частота передачі БС, МГц;

$D_{\text{AC-BC}}$ - відстань від АС до БС, яка її обслуговує. $D_{\text{AC-BC}} = R$ для всіх варіантів розміщення БС, крім варіанта з “сотовими ґратами”, для якого $D_{\text{AC-BC}} = 2R$; км;

x – нижня межа інтегрування в співвідношенні (3);

α - параметр, що визначає діапазон випадкових флуктуацій сигналу, що приймається, дБ.

Оскільки антена АС всеспрямована, маловисотна (висота антени біля 1,5м), має невеликий коефіцієнт підсилення (2 – 4 дБ), то для спрощення розрахунків можна вважати, що $G_{\text{AC}}=0$ дБ, $h_{\text{AC}}=0$ дБ. Крім того, можна зневажити втрати в антенно-фідерних трактах БС і АС ($\eta_{\text{BC}}=0$ дБ, $\eta_{\text{AC}}=0$ дБ). З урахуванням викладеного співвідношення (20) можна записати у вигляді

$$P_{\text{ПДБС}} = P_{\text{ПМАС}} - G_{\text{BC}} + 70 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_{\text{BC}} + (45 - 6,55 \lg h_{\text{BC}}) \lg D_{\text{AC-BC}} + x\alpha \quad (21)$$

Якщо в результаті розрахунку потужність передавача БС перевищить максимальне значення, відоме з технічних характеристик вибраної ССЗ, то необхідно збільшити висоту антени БС або зменшити чутливість приймача АС.

Вказати зміни слід узгодити з керівником КР.

5.11. Розрахунок імовірності помилки

Для визначення імовірності помилки, коли АС знаходиться на границі зони БС, необхідно використовувати співвідношення

$$P_{\text{ПОМ}} \approx \frac{1}{(\sqrt{3C} - 1)^{2k}}, \quad (22)$$

де значення коефіцієнта згасання радіохвиль k необхідно брати рівним 2, що забезпечує врахування найгіршого варіанта впливу взаємних завад (варіант припускає поширення завад у вільному просторі).

6. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЦИФРОВОЇ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ ЛІНІЇ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ

**Розрахунок цифрової радіорелейної лінії для організації взаємодії
контролера базової станції (КБС) та БС радіоелектронного комплексу**

Вихідні дані для розрахунку:

Тип радіорелейної апаратури – РАДАН-2М*Е1;

Довжина інтервалу (проліт) – 20 км;

Число каналів ТЧ (потік) – 30 (Е1);

$P_{\text{пор}}$ (при $P_{\text{пом}}$)= -120 дБВт;

Рівень передачі передавача – $P_{\text{пер}}$ = -10дБВт;

Середня частота діапазону – f_0 =11200 МГц.

Сумарне підсилення антен передаючого приймального трактів – G = 70 дБ.

Таблиця 1

Перед остання цифра номера залікової книжки	Номер стволова n	Градiєнт діелектричної проникності середовища $g \cdot 10^{-7}, 1/\text{м}$	Стандартне відхилення $\sigma \cdot 10^{-8}, 1/\text{м}$	Відсоток часу зриву зв'язку через вплив тропосфери $T_{\text{тр}}(\text{В})$ $\cdot 10^{-3}$
8	4	-7.50	7.50	8.5

Дві останні цифри номера залікової книжки	Висотні відмітки профілю, Zi,м									
02,22	6	0	5	0	6	5	4	8	0	5

Таблиця 2

Таблиця 3

Дві останні цифри номера залікової книжки	Відносні координати положення висотних відміток профілю R _i									
02,22	,0	,12	,20	,38	,42	,50	,68	,88	,98	,0

Порядок розрахунку цифрової радіорелейної лінії для організації взаємодії КБС та БС

6.1. Розрахунок основних характеристик цифрової радіорелейної лінії на основі апаратури РАДАН – 2М*Е1.

6.1.1. Розрахунок плану розрахунку частот.

План розподілення частот розраховується і будується на основі технічних даних, які використовуються апаратурою РАДАН – 2М*Е1.

Розрахунок потрібно виконати для повного числа робочих стволів в заданій радіосистемі для заданого напрямлення.

Для діапазону 11 ГГц план частот розраховується за формулами:

$$F_n = f_0 - 525 + 40n;$$

$$F_n' = f_0 + 5 + 40n,$$

де n – номер ствола; F_n – середня частота передачі; F_n' – середня частота прийому; $f_0 = 11200$ МГц.

$$F_n = f_0 - 525 + 40n = 11200 - 525 + 40 \cdot 1 = 10835 \text{ МГц};$$

$$F_n' = f_0 + 5 + 40n = 11200 + 5 + 40 \cdot 1 = 11365 \text{ МГц}.$$

Результати розрахунків зведемо у табл.4.

Таблиця 4. - План розподілення частот

Номер ствола	1
F_1 , МГц	10835
F_1' , МГц	11365

6.1.2 Визначення середньої довжини хвилі $\lambda_{\text{ср}}$ робочого ствола.

Якщо середня частота робочого ствола дорівнює $f=11,2$ ГГц, то $\lambda_{\text{ср}}$ визначається за формулою:

$$\lambda_{\text{ср}}, [\text{м}] = 300 / f, [\text{МГц}],$$

тоді

$$\lambda_{\text{ср}} = 300 / 11200 = 2,68 \cdot 10^{-2} [\text{м}] = 2,68 \text{ см.}$$

Вплив на сигнал поверхні Землі та тропосфери враховується множителем ослаблення вільного простору V . В основному його характеристики залежать від протяжності траси, довжини хвилі, висот підвісу антен, рельєфу місцевості, метеопараметрів тропосфери, зміни яких впливають на величину реакції. В наслідок цього V являється випадковою величиною з нормальним законом розподілення. Його математичне очікування і стандартне відхилення для різних районів земного шару різні та зазвичай приводиться в довідниковій літературі у вигляді таблиць. Через складність та різноманітність реальних природних умов практично неможливо створити суворі методи визначення V . Важливу роль при розрахунках відіграє так названий мінімально допустимий множник ослаблення $V_{\text{мін доп}}$. Коли на інтервалі множник ослаблення V падає до величини $V_{\text{мін доп}}$, то це означає, що потужність шумів $P_{\text{ш}}$ (при передачі аналогових сигналів) або ймовірність помилки $P_{\text{пом}}$ (при передачі цифрових сигналів) в каналі на кінці лінії дорівнюють відповідно максимально допустимому значенню шуму $P_{\text{пом max}}$, які визначені рекомендаціями ІТУ-Т.

При передачі цифрових сигналів значення $V_{\text{мін доп}}$ розраховується за формулою:

$$V_{\text{мін доп цс}} = P_{\text{пор}} - L_0 - \eta - G - P_{\text{пер}}.$$

При передачі цифрових сигналів в стволі радіорелейних станцій для апаратури РАДАН-2*Е1 $P_{\text{пор}} = -120$ дБВт;

$L_0 = 10 \lg(\lambda / (4\pi R_0))^2$ - ослаблення сигналу в вільному просторі між виходом передавача та входом приймача, дБ;

Для $\lambda = 0,0268$ м і $R_0 = 40000$ м отримаємо

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{2,68 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 20 \cdot 10^3} \right)^2 = -139,44 \text{ дБ.}$$

$\eta = (-1 \dots -10)$ – сумарний коефіцієнт корисної дії передаючого та приймаючого трактів, дБ.

Надалі при розрахунках будемо використовувати значення $\eta = -10$ дБ.

$G = (40 \dots 80)$ – сумарне підсилення антен передаючого та приймаючого трактів, дБ.

При розрахунках будемо використовувати значення $G = 53$ дБ.

Розрахуємо мінімально допустимий множник ослаблення:

$$V_{\text{min доп цс}} = -120 - (-139,44) - (-10) - 53 - 10 = -33,56 \text{ дБ.}$$

6.1.3 Визначення і побудова профілю інтервалу радіорелейної лінії.

Побудову слід починати з розрахунку та зображення ліній та умовного нульового рівня. Розрахунок проводимо з урахуванням градієнта діелектричної проникності середовища g . Він враховує викривлення траєкторії радіохвиль в тропосфері, що викликано її неоднорідною побудовою. Це явище, як правило, називається рефракцією. Побудова лінії умовного нульового рівня дає можливість будувати профіль в прямокутних координатах, використовуючи параболічний масштаб. У цьому випадку лінії,

які зображають на профілі рівень моря, від якого відраховуються всі висоти, має вигляд параболи та розраховується за формулою:

$$y_i = \left(\frac{R_0^2}{2a_3} \right) \kappa \cdot (I - \kappa), \text{ м}$$

де R_0 , [м] – довжина інтервалу;

$\kappa = R_i^*/R_0$, (відн. од.);

координат до поточної точки; R_i - див. табл. 7.3;

$a_3 = a/(1+ag/2)$, [м] – еквівалентний радіус Землі при впливі рефракції.

$a = 6370$ км – геометричний радіус Землі. При $g = -6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$, $a_3 = 8500000$ м.

Урахування g при побудові ліній умовного нульового рівня дає змогу вважати, що траєкторія радіохвиль являється прямолінійною.

Розрахуємо лінію умовного нульового рівня за наступними вихідними даними:

$$R_0 = 40 \cdot 10^3 \text{ м}; \quad g = -6 \cdot 10^{-8} \text{ 1/м};$$

$$Z_i \in (20; 22; 20; 21; 23; 24; 29; 35; 30; 27)$$

$$R_i \in (0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0)$$

Тоді y_i будуть дорівнювати:

$$y_1 = 0 \quad y_2 = 2.52 \text{ м}$$

$$y_3 = 5.14 \text{ м}, \quad y_4 = 5.628484 \text{ м},$$

$$y_5 = 5.82 \text{ м}, \quad y_6 = 5.97 \text{ м},$$

$$y_7 = 5.1985 \text{ м}, \quad y_8 = 2.25 \text{ м},$$

$$y_9 = 0.468 \text{ м}, \quad y_{10} = 0 \text{ м}.$$

За отриманими результатами, які зводимо до таблиці (див. табл. 4), будуюмо лінію умовного нульового рівня, а також профіль інтервалу (рис. 1). Вихідні дані включають в себе відносні відмітки на їх положення відносно початку координат, тобто дійсні координати:

Таблиця 5 – Дані для побудови лінії умовного нульового рівня.

i	R	.12	.22	.38	.42	.50	.68	.88	.98	.0
i^* км	R	.4	.4	.6	.4	0	3.6	7.6	9.6	0
$i_{i,M}$	y	.52	.14	0	6	5	4	8	0	5
$i_{i,M}$	z	6	0	5	0	6	5	4	8	0
$i_{i+Z_{i,M}}$	y	6	2.52	0.14	5.68	1.82	0.97	9.19	0.25	0.46
										5

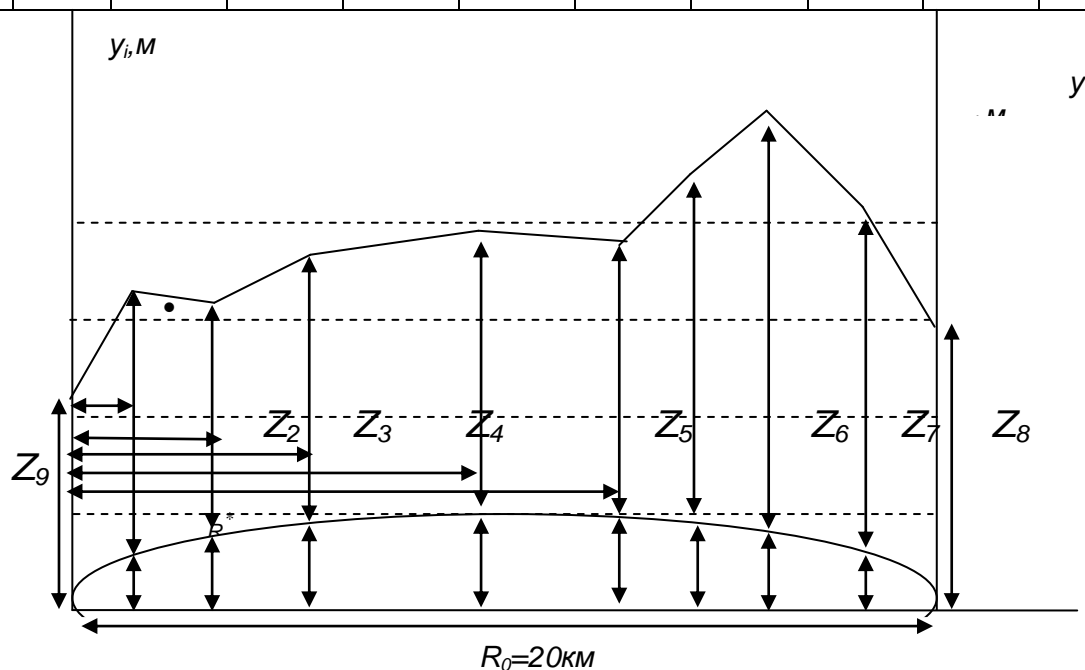


Рисунок 1 - Профіль інтервалу зв'язку.

6.1.4 Визначення висоти підвісу антен.

Для визначення висоти підвісу антен знайдемо по профілю відстань до найвищої точки перешкоди (див. рис. 1):

$$R_8=16\text{км.}$$

Розрахуємо величину H_0 , яка називається розрахунковим підвісом і визначає таку відстань між найвищими точками побудови профілю та радіо променем, при якому $V=1$:

$$H_0=\sqrt{\frac{1}{3}R_0\lambda\kappa(1-\kappa)}, \text{ [м]}$$

де $\kappa = \frac{R_8}{R_0}$ - відносна координата перешкоди (найвищої точки профілю);

λ - середня довжина хвилі.

В даному випадку $\kappa = \frac{16}{20} = 0.8$; $\lambda = 2.68 \cdot 10^{-2}$ м. Тоді

$$H_0=\sqrt{\frac{1}{3}20 \cdot 10^3 \cdot 2.68 \cdot 10^{-2} \cdot 0.8 \cdot (1-0.8)}=5,4 \text{ [м]}$$

Від найвищої точки профілю відкладаємо вверх величину H_0 і через отриману точку проводимо лінію радіопроменю так, щоб забезпечити рівність антенних опор з обох сторін інтервалу $h_1=h_2$ (рис. 2). Величини h_i визначаємо по масштабних мітках, які нанесені на вісь ординат.

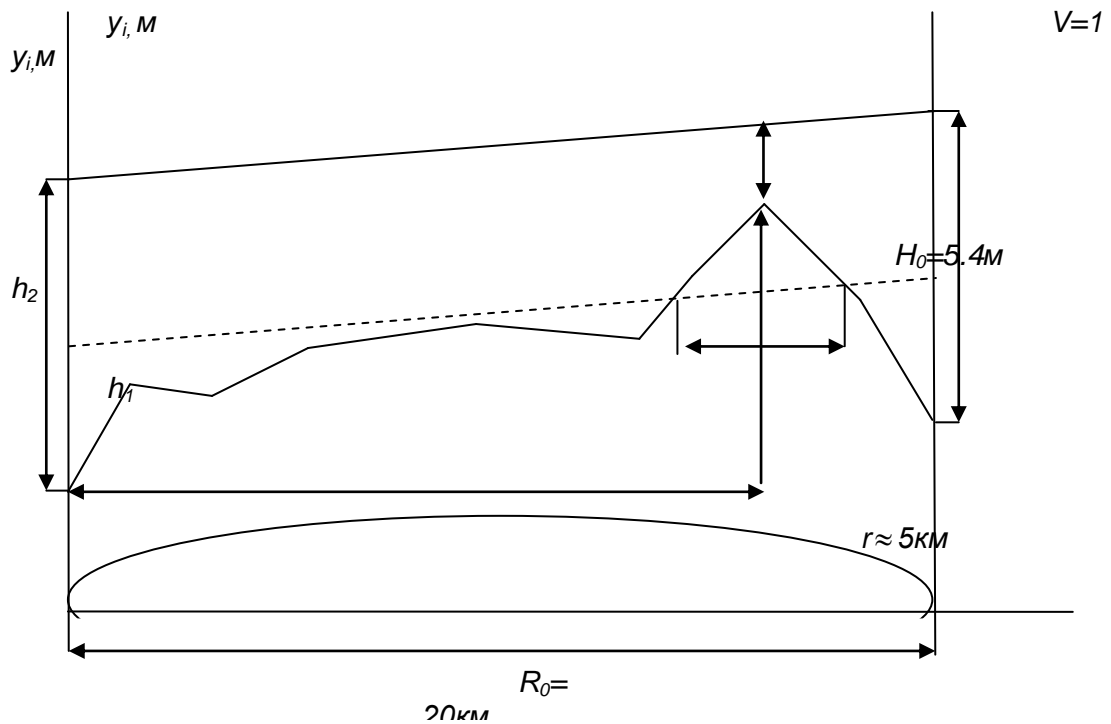


Рисунок 2 – Визначення висоти підвісу антен.

Від найвищої точки профілю відкладаємо величину H_0 і через отриману точку проводимо так лінію, щоб вона була паралельна лінії радіопроменю. В результаті отримаємо по дві точки її перетину з профілем інтервалу. Відстань між цими точками є шириною перешкоди і зазвичай позначається буквою r (рис. 2). У даному випадку, отримаємо $r=5$ км.

Слід врахувати, що якщо є декілька перетинів з профілем, то ширина перешкоди визначається по крайніх точках.

3.6.1.5 Розрахунок відсотку часу зриву зв'язку.

Після визначення висоти підвісу антен, розрахуємо відсоток часу зриву зв'язку на інтервалі $T(V_{\min \text{ доп.}})$

$$T(V_{\min \text{ доп.}}) = T_0(V_{\min \text{ доп.}}) + T_1(V_{\min \text{ доп.}}) + T_2(V_{\min \text{ доп.}}) + T_{\text{тр}}(V_{\min \text{ доп.}}),$$

де $T_0(V_{\min \text{ доп.}})$ – відсоток часу зриву зв'язку на інтервалі через екрануючу дію перешкоди;

$T_1(V_{\min \text{ доп.}})$ - відсоток часу зриву зв'язку за рахунок попадання сигналу в перший інтерференційний мінімум;

$T_2(V_{\min \text{ доп.}})$ - відсоток часу зриву зв'язку за рахунок попадання сигналу в другий інтерференційний мінімум;

$T_{\text{тр}}(V_{\min \text{ доп.}})$ - відсоток часу зриву зв'язку за рахунок впливу тропосфери.

Визначимо величину $\Delta H(g) = -\frac{R_0^2}{4} \cdot g \cdot \kappa \cdot (1 - \kappa)$, [м], яка називається приростом просвіту за рахунок рефракції. Тут R_0 – довжина інтервалу; g – градієнт діелектричної проникності середовища; κ – відносна координата перешкоди. Підрахувавши величини, отримаємо:

$$\Delta H(g) = -\frac{(20 \cdot 10^3)^2}{4} \cdot (-6 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{16 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot \left(1 - \frac{16 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3}\right) = 0.7392 \approx 1 \text{ [м]}.$$

Величину $\Delta H(g)$ можна визначити по рис.5 [7] при відомих R_0 , κ та g .

Визначимо параметр μ , який характеризує розміри перешкоди:

$$\mu = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{k^2 (1 - k)^2}{l^2}},$$

де k - відносна координата перешкоди;

$l = \frac{r}{R_0}$ - параметр, який характеризує сегмент апроксимуючого

середовища профілю (див. рис. 7.2). Тоді:

$$\mu = 2 \cdot \sqrt{\frac{0.8^2(1-0.8)^2}{\left(\frac{5 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3}\right)^2}} = 0.522.$$

По рис.6 [7] визначимо безрозмірну величину $p(g_0)$ при якій множник ослаблення дорівнює мінімально допустимому множнику $V_{\text{міндоп}}$. В нашому випадку при $V_{\text{мін доп.}} = -33,56\text{дБ}$ і $\mu = 0,674$ шукана величина $p(g_0) \approx -0,6$.

Знаходимо безрозмірну величину σ_p :

$$\sigma_p = \frac{R_0^2}{4 \cdot H_0} \cdot k \cdot (1-k) \cdot \sigma,$$

де k – відносна координата перешкоди; σ - стандартне відхилення.

При раніше отриманих результатах і, наприклад, $\sigma = 10 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{м}}$,

отримаємо:

$$\sigma_p = \frac{(20 \cdot 10^3)^2}{4 \cdot 5,4} \cdot 0,8 \cdot (1-0,8) \cdot 10 \cdot 10^{-8} = 0,3.$$

Визначимо просвіт, при якому $T(V_{\min \text{ доп.}})$ буде мінімальним.
Вихідний просвіт H беремо рівним

$$H = H_0 - \Delta H(g), [\text{м}].$$

При розрахованих вище величинах отримаємо:

$$H = 5.4 - 0.7392 = 4.66 \text{ [м]}.$$

Розрахуємо безрозмірну величину $p(g)$:

$$p(g) = \frac{H + \Delta H(g)}{H_0}.$$

Отримаємо

$$p(g) = \frac{4.66 + 0.7392}{5.4} = 1.$$

Знайдемо нормований параметр ψ :

$$\psi = - \left(\frac{p(g_0) - p(g)}{\sigma_p} \right) = - \left(\frac{-0.6 - 1}{0.146} \right) = 2.74.$$

Використовуючи отриману величину Ψ по рис. 7 [7] визначаємо

$T_0(V_{\min \text{ доп.}})$:

$$T_0(V_{\min \text{ доп.}}) = 0,00001\%.$$

Визначимо $T_1(V_{\min \text{ доп.}})$:

$$T_1(V_{\min \text{ доп.}}) = \frac{100 \Delta p_1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p_1 - p(g))^2}{2\sigma_p^2}} ; \%$$

де $p_1 = \sqrt{6}$;

Δp_1 - ширина першого інтерференційного мінімуму визначається по рис.8 [7] при розрахованому $V_{\min \text{ доп}}$ та модулі коефіцієнта відбиття радіохвиль рівному $|\Phi| = 0,99$.

$$V_{\min \text{ доп.}} = -33,56 \text{ дБ}$$

$$\Delta p_1 = 0.0075$$

При $V_{\min \text{ доп.}} = -33,56 \text{ дБ}$ отримаємо:

$$T_1(V_{\min \text{ доп.}}) = \frac{100 \cdot 0.0075}{0.3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\sqrt{6}-1)^2}{2 \cdot 0.3^2}} \approx 8.16 \cdot 10^{-6} \%$$

Аналогічно визначаємо $T_2(V_{\min \text{ доп.}})$:

$$T_2(V_{\min \text{ доп.}}) = \frac{100 \Delta p_2}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p_2 - p(g))^2}{2\sigma_p^2}} ; \%$$

де $p_1 = \sqrt{12}$;

Δp_2 - ширина другого інтерференційного мінімуму визначається аналогічно Δp_1 по рис. 8 або рис. 9 [7].

Отримаємо:

$$T_2(V_{\min \text{ доп.}}) = \frac{100 \cdot 0,0075}{0,3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\sqrt{12}-1)^2}{2 \cdot 0,3^2}} \approx 2,25 \cdot 10^{-15} \% .$$

Тепер можна визначити сумарний відсоток часу зриву зв'язку $T(V_{\min \text{ доп.}})$ на інтервалі при заданому рівні, наприклад, $T_{\text{тр}}(V_{\min \text{ доп.}}) = 0,0002\%$:

$$T(V_{\min \text{ доп.}}) = 0,00001 + 8,16 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-15} + 0,0002 \approx 0,000218\%$$

6.1.6. Перевірка стійкості зв'язку на всій лінії

Для перевірки стійкості зв'язку на всій лінії будемо рахувати сумарний відсоток для всієї лінії, яка складається з одного інтервалу ($N_{\text{инт}} = 1$):

$$T_{\Sigma} = N_{\text{инт}} T(V_{\min \text{ доп.}}) = 1 \cdot 0,000218 = 0,000218\% .$$

Для цифрової системи [7] передачі відсоток часу зриву зв'язку не повинен перевищувати значень, приведених в табл. 6.

Таблиця 6 – Відсоток часу зриву зв'язку для цифрових радіорелейних систем передачі

Радіорелейна лінія	Магістральна	Зонова	Зонова	Зонова	Місцева	Місцева
Довжина лінії	2500	1400	600	250	200	50
Відсоток часу протягом якого $P_{\text{пом}} < 10^{-3}$	0,054	0,0735	0,0315	0,0315	0,0315	0,016

Порівнюючи отримані результати з нормами можна стверджувати, що для розрахованої цифрової радіорелейної системи передачі відсоток часу зриву зв'язку не перевищує значень, приведених в табл. 6. Отже, радіорелейна лінія спроектована правильно.

Література

1. Вишнеvский В. М., Портной С. П., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472 с.
2. Коваленко А. И., Жуков Р. В., Шелковников Б. Н. Особенности технологии Long Term Evolution и сравнительный анализ помехоустойчивости при разных видах модуляции /19- я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009) : материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 14—18 сент. 2009 г.). Севастополь : Вебер, 2009. Т. 1. С. 235—236.
3. Daniel H. LTE foxed mobile convergence with ICS telecom. URL: http://www.atdi-us.com/docs/wp_mobile_lte_icstelecom.pdf (дата обращения: 15.04.2010).
4. 3GPP 3G Long Term Evolution - Evolved Packet System RAN part (LTE): Radio interface protocol aspects, Release 8, V0.1.0, 2010-04.

5. 3GPP TS 36.300. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) (Release 9). - 3GPP, 12.2009.
6. Zhang J. LTE Access Network Planning and Optimization: A Service-Oriented and Technology-Specific Perspective // Proc. of Int. IEEE Conference Globecom 2009 (Honolulu. November 30 - December 4, 2009). Hon.. 2009. P. 1-5.
7. Український державний центр радіочастот (05/10). Реєстр присвоєнь радіочастот.
8. МСЭ-R RR. (2004). Регламент радиосвязи.
9. Информационные материалы электронного издания CellularNews // cellular-news.com.
10. Информационные материалы электронного издания Fiercewireless// Fiercewireless.com.
11. Информационные материалы электронного издания Telecommunications Online
12. Информационные материалы электронного издания The Inquirer// Theinquirer.net
13. Информационные материалы электронного издания Unstrung //unstrung.com.
14. Тихвинский В.О., Терентьев С.В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS. М.: Эко-Трендз, 2007. - 400с.
15. Тихвинский В.О., Володина Е.Е. Подвижная связь третьего поколения: экономика и качество услуг. М.: Радио и связь, 2005.
16. Сайко В.Г. Особенности инновационного развития мобильных систем в Украине// Винахідник і раціоналізатор, № 6, 2003, с. 21-25.
17. Сайко В.Г. Применение шумоподобных сигналов в системах связи 3-го поколения //Винахідник і раціоналізатор.- № 11/2005, с. 15-22.
18. Груздев А.В., Мухин П.В. Некоторые аспекты развития систем сотовой связи 4-го поколения // Зв'язок . - №4. – 2009, с. 23-29.
19. Сайко В.Г., Літвінов Ю.М. Практичні аспекти впровадження сучасних радіотехнологій WiMAX та радіорелейних систем: Тези доповідей: II науково-практичної конференції «Актуальні питання регулювання у сфері телекомунікацій та користування радіочастотним ресурсом України» 11-13 червня 2008 року м. Київ «Укрчастотнагляд» С. 86.
20. Сайко В.Г. Фемтосоты в сетях мобильной связи: решения и проблемы внедрения // Зв'язок. -- №3/2009. -- с.2-5.
21. H. Holma, A. Toskala, W-CDMA for UMTS, John Wiley & Sons, 3rd edition, 2004.
22. Информационные материалы сайта <http://www.3gpp.org/LTE>(англ.) — сайт стандарта LTE.

23. Информационные материалы сайта <http://www.mforum.ru/analit/LTE.htm>
24. Информационные материалы сайта <http://ltewatch.blogspot.com/>(англ.) — новости LTE.
25. Информационные материалы сайта <http://www.lte-conf.com/> - Международная конференция и выставка по технологии LTE — глобальному стандарту беспроводной связи 4G «LTE в России — 2009»
26. Информационные материалы сайта Инфокоммуникационного Союза (Россия)// infocomunion.ru.
27. Вишневецкий В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. -- М.: Техносфера, 2009. – 472с.
28. Информационные материалы электронного издания Connected Planet.
29. Информационные материалы электронного издания Light Reading.
30. Информационные материалы электронного издания Telecom Engine// <http://www.telecomengine.com>.
31. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. -- М.: Эко-Трендз, 2010. - 284с.