

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
КАФЕДРА ЗВУКОТЕХНІКИ ТА РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПРАКТИКУМ

**з кредитного модуля “Безпроводові телекомунікаційні системи – 2.
Системи та засоби зв’язку з рухомими об’єктами“**

Методичні рекомендації до проведення практичних занять та виконання
лабораторних робіт

(для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки
6.050903 “Телекомунікації”)

Київ 2013

Навчальний практикум з кредитного модуля “Безпроводові телекомунікаційні системи – 2. Системи та засоби зв’язку з рухомими об’єктами“. Методичні рекомендації до проведення практичних занять та виконання лабораторних робіт для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050903 “Телекомунікації” / Укл. В.Г. Абакумов, П.В. Попович, К.О. Трапезон. – К.: Аверс, 2013. – 146 с.

*Рекомендовано Методичною комісією факультету електроніки НТУУ “КПІ”
(Протокол № 05/13 від 27 травня 2013 р.)*

Навчальне видання

**Навчальний практикум з кредитного модуля
“Безпроводові телекомунікаційні системи – 2. Системи та засоби зв’язку з
рухомими об’єктами“**

Методичні рекомендації

до проведення практичних занять та виконання лабораторних робіт для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050903 “Телекомунікації”

Укладачі: Абакумов Валентин Георгійович, доктор техн. наук, професор
Попович Павло Васильович, асистент
Трапезон Кирило Олександрович, кандидат техн. наук, доцент.

Відповідальний редактор:

Савченко Юлій Григорович, доктор технічних наук, професор

Рецензент:

Берегун Віктор Сергійович, кандидат технічних наук, асистент

Ухвалено на засіданні кафедри звукотехніки та реєстрації інформації / протокол №1 від 30.08.2012 р.

ЗМІСТ

Вступ	5
Мета та завдання навчального практикуму	6
Розділ 1. Частотно-територіальне планування систем рухомого зв'язку.....	7
1.1 Повторне використання частот. Поняття кластеру. Співканальні завади... 7	
1.2 Формули Ерланга	14
1.3 Розподіл частот між стільниками чи секторами	21
Задачі для самостійного розв'язання.....	24
Розділ 2. Поширення радіохвиль в мережах рухомого зв'язку	27
2.1 Моделі поширення хвиль в діапазонах ДВЧ і УВЧ.....	27
2.2 Швидкі завмирання в каналах зв'язку	30
2.3 Способи боротьби з швидкими завмираннями сигналів.....	37
Задачі для самостійного розв'язання.....	40
Розділ 3. Модуляція, каналне кодування та розширення спектру в системах рухомого зв'язку	43
3.1 Модуляція в системах рухомого зв'язку.....	43
3.2 Завадостійкість та спектр цифрових методів модуляції	48
3.3 Вибір каналного коду.....	54
3.4. Передавання сигналів з кодовим розділенням каналів. Кодування за Волшем	56
Задачі для самостійного розв'язання.....	61
Розділ 4. Лабораторний практикум	63
Лабораторна робота №1. Основи роботи в програмі Atoll. Робота з цифровими картами місцевості.....	63
Лабораторна робота №2. Моделювання радіопокриття базової станції в Atoll	73
Лабораторна робота №3. Моделювання радіопокриття системи GSM на заданій території в Atoll.....	86
Лабораторна робота №4. Моделювання радіорелейної лінії для об'єднання базових станцій в мережу.....	94

Лабораторна робота №5. Дослідження моделей поширення радіохвиль в Atoll.....	104
Лабораторна робота №6. Розподілення робочих частот базових станцій системи GSM в Atoll	113
Лабораторна робота №7. Моделювання радіопокриття системи UMTS на заданій території в Atoll.....	123
Лабораторна Робота №8. Моделювання радіопокриття системи LTE на заданій території в Atoll.....	134
Критерії оцінювання та вказівки про порядок захисту лабораторних робіт	145
Список рекомендованої літератури.....	146

ВСТУП

Дисципліна «Безпроводові телекомунікаційні системи – 2. Системи та засоби зв'язку з рухомими об'єктами» належить до ряду фундаментальних фахових дисциплін під час вивчення та освоєння спеціальності «Телекомунікаційні системи та мережі» за напрямом підготовки 6.050903 «Телекомунікації».

Вивчення дисципліни базується на змісті дисциплін «Технічна електродинаміка, антени та поширення радіохвиль», «Основи теорії телекомунікацій», «Мережні технології», «Телекомунікаційні мережі». Вона є основою для вивчення дисципліни «Телекомунікаційні мережі наступного покоління».

В дисципліні розглядають сучасні концепції побудови систем мобільного зв'язку та тенденції їх розвитку, технології їх поєднання з іншими телекомунікаційними каналами під час передавання інформації, що відповідає основній задачі стандартизації цих систем з метою створення регіональних загальнонаціональних мереж зв'язку.

Це повинно забезпечити належну підготовку студентів для успішного вивчення інших дисциплін відповідно до вимог кваліфікаційної характеристики спеціаліста та магістра, а також для вирішення виробничих задач під час самостійної роботи в галузі телекомунікацій.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ НАВЧЛЬНОГО ПРАКТИКУМУ

Навчальний практикум з кредитного модулю відповідно до навчальної програми складається з практичних занять та лабораторних робіт.

Метою практичних занять є засвоєння студентом основних особливостей функціонування систем рухомого зв'язку, отримання навичок розрахунку параметрів мереж рухомого зв'язку, а також набуття вмінь щодо вибору методів боротьби з внутрішньо-системними завадами та ефектами завмирань.

Метою лабораторних робіт є отримання студентом навичок проектування, моделювання та аналізу мереж рухомого зв'язку (зокрема, мереж стільникового зв'язку) в спеціалізованих програмних середовищах. Під час виконання лабораторних робіт студенти:

- досліджують робоче середовище програми та отримують базові навички роботи з цифровими картами місцевості в програмному комплексі для моделювання радіопокриття;

- здійснюють моделювання радіопокриття базової станції (БС) та налаштування параметрів передавача БС та антени;

- здійснюють моделювання радіопокриття систем GSM/GPRS/EDGE, UMTS, WiMAX, LTE;

- виконують об'єднання базових станцій в мережу за допомогою радіорелейних ліній зв'язку, а також створюють та аналізують профіль радіотраси;

- досліджують особливості застосування моделей поширення радіохвиль для моделювання радіопокриття;

- визначають необхідну кількість приймально-передавальних модулів (TRX) базової станції GSM/GPRS/EDGE на основі даних про інтенсивність трафіку на заданій території;

- налаштовують частотні канали та ідентифікатори передавачів базових станцій, складають частотний план та проводять точковий аналіз завадової ситуації для систем GSM/GPRS/EDGE, UMTS, WiMAX, LTE засобами програми Atoll.

РОЗДІЛ 1. ЧАСТОТНО-ТЕРИТОРІАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ СИСТЕМ РУХОМОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Повторне використання частот. Поняття кластеру. Співканальні завади

Нехай системі зв'язку виділена смуга частот F , при цьому N – загальна кількість радіоканалів і k – кількість стільників в зоні обслуговування (рис. 1.1). Тоді кількість радіоканалів в стільнику буде дорівнювати N/k .

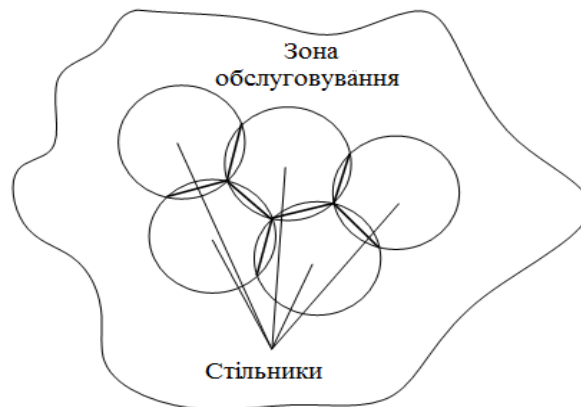


Рисунок 1.1 – Структура зони обслуговування (ЗО)

Щоб кількість радіоканалів в стільнику залишалась прийнятною з точки зору абонентської ємності, було вирішено розподіляти весь частотний ресурс системи лише серед певної обмеженої кількості стільників, а потім повторювати ці частоти на інших територіях ЗО.

Такий принцип розподілу частотних ресурсів в стільниковому зв'язку отримав назву принципу повторного використання частот (рис. 1.2).

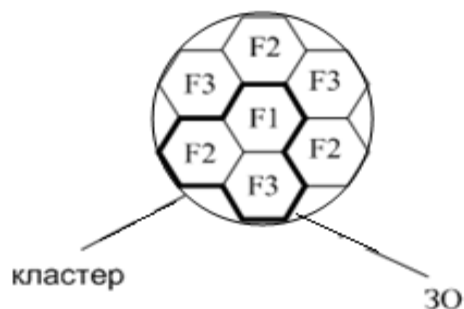


Рисунок 1.2 – Кластер

Група стільників, що використовує частоти, які не повторюються, називається кластером.

Кількість стільників в кластері визначає розмір кластеру або коефіцієнт повторення частот (позначається літерою C).

Розмір кластеру визначають з формули:

$$C = i^2 + j^2 + ij,$$

де i, j – довільні цілі невід’ємні числа $i, j = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$

Розмір кластеру може приймати значення $C = 1, 3, 4, 7, 9, 12, \dots$

■ Приклад 1.1

Для системи стільникового зв’язку (ССЗ) виділена смуга частот $F = 33$ МГц. Ширина одного радіоканалу складає $\Delta f = 50$ кГц. Розмір кластера становить $C_1 = 4; C_2 = 7; C_3 = 12$. Необхідно знайти:

а) кількість каналів в стільнику;

б) якщо для каналів управління в даній системі зв’язку виділено смугу 1 МГц, знайти кількість каналів трафіку та кількість каналів управління в стільнику при розмірі кластеру 12.

Розв’язання

Визначимо загальну кількість каналів в системі:

$$N = \frac{F}{\Delta f_k} = \frac{33 \cdot 10^6}{50 \cdot 10^3} = 660.$$

Визначимо кількість каналів в стільнику:

$$N_{C_x} = \frac{N}{C_x}.$$

$$N_{C_1} = \frac{660}{4} = 165; N_{C_2} = \frac{660}{7} = 95; N_{C_3} = \frac{660}{12} = 55.$$

Визначимо кількість каналів управління:

$$N_{\text{кy}} = \frac{F_{\text{кy}}}{\Delta f_{\text{к}}} = \frac{1 \cdot 10^6}{50 \cdot 10^3} = 20.$$

Визначимо кількість каналів управління в стільнику:

$$N_{\text{с_кy}} = \frac{N_{\text{кy}}}{C} = \frac{20}{12} = 2.$$

Знайдемо кількість каналів трафіку:

$$N_m = N - N_{\text{кy}} = 660 - 20 = 640.$$

Визначимо кількість каналів трафіку для стільника:

$$N_{\text{с_м}} = \frac{N_m}{C} = \frac{640}{12} = 54.$$

Відповідь: $N_{\text{с}_1} = 165; N_{\text{с}_2} = 95; N_{\text{с}_3} = 55; N_{\text{с_кy}} = 2; N_{\text{с_м}} = 54.$ ■

У системах стільникового зв'язку існують два види внутрішньосистемних завад:

- співканальні (інтерференційні) завади;
- завади в сусідньому каналі.

Стільники, які використовують одній й ті ж групи частот, називаються співканальними. Відповідно завади між сигналами від цих стільників отримали назву співканальних (інтерференційних) завад.

Рівень співканальних завад визначають відношенням потужності корисного сигналу до сумарної потужності заважаючих сигналів від співканальних стільників: S / I - signal-to-interference ratio (SIR), дБ:

$$\frac{S}{I} = \frac{P_{\text{кор БС}}}{\sum P_{\text{ст БС } i}}$$

Завади в сусідньому каналі визначають відношенням потужності корисного сигналу до потужності сигналу від сусіднього $(i-1)$ чи $(i+1)$ каналу на частоті корисного сигналу f_i (рис.1.3).

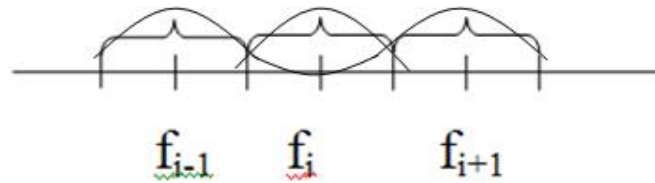


Рисунок 1.3 – До визначення завад у сусідньому каналі

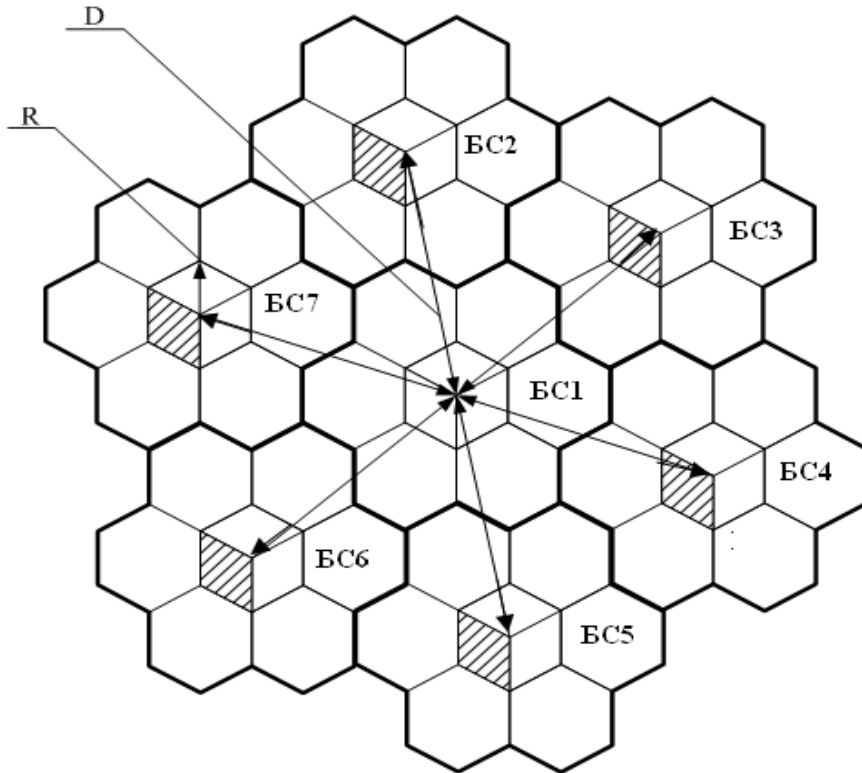


Рисунок 1.4 – Структура системи стільникового зв'язку з кластером розміром 7

На рис. 1.4 показаний механізм виникнення співканальних завад у випадку використання ненаправлених антен, де R – радіус стільника та D – захисний інтервал (відстань між центрами співканальних стільників та стільника з корисним сигналом) з припущенням, що МС розташована недалеко від BC1. Тут BC2, ..., BC7 – інтерферуючі базові станції.

Вводять коефіцієнт зменшення співканальних завад q , який визначається за виразом:

$$q = \frac{D}{R}.$$

Виходячи із геометрії стільника, коефіцієнт q можна також визначити з виразу:

$$q = \sqrt{3C},$$

де C – розмір кластеру.

Можна легко показати, що відношення сигнал-завада залежить від розміру кластера та визначається за формулою:

$$\frac{S}{I} = \frac{(D/R)^n}{i_0} = \frac{(\sqrt{3C})^n}{i_0},$$

де n – показник загасання ($n = 2...5,5$);

$n = 2$ – у випадку поширення у вільному просторі;

$n = 4$ – у випадку міської забудови (типове значення);

$n = 5,5$ – при щільній міській забудові;

i_0 – кількість співканальних стільників (секторів);

M – кількість секторів (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Залежність кількості співканальних стільників від кількості секторів у стільнику

M	i_0
1	6
3	2
6	1

■ Приклад 1.2

Допустиме значення відношення $\frac{S}{I}$ для ССЗ складає 15 дБ. Вважаємо, що в системі використовуються стільники з ненаправленими антенами. Знайти розмір кластеру C , що використовується в даній системі зв'язку. Визначення розміру кластера здійснити як в більшу, так і в меншу сторону; здійснити перевірку виконання умови: $\frac{S}{I} \leq \frac{S}{I}_{\text{доп}}$.

Розв'язання

Відношення сигнал-завада залежить від розміру кластера:

$$\frac{S}{I} = \frac{(\sqrt{3C})^n}{i_0}$$

Для кількості секторів $M = 1$ кількість співканальних стільників $i_0 = 6$. Якщо інше не передбачено умовою задачі, типове значення показника загасання для випадку міської забудови складає $n = 4$. Переведемо дБ у відносні одиниці:

$$15 \text{ дБ} = 10 \lg \left(\frac{S}{I} \right) \Rightarrow \frac{S}{I} = 33,3.$$

Визначимо розмір кластера:

$$\frac{S \cdot i_0}{I} = 9C_1^2 \Rightarrow C_1 = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{S \cdot i_0}{I}} = \frac{1}{3} \sqrt{33,3 \cdot 6} = 4,7.$$

Оскільки кластер з розміром 4,7 не існує, його потрібно обрати з ряду $C = 1, 3, 4, 7, 9, 12, \dots$, проте отриманий розмір кластера має задовольняти вимогам щодо рівня завад. Припустимо, що $C_1 = 7$.

Визначимо тепер, чому дорівнює відношення сигнал-завада при такому розмірі кластера:

$$\left(\frac{S}{I} \right)_1 = 18,7 \text{ дБ.}$$

Якщо ж обрати $C_2 = 4$, то розраховане значення $\left(\frac{S}{I} \right)_2$ буде менше 15 дБ, що не задовольняє умові функціонування системи без завад.

$$\text{Відповідь: } C_1 = 7; \left(\frac{S}{I} \right)_1 = 18,7 \text{ дБ. } \blacksquare$$

■ Приклад 1.3

Визначити захисний інтервал, якщо радіус стільника складає 2 км у випадку використання: а) ненаправлених антен, б) трисекторних антен, якщо допустиме відношення сигнал-завада складає 18 дБ.

Розв'язання

Відношення сигнал завада залежить від радіусу стільника та величини захисного інтервалу:

$$\frac{S}{I} = \frac{\left(\frac{D}{R}\right)^n}{i_0} = \frac{(\sqrt{3C})^n}{i_0}.$$

1) Знайдемо спочатку розмір кластера, оскільки значення D і R однозначно пов'язані з цілочисленим значенням розміру кластера C . Для ненаправлених антен кількість секторів $M = 1$, кількість співканальних стільників $i_0 = 6$, типове значення показника загасання $n = 4$. Переведемо дБ у відносні одиниці:

$$18 \text{ дБ} = 10 \lg \left(\frac{S}{I} \right) \Rightarrow \frac{S}{I} = 63.$$

Розмір кластера:

$$\frac{S}{I} = \frac{(\sqrt{3C})^n}{i_0} \Rightarrow \frac{S \cdot i_0}{I} = 9C^2 \Big|_{n=4} \Rightarrow C = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{S \cdot i_0}{I}} = \frac{1}{3} \sqrt{63 \cdot 6} = 6,5.$$

Обираємо розмір кластеру $C = 7$. Тоді величина захисного інтервалу буде:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3C} \Rightarrow D = R \cdot \sqrt{3C} = 2 \cdot \sqrt{3 \cdot 7} = 9,16 \text{ км.}$$

2) Для трисекторних антен кількість секторів $M = 3$, кількість співканальних стільників $i_0 = 2$, типове значення показника загасання $n = 4$.

Розмір кластера:

$$\frac{S}{I} = \frac{(\sqrt{3C})^n}{i_0} \Rightarrow \frac{S \cdot i_0}{I} = 9C^2 \Big|_{n=4} \Rightarrow C = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{S \cdot i_0}{I}} = \frac{1}{3} \sqrt{63 \cdot 2} = 3,74.$$

Обираємо розмір кластеру $C = 4$. Тоді величина захисного інтервалу буде:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3C} \Rightarrow D = R \cdot \sqrt{3C} = 2 \cdot \sqrt{3 \cdot 4} = 6,93 \text{ км.}$$

Відповідь: $D_1 = 9,16$ км, $D_2 = 6,93$ км. ■

1.2 Формули Ерланга

Для розрахунку інтенсивності трафіка, що виникає в мережах з комутацією каналів, використовують формули Ерланга.

Інтенсивність трафіку, що генерується одним користувачем A_u , Ерл – це добуток середньої кількості викликів за одиницю часу на середню тривалість кожного виклику:

$$A_u = I \cdot H,$$

де I – середня кількість викликів за одиницю часу для 1 користувача,

H – середня тривалість кожного виклику.

Для системи, що містить N_k користувачів, загальний запропонований трафік системи буде складати $A = A_u \cdot N_k$.

На рис. 1.5 показана система комутації з блокуванням виклику.

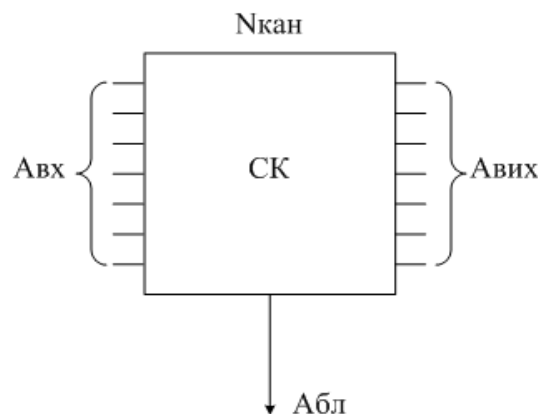


Рисунок 1.5 – Система з блокуванням виклику

На рис.1.5 прийняті такі позначення: $A_{вх}$ – запропонований вхідний трафік; $A_{вих}$ – вихідний трафік, $A_{вих} < A_{вх}$; $A_{бл}$ – блокований трафік; $P_{бл}$ – імовірність блокування виклику; $N_{кан}$ – кількість каналів в системі комутації.

Імовірність блокування виклику (GOS – Grade of Service, або рівень обслуговування) в такій системі комутації описується першою формулою

Ерланга:

$$P_{\text{бл}} = \frac{A^N}{\sum_{i=0}^N \frac{A^i}{i!}},$$

де N – кількість каналів трафіку в системі комутації; A – інтенсивність повного запропонованого трафіку, Ерл.

У випадку ідеального планування системи комутації вихідний трафік буде максимальним та чисельно буде дорівнювати кількості каналів в системі N , Ерл.

На рис. 1.6 показана система комутації з затримкою виклику.



Рисунок 1.6 – Система комутації з затримкою виклику

На рисунку 1.6 прийняті такі позначення:

$P_{\text{затр}}$ – імовірність затримки виклику.

Імовірність затримки виклику в такій системі комутації визначається другою формулою Ерланга:

$$P_{\text{затр}} = \frac{A^N}{A^N + N! \left(1 - \frac{A}{N}\right) \sum_{i=0}^N \frac{A^i}{i!}}.$$

При цьому імовірність того, що затримка буде перевищувати якусь встановлену величину $T_{\text{затр}}$:

$$P_{\text{затр}}(t > T_{\text{затр}}) = P_{\text{затр}} \cdot P(t > T_{\text{затр}} / t > 0) = P_{\text{затр}} \cdot \exp(-(N - A)T_{\text{затр}} / H).$$

Середня затримка для всіх викликів в черзі:

$$D = P_{\text{затр}} \cdot \frac{H}{N - A}.$$

Для зручності розрахунків перша та друга формули Ерланга можуть бути представлені у вигляді графіків (рис. 1.7-1.8).

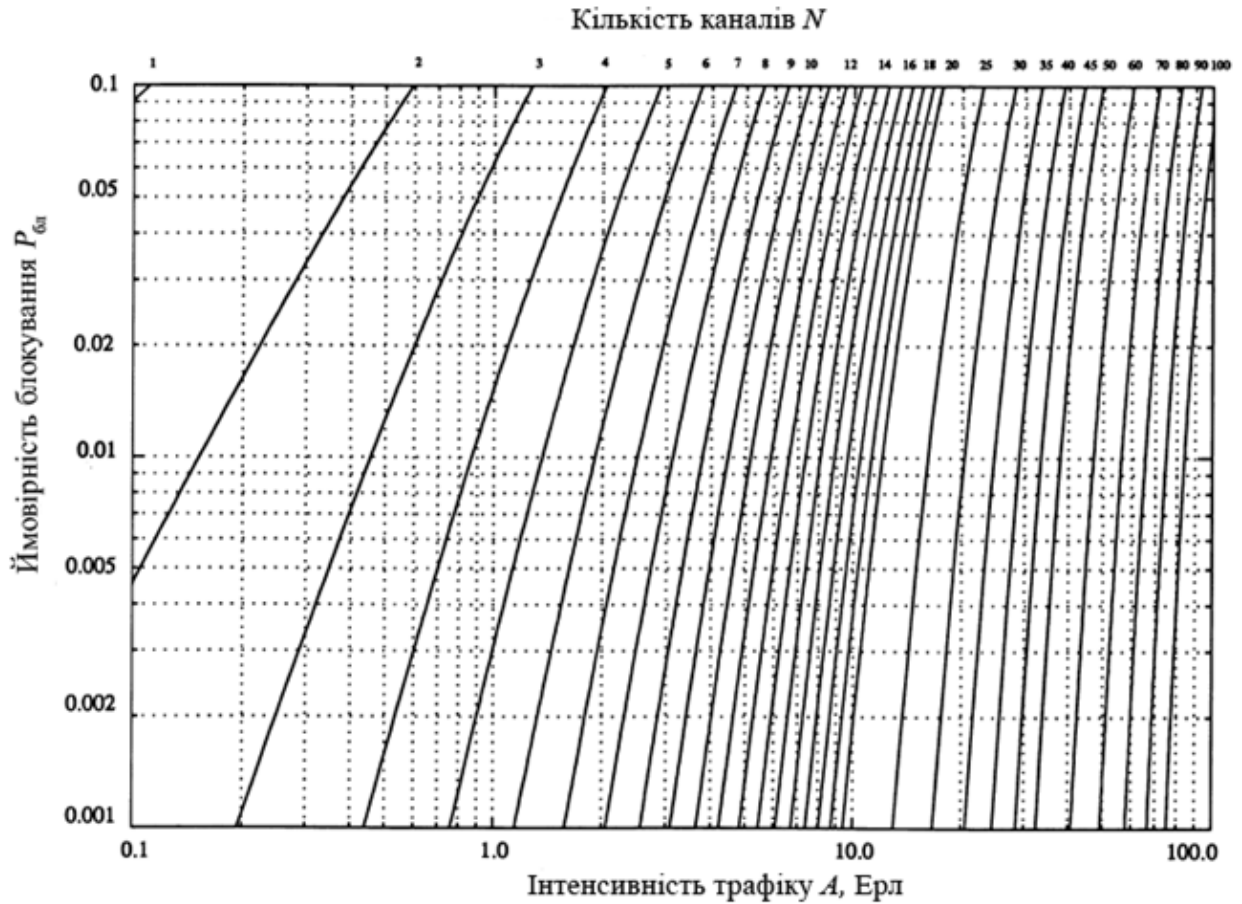


Рисунок 1.7 – Графічне представлення першої формули Ерланга (Erlang B)

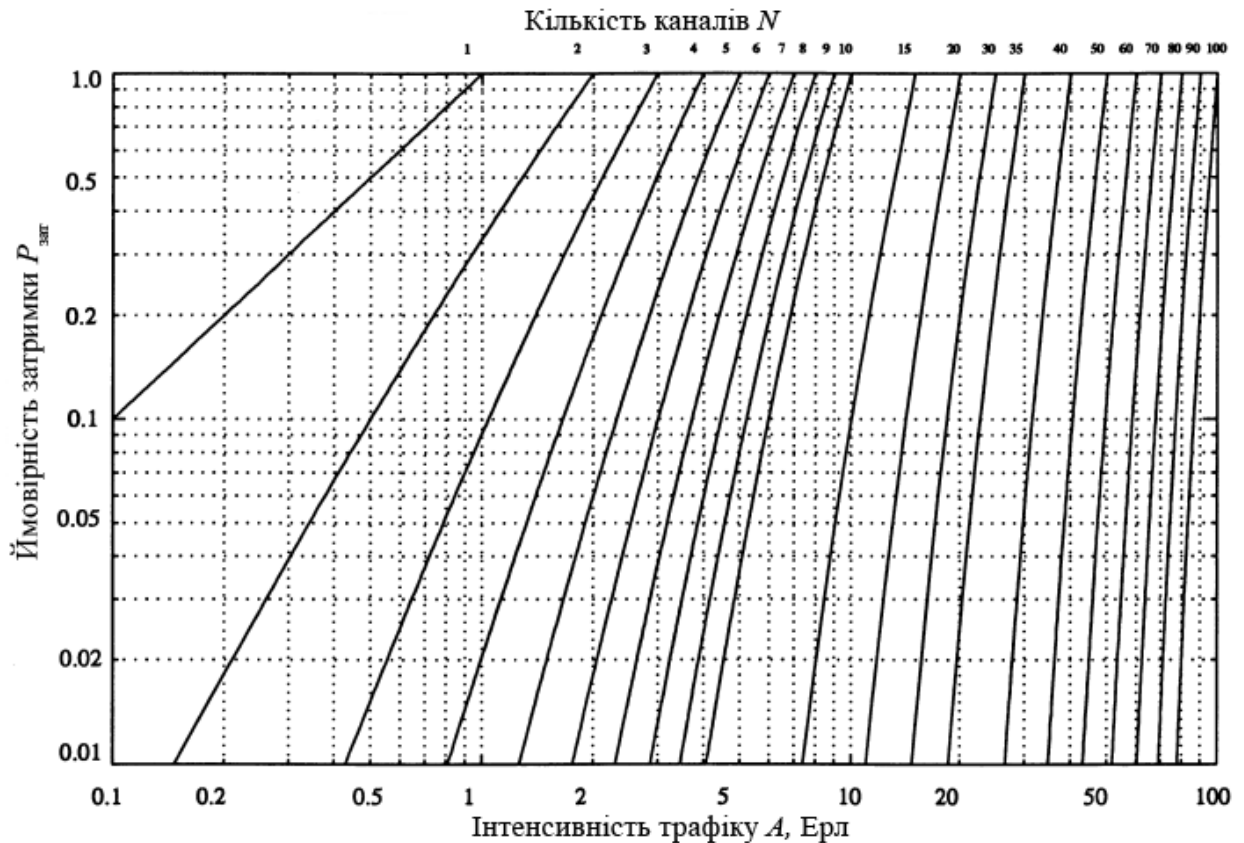


Рисунок 1.8 – Графічне представлення другої формули Ерланга (Erlang C)

■ Приклад 1.4

Скільки користувачів може підтримувати система комутації з блокуванням викликів у випадку ймовірності блокування 0,5%, якщо кількість каналів в системі комутації становить: а) 1, б) 5, в) 20, г) 100. Інтенсивність трафіку, що генерується одним користувачем, становить 0,1 Ерл.

Розв'язання

Загальний запропонований трафік системи будемо визначати графічно (див. рис.1.7).

$$\text{У випадку } N = 1, A = 0,005 \text{ Ерл, } N_k = \frac{A}{A_U} = \frac{0,005}{0,1} = 0,05.$$

$$\text{У випадку } N = 5, A = 1,2 \text{ Ерл, } N_k = \frac{A}{A_U} = \frac{1,2}{0,1} = 12.$$

$$\text{У випадку } N = 20, A = 12 \text{ Ерл, } N_k = \frac{A}{A_U} = \frac{12}{0,1} = 120.$$

$$\text{У випадку } N = 100, A = 80 \text{ Ерл, } N_k = \frac{A}{A_u} = \frac{80}{0,1} = 800.$$

Відповідь: 0,05; 12; 120; 800. ■

■ Приклад 1.5

Місто має населення 2 млн. жителів. ССЗ складається з 98 стільників, в кожному стільнику використовується 57 каналів. Враховуючи, що в системі комутації з блокуванням викликів ймовірність блокування становить 2%, а кожен користувач виконує в середньому 2 виклики на годину з середньою тривалістю 3 хв., необхідно знайти кількість абонентів, яку обслуговує ця система зв'язку, та глибину проникнення сервісу.

Розв'язання

Інтенсивність трафіку, що генерується одним користувачем:

$$A_u = I \cdot H = \frac{2}{60} \cdot 3 = 0,1 \text{ Ерл.}$$

Визначимо трафік в одному стільнику, використовуючи графік (рис. 1.7):

$$A_c = 45 \text{ Ерл.}$$

Знайдемо трафік в системі:

$$A_{\text{ССЗ}} = A_c \cdot N_c = 45 \cdot 98 = 4410 \text{ Ерл.}$$

Кількість абонентів в системі:

$$N_{\text{ССЗ}} = \frac{A_{\text{ССЗ}}}{A_u} = \frac{4410}{0,1} = 44100.$$

Тоді глибина проникнення сервісу складатиме:

$$\frac{N_{\text{ССЗ}}}{N_{\text{нас}}} = \frac{44100}{2000000} = 2,205\%$$

Відповідь: 44100; 2,205%. ■

■ Приклад 1.6

Місто площею 1300 миль² (1 миля = 1,6 км) покрите системою зв'язку, яка використовує кластер розміром 7. Знаючи, що радіус стільника складає 4 милі, системі зв'язку виділена смуга 40 МГц при ширині смуги радіоканалу 60 кГц, ймовірність блокування виклику становить 2%, а інтенсивність трафіку одного користувача – 0,03 Ерл, необхідно знайти: а) кількість стільників в зоні покриття; б) кількість каналів в одному стільнику; в) інтенсивність трафіку в кожному стільнику; г) максимальний трафік в системі; д) загальну кількість користувачів в системі; е) теоретично максимальну кількість користувачів, що могли б одночасно обслуговуватися.

Розв'язання

Визначимо площу стільника:

$$S_0 = \frac{3}{2} \sqrt{3} R_c^2 = 41,57 \text{ миля}^2 = 106,41 \text{ км}^2.$$

Знайдемо кількість стільників:

$$N_{\text{ст.}} = \frac{S}{S_0} = \frac{3328}{106,41}; 31.$$

Визначимо кількість користувачів в стільнику:

$$N_{\text{к.ст.}} = \frac{F}{\Delta f_k \cdot C} = \frac{40 \cdot 10^6}{60 \cdot 10^3 \cdot 7}; 95.$$

Визначимо трафік в стільнику (за графіком на рис.1.7):

$$A_{\text{ст.}} = 85 \text{ Ерл.}$$

Тоді загальний трафік складатиме:

$$A = A_{\text{ст.}} \cdot N_{\text{ст.}} = 85 \cdot 31 = 2635 \text{ Ерл.}$$

Визначимо загальну кількість користувачів:

$$N_k = \frac{A}{A_U} = \frac{2635}{0,03} = 87833.$$

Визначимо теоретичну максимальну кількість користувачів, що можуть обслуговуватись одночасно:

$$N_{\text{к.мах}} = N_{\text{к.ст.}} \cdot N_{\text{ст.}} = 95 \cdot 31 = 2945.$$

Відповідь: $N_{\text{ст.}} = 31$; $N_{\text{к.ст.}} = 95$; $A_{\text{ст.}} = 85$ Ерл; $A = 2635$ Ерл; $N_{\text{к}} = 87833$;
 $N_{\text{к.мах}} = 2945$. ■

■ Приклад 1.7

Шестикутний стільник з розрядом кластера 4 має радіус 1,387 км. В системі використовують 60 каналів, якщо навантаження на одного користувача становить 0,029 Ерл, а користувач здійснює $I = 1$ викликів/годину. Для системи комутації затримки виклику, в якій імовірність затримки складає 5% знайти:

- Кількість користувачів на квадратний кілометр?
- Імовірність того, що виклик буде затриманий на час більше ніж 10 секунд?

Розв'язання

Враховуючи, що радіус стільника $R = 1,387$ км, площа покриття стільника $S = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 = 2,598 \cdot (1,387)^2 = 5$ км². Оскільки кількість стільників в кластері 4, а загальна кількість каналів 60, тоді кількість каналів в стільнику $60 / 4 = 15$ каналів.

а) З рис. 1.8, для імовірності затримки 5% та кількості каналів 15 інтенсивність трафіку складе 9,0 Ерл.

Таким чином, кількість користувачів:

$$N_a = \frac{A}{A_0} = \frac{9}{0,029} = 310 \text{ користувачів,}$$

$$N_{a[\text{км}^2]} = \frac{N_a}{S} = \frac{310}{5} = 62 \text{ кор./км}^2.$$

б) З урахуванням $P_{\text{затр}}(t > 0) = 5\% = 0,05$ імовірність того, що виклик затримується більш ніж на $T = 10$ секунд:

$$P_{\text{затр}}(t > T) = P_{\text{затр}}(t > 0) \cdot e^{-\frac{(N-A)T}{H}} = 0,05 \cdot 0,5629 = 2,81\%.$$

Відповідь: а) 62кор./км²; б) 2,81%. ■

1.3 Розподіл частот між стільниками чи секторами

Під час розподілу частот між стільниками необхідно знати:

- розмір кластеру C ;
- кількість доступних радіоканалів $N_{\text{рк}}$;
- тип антен (направлені чи ненаправлені).

Необхідно зобразити кластер та присвоїти кожному стільнику певний номер (1, 2, 3,...), а кожному сектору з однаковим азимутом – певну літеру (А, В чи С). На рис. 1.9 наведено цифро-буквене позначення стільників та секторів в кластері розміром $C = 3$. Після цього необхідно заповнити таблицю, в якій шапка буде містити послідовно сектори з однаковими азимутами, а рядки таблиці – номери радіоканалів.

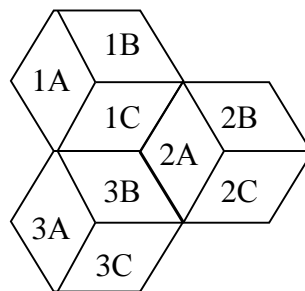


Рисунок 1.9 – Позначення стільників та секторів в кластері

Під час розподілу частот необхідно виконати 2 умови:

- забезпечити мінімальний рівень співканальних (інтерференційних завад);
- забезпечити мінімальний рівень завад в сусідньому каналі.

Як приклад, розглянемо заповнення такої таблиці для системи з $N_{\text{рк}} = 124$, $C = 3$ та трисекторними антенами (табл.1.2).

Таблиця 1.2 – Розподіл радіоканалів за секторами у кластері

1A	2A	3A	1B	2B	3B	1C	2C	3C
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
...
118	119	120	121	122	123	124		

■ Приклад 1.8

Для системи зв'язку AMPS, в якій використовується розмір кластеру $C = 7$, здійснити розподіл частот між двома операторами А і В у рівній пропорції, якщо в системі використовуються стільники з трьома секторами. Визначити кількість каналів трафіку та кількість каналів управління (КУ), виділивши для КУ канали на початку діапазону частот.

Розв'язання

Розрахуємо загальну кількість каналів:

$$N_{\text{кан}} = \frac{20 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3} = 666 \text{ каналів.}$$

Тоді операторам А і В належить виділити по 333 канали:

$$N_A = (1 \dots 333),$$

$$N_B = (334 \dots 666).$$

Для КУ виділяється біля 5% від всього спектру частот:

$$KU = 5\% \cdot F = 20 \cdot 0,05 = 1 \text{ МГц.}$$

Тоді:

$$N_{\text{КУ}} = \frac{10^6}{3 \cdot 10^4} = 33 \text{ канали.}$$

Це означає, що необхідно виділити мінімум по 17 каналів управління кожному оператору:

$$N_{A_{\text{КУ}}} = N_{B_{\text{КУ}}} = 17 \text{ каналів.}$$

Зважаючи на те, що кожному сектору треба виділити щонайменше по одному каналу управління (причому в кластері 7 стільників), тоді для кожного оператора необхідно по 21 каналу управління. Тоді загальна кількість КУ для обох операторів $N_{\text{КУ}} = 42$.

Згідно умови задачі кластер матиме розмірність: (7; 21). Тоді для операторів А і В канали будуть розподілені відповідно до табл. 1.3 та табл. 1.4.

Таблиця 1.3 – Розподіл частот для оператора А

1А	2А	3А	4А	5А	6А	7А	1В	2В	3В	4В	5В	6В	7В	1С	2С	3С	4С	5С	6С	7С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
...
316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	-	-	-

Для оператора А канали управління матимуть номери 1...21, а канали трафіку – 22...333.

Таблиця 1.4 – Розподіл частот для оператора В

1А	2А	3А	4А	5А	6А	7А	1В	2В	3В	4В	5В	6В	7В	1С	2С	3С	4С	5С	6С	7С
334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354
...
649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	-	-	-

Для оператора В канали управління матимуть номери 334...354, а канали трафіку – 355...666.

Відповідь: оператор А – канали управління 1...21, канали трафіку – 22...333; оператор В – канали управління – 334...354, канали трафіку – 355...666. ■

Задачі для самостійного розв'язання

1. Допустиме значення відношення сигнал-завада S/I для ССЗ складає 16 дБ. Вважаємо, що в системі використовуються стільники з трьох секторними антенами. Знайти розмір кластеру C , що використовується в даній системі зв'язку. Визначення розміру кластера здійснити як в більшу, так і в меншу сторони; здійснити перевірку виконання умови $\frac{S}{I} < \frac{S}{I}_{\text{доп}}$.

2. Визначити радіус стільника, якщо захисний інтервал складає 10 км, у випадку використання: а) ненаправлених антен; б) трисекторних антен; в) шестисекторних антен, якщо необхідне відношення сигнал-завада складає 14 дБ.

3. ССЗ виділена смуга частот $F = 40$ МГц. Розмір кластера становить $C = 7$. Необхідно знайти ширину одного радіоканалу Δf , якщо кількість каналів трафіку в стільнику становить $N_{\text{к.тр.}} = 64$, а кількість каналів управління – $N_{\text{к.упр.}} = 4$.

4. Знайти кількість каналів управління в стільнику, якщо 10% смуги частот, що дорівнює $F = 50$ МГц, складають канали трафіку. Розмір кластеру $C = 12$, а ширина одного радіоканалу $\Delta f = 25$ кГц.

5. Смуга частот $F = 24$ МГц виділена під систему стільникового зв'язку. Система використовує два симплексних канали $\Delta f = 30$ кГц, щоб забезпечити повний дуплексний голосовий зв'язок і контроль каналів. Нехай кожний користувач системи генерує $A_u = 0,1$ Ерл трафіку.

а) Знайти кількість каналів в кожному стільнику, якщо величина кластеру $C = 4$;

б) Якщо кількість абонентів, що знаходиться в кожному стільнику становитиме 90% від ідеального планування, знайти максимальну кількість користувачів, які можуть бути підключені до стільника з ненаправленою антеною на кожній базовій станції;

в) Яка ймовірність блокування системи в п. б), якщо зв'язком користується максимальна кількість користувачів?

г) Якщо кожний новий стільник в даний час використовує секторизацію 120° , визначити загальну кількість нових користувачів, які можуть обслуговуватися в стільнику з тією ж імовірністю блокування що і в п. в).

д) Кожний стільник охоплює площу $S = 5 \text{ км}^2$. Скільки абонентів може обслуговуватись в місті, розміри якого $50 \text{ км} \times 50 \text{ км}$, у випадку використання ненаправленої антени на базовій станції?

6. Для системи з кількістю каналів $N = 7$ та ймовірністю блокування $P_{\text{бл}} = 1\%$ середня тривалість розмови складає $H = 2$ хвилини. Знайти втрати пропускної здатності для системи з 57 каналів у випадку переходу від ненаправленої антени до 60° секторних антен. (Припустимо, що заблоковані дзвінки не враховуються, а середня кількість викликів на одного користувача складає $\lambda = 1$ виклик/год.)

7. Територія покрита стільниковою системою радіозв'язку з кількістю стільників $N_{\text{ст}} = 84$ і розміром кластера C . Для системи доступні $N = 300$ голосових каналів. Користувачі рівномірно розподілені по області покриття. Трафік на одного користувача становить $A_u = 0,04$ Ерл. Припустимо, що заблоковані виклики не враховуються, а ймовірність блокування $P_{\text{бл}} = 1\%$.

а) Знайти максимальний трафік у стільнику, якщо розмір кластера $C = 4, 7$ і 12 .

б) Знайти максимальну кількість користувачів, які можуть обслуговуватися системою з ймовірністю блокування $P_{\text{бл}} = 1\%$ і розміром кластера $C = 4, 7$ і 12 .

8. Вправи на формули Ерланга:

а) знайти максимальну ємність системи (усього і в кожному окремому каналі) в Ерл при ймовірності блокування $P_{\text{бл}} = 2\%$ для 4, 20 та 40 каналів;

б) скільки користувачів можуть обслуговуватись системою при використанні 40 каналів з ймовірністю блокування $P_{\text{бл}} = 2\%$? Нехай середня

тривалість виклику $H = 105$ с, а середня кількість викликів за годину $\lambda = 1$ виклик / год;

в) використовуючи розрахунки інтенсивності трафіку в п. а), обчислити рівень обслуговування в системі з ймовірністю затримки викликів у випадку затримки більше ніж на $t_{\text{затр}} = 20$ с. Якщо $H = 105$ с, визначити GOS для 4, 20 та 40 каналів;

г) порівнюючи результати п. а) та в), визначити, яка система функціонує краще – система з 20 с. затримкою викликів чи система з блокуванням викликів?

РОЗДІЛ 2. ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ В МЕРЕЖАХ РУХОМОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Моделі поширення хвиль в діапазонах ДВЧ і УВЧ

Характер зменшення потужності радіосигналу під час віддалення від БС показаний на рис. 2.1.

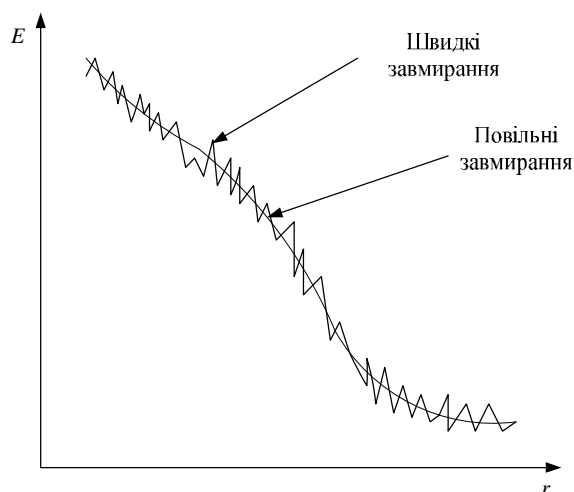


Рисунок 2.1- Швидкі та повільні завмирання

Для оцінки напруженості поля в певній точці можуть використовуватись криві поширення (рис. 2.2).

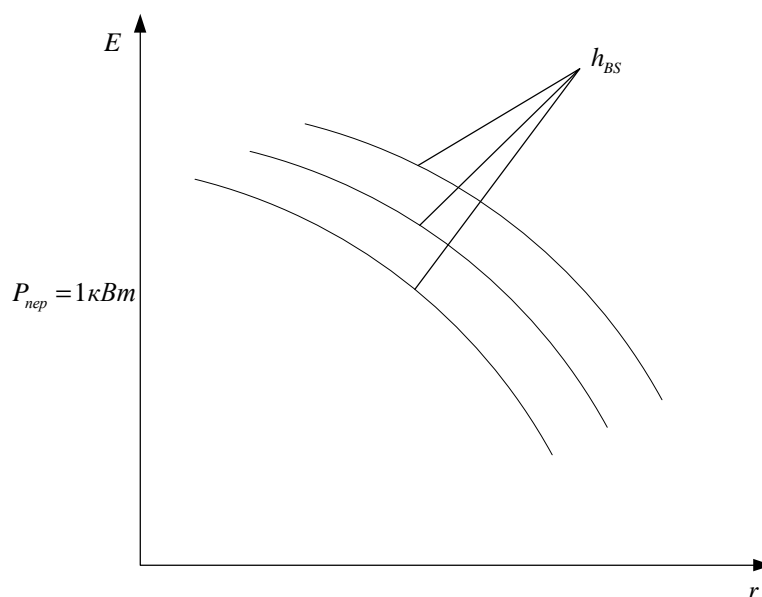


Рисунок 2.2 – Криві поширення

З іншого боку часто потрібно знати величину втрат, яких зазнають радіохвилі під час проходження через канали зв'язку. Для оцінки величини втрат в ССЗ (системі стільникового зв'язку) можуть використовувати такі моделі поширення хвиль:

- модель Окамури;
- модель Хата;
- модель COST-231 Хата;
- модель Уолфіша-Ікегамі.

Модель Окамури

Японський вчений Окамура провів практичні вимірювання значень напруженості електричного поля та втрат сигналу для систем безпроводового зв'язку в умовах міста Токіо. Ці результати були представлені у вигляді графіків, які отримали назви кривих Окамури.

Діапазон частот: 100...1920 МГц, відстань: 1...100 км, втрати:

$$L_{50} = L_F + A_{mu}(f, r) - G(h_{BS}) - G(h_{MS}) - G_{AREA},$$

де L_{50} – медіанне значення втрат;

L_F – втрати і вільному просторі;

$A_{mu}(f, r)$ – медіанне загасання відносно вільного простору;

$G(h_{BS})$ – коефіцієнт корекції висоти БС;

$G(h_{MS})$ – коефіцієнт корекції висоти МС;

G_{AREA} – коефіцієнт корекції, який враховує тип середовища.

Параметри $A_{mu}(f, r)$, G_{AREA} можна визначити за допомогою кривих Окамури, а коефіцієнти корекції – за такими виразами:

$$G(h_{BS}) = 20 \lg \left(\frac{h_{BS}}{200} \right), h_{BS} \in (30 \dots 1000) \text{ м.}$$

$$G(h_{MS}) = 10 \lg \left(\frac{h_{MS}}{3} \right), h_{MS} \leq 3 \text{ м.}$$

$$G(h_{MS}) = 20 \lg \left(\frac{h_{MS}}{3} \right), h_{MS} \in (3 \dots 10) \text{ м.}$$

Модель Хата

Інший японський вчений Хата провів екстраполяцію результатів дослідження Окамури, результатом яких став аналітичний вигляд, що описує криві Окамури (криві поширення).

Діапазон частот: 150...1500 МГц; відстань: 1...100 км.

Для даної моделі втрати на поширення радіохвиль для міста описують наступним співвідношенням:

$$L_{50/\text{місто}} = 69,55 + 26,16 \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 13,83 \lg(h_{BS}) - a(h_{MS}) + (44,9 - 6,55 \lg(h_{BS})) \cdot \lg(r_{[\text{км}]}) \text{ [дБ]},$$

де $a(h_{MS})$ – поправочний коефіцієнт; висоти МС та БС вказують в метрах.

Для малого та середнього міста $a(h_{MS})$:

$$a(h_{MS}) = (1,11 \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 0,7) \cdot h_{MS} - (1,56 \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 0,8) \text{ [дБ]}.$$

Для великого міста:

$$f < 300 \text{ МГц} \quad a(h_{MS}) = 8,29 \cdot (\lg(1,54 \cdot h_{MS}))^2 - 1,1 \text{ [дБ]},$$

$$f > 300 \text{ МГц} \quad a(h_{MS}) = 3,2 \cdot (\lg(11,75 \cdot h_{MS}))^2 - 4,97 \text{ [дБ]}.$$

Втрати в передмісті:

$$L_{50/\text{передмістя}} = L_{50/\text{місто}} - 2 \left(\lg \left(\frac{f_{[\text{МГц}]}}{28} \right) \right)^2 - 5,4 \text{ [дБ]}.$$

Втрати в сільській місцевості:

$$L_{50/\text{село}} = L_{50/\text{місто}} - 4,78 \cdot (\lg(f_{[\text{МГц}]}))^2 + 18,33 \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 40,94 \text{ [дБ]}.$$

Модель Хата підходить для оцінки втрат в ССЗ з великим розміром стільників: $R > 1$ км.

Модель COST-231 Хата

Діапазон частот: 1.5...2 ГГц; відстань: 1...20 км; висота підвісу антени БС: 30...200 м.

Для даної моделі втрати на поширення радіохвиль для міста описуються наступним співвідношенням:

$$L_{50/\text{місто}} = 46,3 + 33,9 \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 13,82 \lg(h_{BS[\text{М}]}) - a(h_{MS[\text{М}]}) + \\ +(44,9 - 6,55 \lg(h_{BS})) \cdot \lg(r_{[\text{км}]}) + C_M \text{ [дБ]}.$$

Висоти МС та БС в формулі, що наведена вище вказуються в метрах.

$$C_M = \begin{cases} 0 \text{ дБ, для середніх міст та передмість;} \\ 3 \text{ дБ, для центрів міст.} \end{cases}$$

Модель Уолфіша-Ікегамі

Для оцінки втрат у мікростільниках ($R \in (100 \text{ м} \dots 1 \text{ км})$), де потрібно враховувати дифракційні процеси, які мають місце при відбитті від різних частин будівель, використовують модель Уолфіша-Ікегамі:

$$L = L_0 + L_{rts} + L_{ms},$$

де L_0 – втрати у вільному просторі;

L_{rts} – втрати через дифракцію та розсіювання від дахів;

L_{ms} – багаторазова дифракція від рядів будівель.

2.2 Швидкі завмирання в каналах зв'язку

Повільні завмирання відображають середнє послаблення потужності сигналу внаслідок поширення на великі відстані.

Швидкі завмирання – це значні зміни амплітуди і фази сигналу, що є результатом невеликих змін відстані між передавачем та приймачем. Швидкі завмирання проявляються двома способами: розширенням сигналу в часі, нестационарною поведінкою каналу.

В мобільному зв'язку параметри каналу змінюються в часі, оскільки рух передавача та приймача призводить до зміни шляху поширення. Швидкі завмирання називають релесєвськими, якщо має місце велика кількість відбитих

променів (шляхів) і немає компоненти сигналу вздовж лінії прямої видимості. Тоді огиначна такого сигналу статистично описується за допомогою релеевського закону:

$$p(r_0) = \begin{cases} \frac{r_0}{S^2} e^{-\frac{r_0^2}{2S^2}}, & r_0 \geq 0; \\ 0, & \text{для інших } r_0 \end{cases},$$

де r_0 – значення прийнятого сигналу;

S – середня потужність багатопроменевого сигналу.

Якщо переважає незавмираюча компонента сигналу вздовж лінії прямої видимості, то огиначна швидкого завмирання описується функцією Рейса:

$$p(r_0) = \begin{cases} \frac{r_0}{S^2} e^{-\frac{r_0^2 + A^2}{2S^2}} I_0\left(\frac{r_0 A}{S^2}\right), & r_0 \geq 0 \\ 0, & \text{для інших } r_0 \end{cases}$$

де A – максимальне значення незавмираючої компоненти сигналу;

I_0 – функція Бесселя 1-го роду нульового порядку.

Вираз для значення сигналу, що пройшов через канал з швидким завмиранням:

$$r(t) = \sum_n a_n(t) S(t - t_n(t)).$$

де $r(t)$ – прийнятий багатопроменевий сигнал;

$a_n(t)$ – змінний множник;

$t_n(t)$ – змінна затримка поширення;

n – кількість шляхів поширення.

Розглянемо параметри каналу передавання зі швидкими завмираннями.

1. Величина затримки t_n .

Характер затримки поширення відбитих сигналів описують так званими профілями затримки. Існує три типових профілі затримки в залежності від типу місцевості (рис. 2.3).

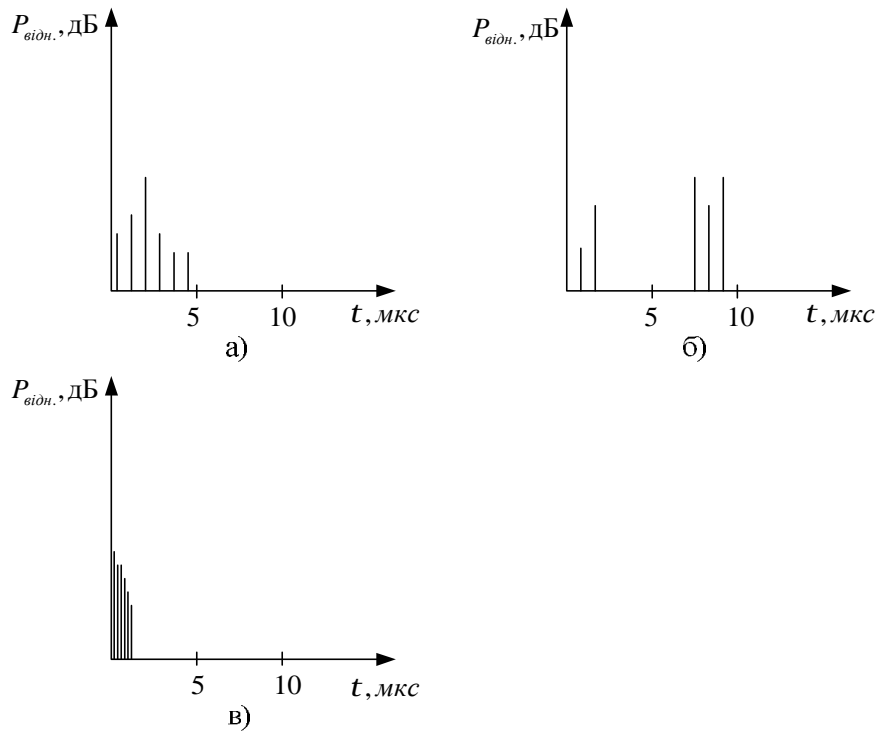


Рисунок 2.3 – Значення затримки t_n в залежності від типу місцевості:

а) місто; б) горбиста місцевість; в) сільська місцевість

2. Смуга когерентності f_0 .

Смуга когерентності є статистичною мірою діапазону частот, в якому канал пропускає всі спектральні компоненти з приблизно однаковим коефіцієнтом підсилення та лінійною зміною фази. Обчислюється згідно з виразом:

- коли передаточна функція каналу має кореляцію 0,9, тоді:

$$f_{0,9} = \frac{1}{50s_t},$$

- коли передаточна функція каналу має кореляцію 0,5, тоді:

$$f_{0,5} = \frac{1}{5s_t},$$

де s_t – середньоквадратичний розкид затримок.

Вираз для знаходження середньоквадратичного розкиду затримок:

$$S_t = \sqrt{t^2 - (\bar{t})^2}$$

де \bar{t} – середня затримка.

Якщо $f_0 > \Delta f$ (ширини смуги сигналу), то канал вносить амплітудне погіршення характеристик сигналу (рис. 2.4, б).

Якщо $f_0 < \Delta f$, мають місце частотно-селективні завмирання сигналу (2.4, а).

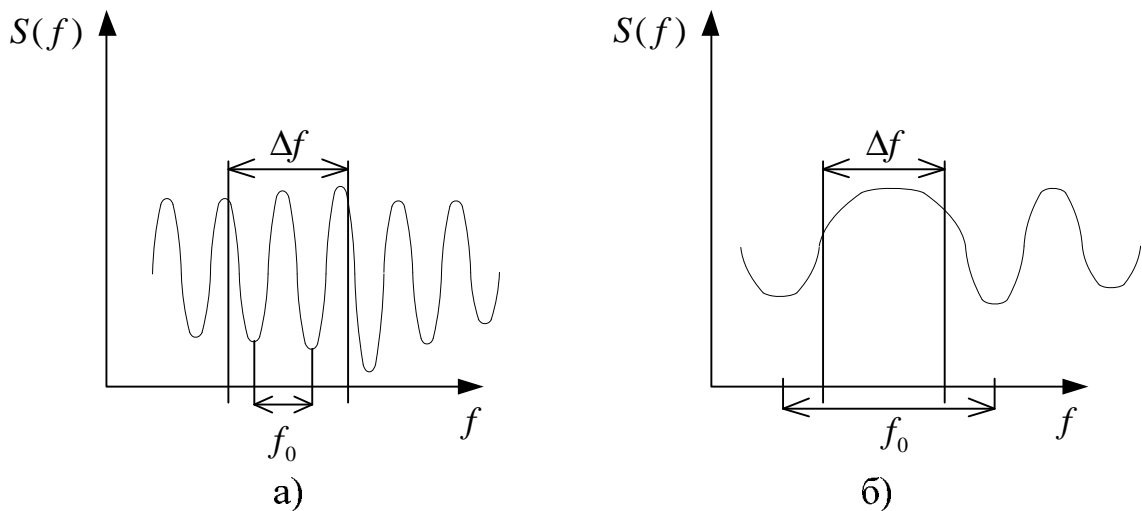


Рисунок 2.4 – Спектри сигналів: а) коли $f_0 < \Delta f$, б) коли $f_0 > \Delta f$

3. Допплерівський зсув за частотою f_d (розширення сигналу), який обчислюють за виразом:

$$f_d = \frac{v}{l} \cos q,$$

де v – швидкість переміщення приймача.

Допплерівський спектр:

$$s(f) = \frac{1}{P f_d \sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_d} \right)^2}}.$$

де f_d – доплерівський зсув;

f_c – частота носійного коливання.

4. Час когерентності T_0 .

Час когерентності визначає швидкість завмирання в каналі:

$$T_0 \approx \frac{1}{f_d} \rightarrow T_{0,5} = \frac{9}{16f_d}; T_{0,9} = \frac{0,423}{f_d}.$$

Якщо $T_0 < T_s$ – канал вносить швидкі завмирання; якщо $T_0 > T_s$ – канал вносить повільні завмирання, де T_s – тривалість символу даних.

■ Приклад 2.1

Мобільна станція рухається зі швидкістю 96 км/год. та працює на частоті 900 МГц. Внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль утворюється прямий та відбитий промені, які характеризуються профілем затримок (рис. 2.5).

Знайти:

- 1) середньоквадратичний розкид затримок s_t ;
- 2) смугу частот Δf , за якої не потрібен еквалайзер;
- 3) визначити, яка з систем зв'язку за даних умов задачі потребує використання еквалайзера (ADC (D-AMPS), GSM, cdmaOne);
- 4) загальну затримку, що вноситься пристроєм перемешування.

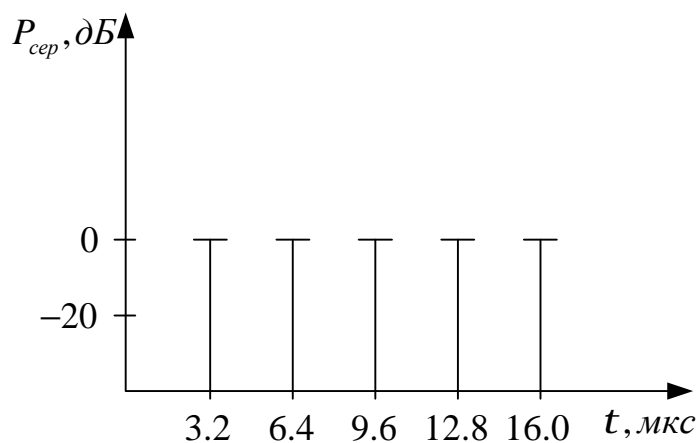


Рисунок 2.5 – Профіль затримок

Розв'язання

- 1) Визначимо середньоквадратичний розкид затримок:

$$s_t = \sqrt{t^2 - (\bar{t})^2}.$$

Для цього необхідно розрахувати середню затримку:

$$\bar{t} = \frac{\sum_k s(t_k) t_k}{\sum_k s(t_k)},$$

$$\bar{t} = \frac{1 \cdot 0 + 1 \cdot 3,2 + 1 \cdot 6,4 + 1 \cdot 9,6 + 1 \cdot 12,8 + 1 \cdot 16}{1 + 1 + 1 + 1 + 1} = 8 \text{ мкс},$$

$$\overline{t^2} = \frac{\sum_k s(t_k) t_k^2}{\sum_k s(t_k)} = \frac{3,2^2 + 6,4^2 + 9,6^2 + 12,8^2 + 16^2}{1 + 1 + 1 + 1 + 1} = 93,87 \text{ мкс}^2.$$

Тоді:

$$s_t = \sqrt{93,87 - 64} = 5,5 \text{ мкс}.$$

2) Розрахуємо смугу частот $\Delta f_{\text{доп}}$, за якої не потрібен еквалайзер. Оскільки еквалайзер використовують для компенсації частотно-селективних завмирань, то допустима смуга частот, за якої ще не потрібен цей пристрій, визначатиметься смугою когерентності каналу:

$$f_0 \geq \Delta f_{\text{доп}} \Rightarrow \Delta f_{\text{доп}} = f_{0,5} = \frac{1}{5s_t} = \frac{1}{5 \cdot 5,5} = 36,4 \text{ кГц}.$$

3) Ширина смуги частот радіоканалу:

- для системи AMPS: 30 кГц;
- для системи GSM: 200 кГц;
- для системи cdmaOne: 1,25 МГц.

Тоді:

$\Delta f_{\text{ADC}} < \Delta f_{\text{доп}}$ – еквалайзер не потрібен,

$\Delta f_{\text{GSM}} > \Delta f_{\text{доп}}$ – еквалайзер потрібен,

$\Delta f_{\text{cdmaOne}} > \Delta f_{\text{доп}}$ – еквалайзер потрібен (теоретично, але не

використовується через розширення спектру).

4) Визначимо загальну затримку, що вноситься пристроєм перемежування.

$$\frac{T'_{iL}}{T_0} = 10.$$

Допплерівський зсув:

$$f_d = \frac{v_{MS}}{I} = \frac{v_{MS}}{c} = \frac{96 \cdot 1000}{3 \cdot 10^8} \approx 80 \text{ Гц}.$$

Час когерентності:

$$T_0 = \frac{0,5}{f_d} = \frac{0,5}{80} = 6,3 \text{ мс}.$$

Інтервал перемежування:

$$T'_{iL} = 10T_0 = 10 \cdot 6,3 = 63 \text{ мс}.$$

Загальна затримка :

$$T_{\text{затр.пер}} + T_{\text{затр.прийм}} = T_{\text{заг}}.$$

$$T_{\text{заг}} = 2T'_{iL} = 2 \cdot 63 = 126 \text{ мс}.$$

Відповідь: $s_t = 5,5 \text{ мкс}$; $\Delta f_{\text{доп}} = 36,4 \text{ кГц}$; $T_{\text{заг}} = 126 \text{ мс}$. Для ADC – еквалайзер не потрібен, а для GSM та cdmaOne потрібен. ■

■ Приклад 2.2

Мобільна станція рухається зі швидкістю 60 км/год. та працює на частоті 1850 МГц. Визначити доплерівський зсув для випадків, зображених на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Розташування МС відносно БС

Розв'язання

Допплерівський зсув за частотою:

$$f_d = \left| \frac{v_{MS}}{l} \cos q \right| = \left| \frac{v_{MS} \cdot f_c}{c} \cos q \right|.$$

В першому випадку:

$$q_1 = 0^\circ \text{ і } f_d = \frac{\frac{60}{3,6} \cdot 1850 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \cdot \cos 0^\circ = 102,78 \text{ Гц.}$$

В другому випадку:

$$q_1 = 180^\circ \text{ і } f_d = \frac{\frac{60}{3,6} \cdot 1850 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \cdot \cos 180^\circ = -102,78 \text{ Гц.}$$

І для третього випадку:

$$q_1 = 90^\circ \text{ і } f_d = \frac{\frac{60}{3,6} \cdot 1850 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \cdot \cos 90^\circ = 0 \text{ Гц.}$$

Відповідь: для перших двох випадків $|f_d| = 102,78 \text{ Гц}$, а для третього $f_d = 0 \text{ Гц}$. ■

2.3 Способи боротьби з швидкими завмираннями сигналів

Для боротьби з швидкими завмираннями використовують такі основні методи:

- метод рознесеного приймання сигналів;
- стрибки за частотою;
- використання еквалайзеру.

1. Рознесене приймання.

Полягає в спільному використанні декількох сигналів, рознесених (що відрізняються) за будь-яким параметром. При чому рознесення повинно

обиратися таким чином, щоб імовірність одночасних завмирань всіх сигналів, що використовуються, була набагато меншою ніж імовірність завмирання будь-якого окремого сигналу.

Можливі п'ять варіантів рознесеного приймання:

1) Рознесення в часі – використовують сигнали, зсунуті в часі один відносно одного. Дуже легко реалізувати, проте лише в цифровій формі і на шкоду пропускну здатності.

2) Рознесення за частотою – використовують сигнали, що передаються на різних частотах.

3) Рознесення за напрямком або кутом – виконується на декілька антен з діаграмами направленості, які не повністю перекриваються.

4) Рознесення за поляризацією – направлені дві антени приймають сигнали з двома взаємно ортогональними поляризаціями.

5) Рознесення в просторі – забезпечується шляхом приймання сигналів на декілька просторово-рознесених антен.

Об'єднання сигналів з використанням двох антен можливе:

- шляхом використання одного більш сильного з двох сигналів;
- шляхом детекторного когерентного підсилювання двох сигналів;
- шляхом післядетекторного підсилювання сигналів зі зваженими коефіцієнтами.

2. Стрибки за частотою.

Носійна частота сигналу періодично змінюється. У випадку достатньо частих змін частоти суттєво знижується імовірність тривалих завмирань та групових помилок.

Розрізняють повільні та швидкі стрибки за частотою.

Повільні стрибки: період зміни частоти набагато більше тривалості символу повідомлення.

Швидкі стрибки: період зміни частоти набагато менше тривалості символу повідомлення.

3. Використання еквалайзера.

Сенс полягає в компенсації тієї різниці ходу між складовими променів під час багатопроменевого поширення, яка призводить до міжсимвольної інтерференції.

Еквалайзер – це фактично адаптивний фільтр, що налаштовується таким чином, щоб сигнал на виході був якомога більше очищений від міжсимвольних спотворень, що є у вхідному сигналі.

Задачі для самостійного розв'язання

1. Розрахувати середнє значення затримки, середньоквадратичний розкид затримок та оцінити смугу когерентності каналу за рівнем 0,5 для профілю затримок, наведеного на рис. 2.7. Чи буде цей канал підходити для надання послуг системами AMPS або GSM без застосування еквалайзера?

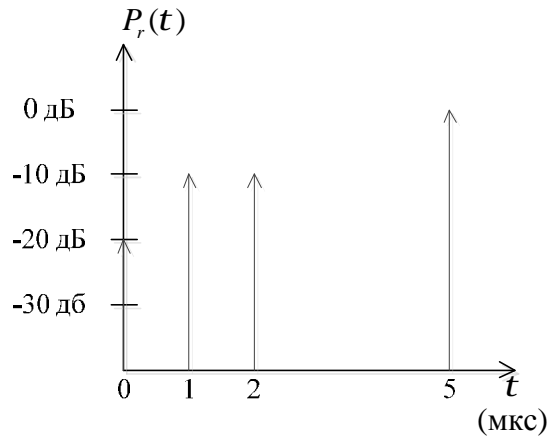


Рисунок 2.7 – Профіль затримки

2. Обчислити максимальну швидкість мобільної станції у випадку сигналу з релєвськими завмираннями, для якого максимальний доплєрівський зсув складає 2 Гц, якщо носійна частота сигналу становить 900 МГц?

3. Якщо певна модуляція забезпечує значення BER, при якому $S/T_s \leq 0,1$, визначити мінімальний період символу (тобто максимальну символну швидкість), який можна відправити через радіоканали, показані на рис. 2.8, без використання еквалайзера.

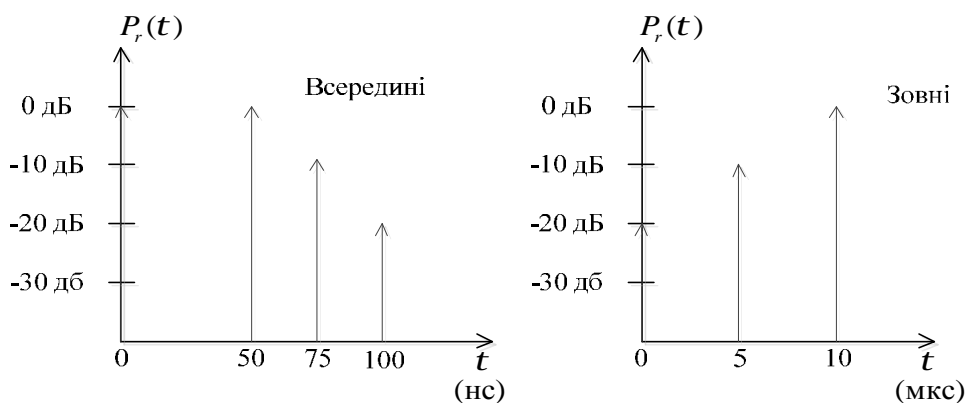


Рисунок 2.8 – Профілі затримок двох каналів

4. Для профілів затримки на рис. 2.9 оцінити смугу кореляції на рівні 0,9 і 0,5.

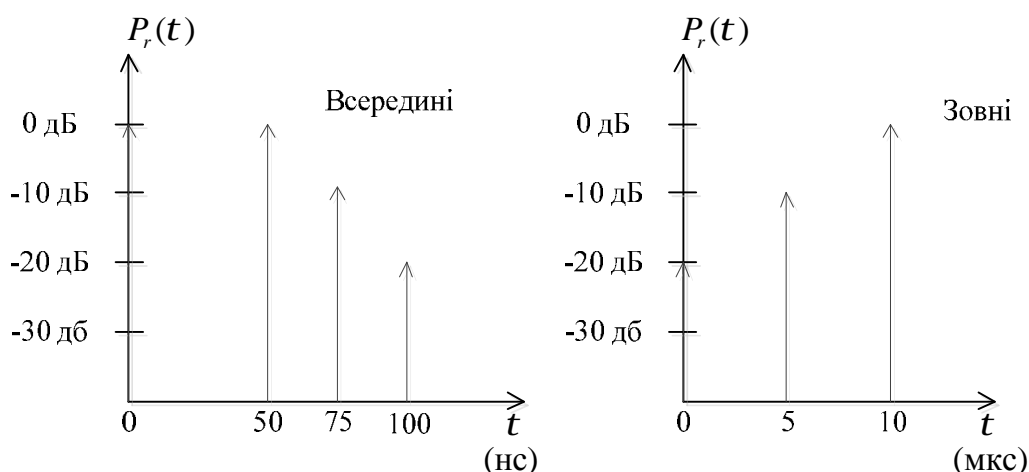


Рисунок 2.9 – Профілі затримок двох каналів

5. Для наведених цифрових безпроводових систем оцінити максимальний середньоквадратичний розквіт затримок, для якого непотрібен еквалайзер в приймачі:

Системи	Швидкість передавання даних в системі	Модуляція
USDC	48,6 кбіт/с	$\pi/4$ DQPSK
GSM	270,833 кбіт/с	GMSK
DECT	1152 кбіт/с	GMSK

6. Локальний просторовий усереднений профіль затримок показаний на рис. 2.10.

1) Визначити середньоквадратичний розкид затримок та середню затримку для каналу.

2) Якщо в каналі використовується модуляція, яка потребує використання еквалайзера за умови тривалості символу T менше, ніж $10S_t$, визначити максимальну швидкість передавання в каналі, яка може підтримуватись без використання еквалайзера.

3) Якщо мобільна станція, що рухається зі швидкістю 30 км/год., приймає сигнал через канал, що характеризується профілем затримок,

наведеним на рис. 2.10, визначити час, за який канал вважатиметься стаціонарним (або висококорельованим).

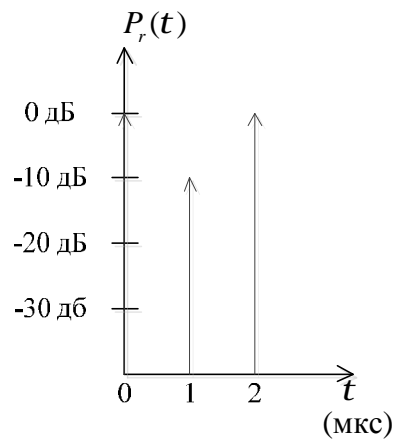


Рисунок 2.10 – Профіль затримки

7. Розрахувати допустиме затухання радіосигналу та граничну дальність впевненого приймання радіосигналу у великому місті (радіус стільника) за заданими згідно варіанту параметрами базової та абонентської станції. Розрахунок провести для трьох значень висоти розташування АС: $h_{МС} = 1, 3, 10$ м.

Варіант	Система	клас БС	$h_{БС}[м]$	$P_{АНТ.БС},$ дБ	$G_{МС}, G_{БС},$ дБ	клас АС
1	GSM-900	1	50	8	-100	5
2	GSM-900	3	40	10	-80	4
3	GSM-900	5	30	12	-60	3
4	GSM-90	6	20	14	-40	2
5	GSM-900	8	50	6	-20	1
6	GSM-900	M1	40	8	-100	5
7	GSM-900	M2	30	10	-80	4
8	GSM-900	M3	20	12	-60	3
9	DCS-1800	1	50	14	-40	2
10	DCS-1800	2	40	6	-20	1
11	DCS-1800	3	30	8	-100	2
12	DCS-1800	4	20	10	-80	1
13	DCS-1800	M1	50	12	-60	2
14	DCS-1800	M2	40	14	-40	1
15	DCS-1800	M3	30	6	-20	2
16	DCS-1800	1	20	8	-100	1

РОЗДІЛ 3. МОДУЛЯЦІЯ, КАНАЛЬНЕ КОДУВАННЯ ТА РОЗШИРЕННЯ СПЕКТРУ В СИСТЕМАХ РУХОМОГО ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Модуляція в системах рухомого зв'язку

У сучасних системах рухомого зв'язку використовують методи цифрової модуляції, в яких, на відміну від аналогових методів, параметри носійного коливання змінюються дискретно.

Розрізняють такі методи цифрової модуляції:

1. ASK (амплітудна маніпуляція) – не використовується через слабку завадостійкість.
2. FSK (частотна маніпуляція).
3. PSK (фазова маніпуляція).
4. APSK (амплітудно-фазова маніпуляція) та QAM (квадратурна амплітудна модуляція).

Модульований сигнал може бути представлений в трьох формах:

- аналітичній (у вигляді виразу);
- сигнальній (у вигляді графіку функції, осцилограми);
- векторній.

Векторне представлення – це представлення на комплексній площині комплексної обвідної, яке показує положення вектора амплітуди обвідної в поточний момент часу (рис. 3.1):

$$S_i(t) = A_i e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}.$$

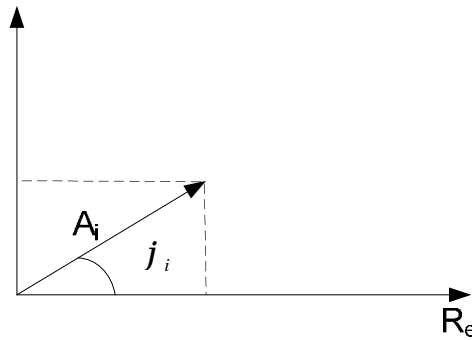


Рисунок 3.1 – Положення вектора амплітуди обвідної

Передавач цифрової системи передавання формує i передає по черзі в канал кінцеве число сигналів $S_m(t)$, де $m = 1, \dots, M$. Такі сигнали називають *модуляційними* символами. Якщо один такий символ переносить k біт інформації, то кількість сигналів, які буде формувати передавач, $M = 2^k$. Така модуляція називається M -арною або *багатопозиційною* модуляцією.

M-PSK

При такому методі модуляції дискретно змінюється фаза носійного коливання:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T_s}} \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_i(t)), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad i = 1, \dots, M,$$

де E – енергія символу;

T_s – тривалість символу;

ω_0 – частота носійного коливання;

$\varphi_i(t)$ – дискретне значення фази носійного коливання:

$$\varphi_i(t) = \frac{2\pi i}{M},$$

де M – кількість дискретних значень, які приймає фаза (рис. 3.2).

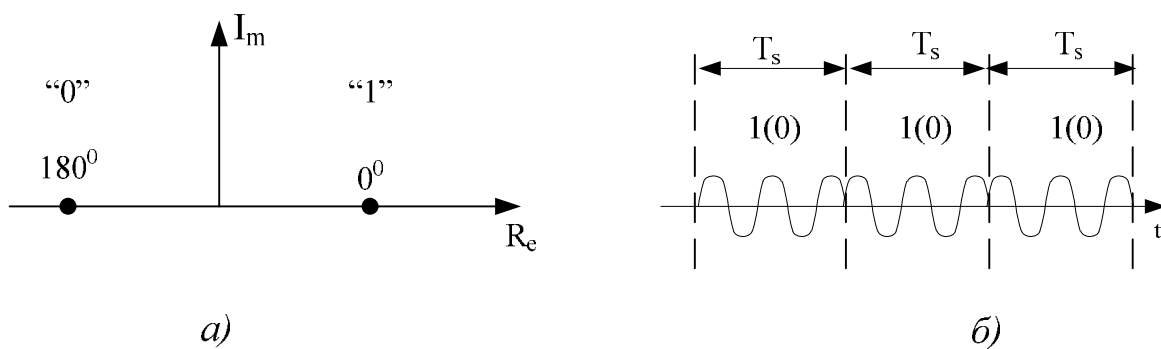


Рисунок 3.2 – Векторне (а) та сигнальне (б) представлення сигналу PSK з $M = 2$

M-FSK

При такому методі модуляції дискретно змінюється частота носійного коливання:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T_s}} \cos(\omega_i t + j), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad i = 1, \dots, M,$$

де ω_i – носійне коливання, яке може приймати M дискретних значень. Кожен з M символів передається за допомогою власної частоти (рис.3.3).

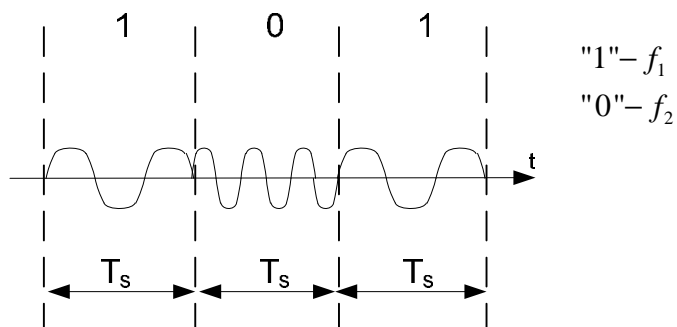


Рисунок 3.3 – Представлення FSK сигналу на часовій осі ($M = 2$)

M-ASK

При такому методі модуляції дискретно змінюється амплітуда носійного коливання:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T_s}} \cos(\omega_0 t + j), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad i = 1, \dots, M.$$

Маємо M дискретних значень амплітуди (рис. 3.4).

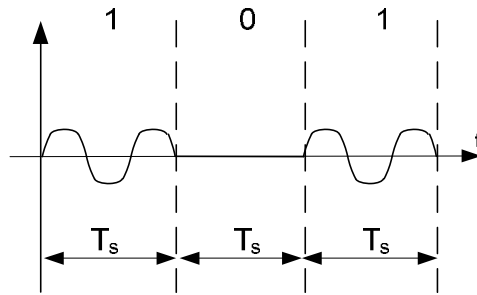


Рисунок 3.4 – Представлення сигналу ASK на часовій осі ($M = 2$)

M-APSK

APSK – комбінація схем амплітудної та фазової модуляції, при якій дискретно змінюється амплітуда і фаза носійного коливання (рис. 3.5-3.6).

Аналітичний вираз, який описує цю модуляцію, має вигляд:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T_s}} \cos(\omega_0 t + j_i(t)), \quad 0 \leq t \leq T_s, \quad i = 1, \dots, M.$$

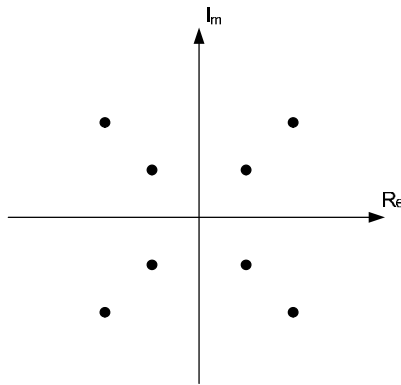


Рисунок 3.5 – Сигнальне сузір'я для $M = 8$

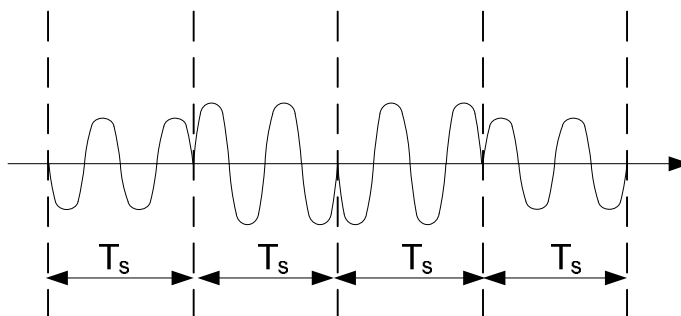


Рисунок 3.6 – Представлення сигналу на часовій осі

■ Приклад 3.1

Система рухомого зв'язку здійснює передавання даних зі швидкістю $R = 4800$ біт/с. Визначити кількість позицій модулюючого сигналу (порядок модуляції M), якщо система використовує фазову маніпуляцію M-PSK при виділеній смузі частот $\Delta F_{\text{зад}} = 3$ кГц.

Розв'язання

У випадку M-PSK модуляції:

$$R_s = \frac{R}{\log_2 M},$$

$$\Delta F = R_s = \frac{R}{\log_2 M}.$$

Побудуємо таблицю та виберемо з неї параметр M , як показано нижче (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Залежність параметрів R , R_s , ΔF від порядку модуляції M

M	R , біт/с	R_s , симв/с	ΔF , Гц
2	4800	4800	4800
4	4800	2400	2400
8	4800	1600	1600
16	4800	1200	1200
32	4800	960	960

Значення M вибираємо з умови:

$$\begin{cases} \Delta F \leq \Delta F_{\text{зад}}, \\ M \rightarrow \min. \end{cases}$$

Як видно з таблиці, $M = 4$, що відповідає модуляції 4-PSK.

Відповідь: $M = 4$. ■

3.2 Завадостійкість та спектр цифрових методів модуляції

Завадостійкість методів модуляції визначають залежностями виду:

$$P_B = f\left(\frac{E_B}{N_0}\right), P_S = f\left(\frac{E_S}{N_0}\right),$$

де P_B – ймовірність появи помилкового біту;

$\frac{E_b}{N_0}$ – відношення енергії біта до спектральної щільності потужності шуму;

P_S – ймовірність появи помилкового символу;

$\frac{E_s}{N_0}$ – відношення енергії символу до спектральної щільності потужності шуму.

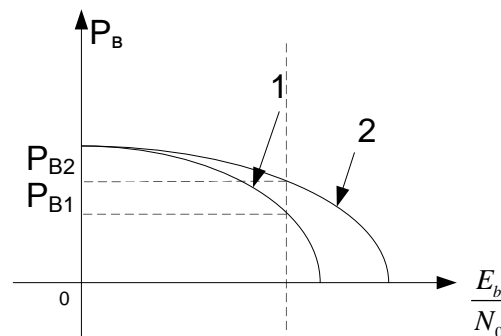


Рисунок 3.7 – Залежність появи помилкового символу

Модуляція 1 має вищу завадостійкість, оскільки характеризується меншим значенням P_B при одному й тому ж значенні $\frac{E_b}{N_0}$.

BPSK (бінарна фазова маніпуляція)

$$M = 2$$

Спектр обвідної сигналу:

$$S(f)_{BPSK} = \frac{E_b}{2} \left[\left(\frac{\sin p(f - f_0)T_b}{p(f - f_0)T_b} \right)^2 + \left(\frac{\sin p(f + f_0)T_b}{p(f + f_0)T_b} \right)^2 \right],$$

де f_0 – частота носійного коливання;

T_b – тривалість одного інформаційного біта;

$R_b = \frac{1}{T_b}$ – швидкість передавання бітів даних.

Завадостійкість для BPSK визначають з виразу $P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$,

де Q – інтеграл помилки:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du.$$

QPSK (квадратурна фазова маніпуляція)

$$M = 4$$

Спектр обвідної сигналу:

$$S(f)_{QPSK} = \frac{E_s}{2} \left[\left(\frac{\sin p(f - f_0)T_s}{p(f - f_0)T_s} \right)^2 + \left(\frac{\sin p(f + f_0)T_s}{p(f + f_0)T_s} \right)^2 \right],$$

де f_0 – частота носійного коливання;

T_s – тривалість модуляційного символу;

$R_s = \frac{1}{T_s}$ – швидкість передавання символів;

$$T_s = T_b \cdot \log_2 M; \quad R_s = \frac{R_b}{\log_2 M}.$$

Ширина спектру BPSK сигналу вдвічі більша від ширини спектру QPSK сигналу (рис. 3.8):

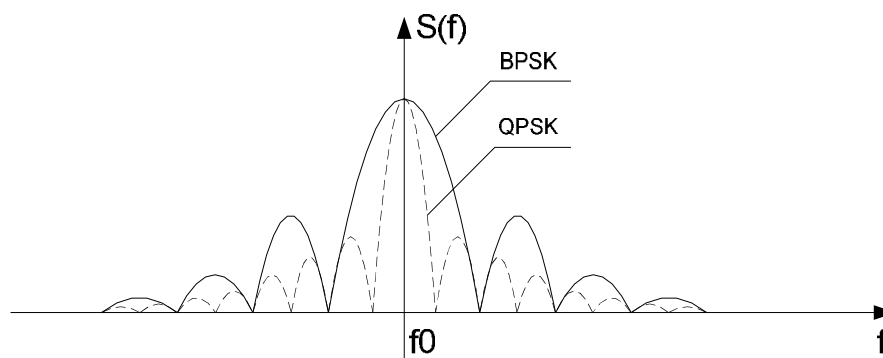


Рисунок 3.8 – Спектри сигналів: BPSK, QPSK

Завадостійкість QPSK модуляції визначають аналогічно BPSK модуляції.

MSK (мінімальна частотна маніпуляція)

Особливості модуляції:

- 1) характерна зміна фази лише на 90° ;
- 2) кореляція між двома сусідніми символами є мінімальною (визначає різницю між частотою передавання 1 і 0):

$$\Delta f = f_1 - f_0 = f_0 + \frac{1}{4T_b} - f_0 + \frac{1}{4T_b} = \frac{1}{2T_b} = \frac{R_b}{2}.$$

Спектр обвідної:

$$S(f)_{MSK} = \frac{16}{P^2} \left(\frac{\cos 2p(f + f_0)T_b}{1,16(f + f_0)^2 T_b^2} \right)^2 + \frac{16}{P^2} \left(\frac{\cos 2p(f - f_0)T_b}{1,16(f - f_0)^2 T_b^2} \right)^2.$$

GMSK (гаусівська MSK)

До особливостей GMSK відносять те, що перед подаванням на модулятор потік даних проходить через гаусівський фільтр НЧ з характеристикою виду:

$$H(f) = e^{-a^2 f^2},$$

де $a = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{2B}}$ (В – база сигналу); $a = \frac{0,5887}{B}$.

Тоді спектр GMSK сигналу:

$$S(f)_{GMSK} = S(f)_{MSK} \cdot H(f).$$

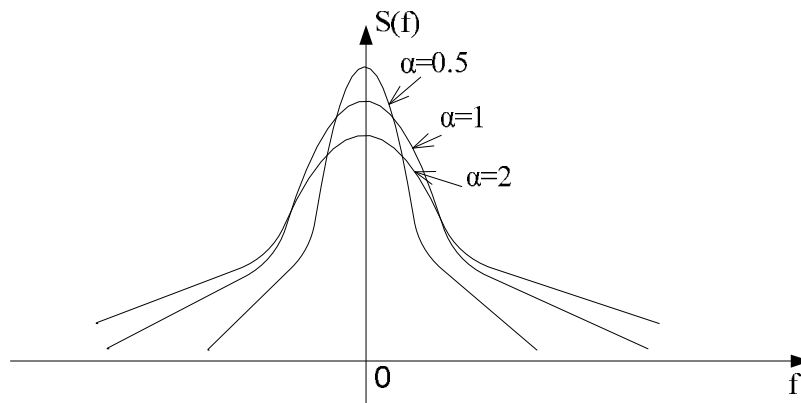


Рисунок 3.9 – Амплітудно-частотна характеристика фільтра Гауса

Завадостійкість MSK модуляції визначають за виразом:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2gE_b}{N_0}}\right),$$

де $g = 0,68$ для GMSK, $B = 0,25$;

$g = 0,85$ для MSK, $B = \infty$.

M-PSK

У загальному випадку завадостійкість PSK модуляції визначають за виразом:

$$P_s = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin\left(\frac{p}{M}\right)\right).$$

Вираз для спектру оригінальної сигналу аналогічний до виразу для спектру QPSK.

M-QAM

Завадостійкість QAM модуляції описується виразом:

$$P_b = \frac{2}{\log_2 \sqrt{M}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot Q \left(\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 \sqrt{M}}{M-1} \right) \cdot \frac{2E_b}{N_0}} \right)$$

Нормований спектр M-QAM сигналу повністю співпадає з нормованим спектром M-PSK сигналу.

M-FSK

Для когерентної M-FSK модуляції:

$$P_b \leq (M-1) \cdot Q \left(\sqrt{\frac{E_b \log_2 M}{N_0}} \right),$$

а ширина смуги частот:

$$\Delta F = \frac{R_b (M+3)}{2 \log_2 M}.$$

Для некогерентної M-FSK модуляції:

$$P_s \leq \frac{M-1}{2} e^{-\frac{E_s}{2N_0}},$$

а ширина смуги частот:

$$\Delta F = \frac{R_b M}{2 \log_2 M}.$$

■ Приклад 3.2

Визначити чи необхідно використовувати канальне кодування в СРЗ, яка забезпечує передавання даних зі швидкістю $R = 9600$ біт/с, у випадку використання 4-FSK модуляції та відношення $\frac{P_r}{N_0} = 52$ дБ, якщо задане значення ймовірності появи помилкового біта для СРЗ становить $P_{в_зад} = 10^{-5}$.

Розв'язання

Необхідність використання канального кодування визначають за умовою:

$$P_b \leq P_{b_зад} \text{ – канальне кодування не потрібне;}$$

$$P_b \geq P_{b_зад} \text{ – треба використовувати канальне кодування.}$$

де P_b – розрахункова ймовірність появи помилкового біта.

Для M-FSK модуляції ймовірність появи помилкового символу:

$$P_s \leq \frac{M-1}{2} e^{-\frac{E_s}{2N_0}},$$

де $\frac{E_s}{N_0}$ – відношення енергії символу до спектральної щільності потужності

шуму:

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{P_r}{N_0} \cdot \frac{1}{R} \log_2 M.$$

Використовуючи два останні вирази, знайдемо P_s . Для M-FSK:

$$P_b = \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} P_s,$$

де $k = \log_2 M$.

Підставивши відповідні значення, отримаємо:

$$\frac{P_r}{N_0} = 52 \text{ дБ} = 158489,3;$$

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{158489,3}{9600} \cdot \log_2 4 = 33,02;$$

$$P_s \leq \frac{3}{2} \cdot e^{-\frac{33,02}{2}} = 0,1014 \cdot 10^{-6};$$

$$k = \log_2 4 = 2;$$

$$P_b = \frac{2^1}{2^2 - 1} \cdot 0,1014 \cdot 10^{-6} = 6,76 \cdot 10^{-8}.$$

Оскільки $P_B < P_{B_зад}$, тому канальне кодування використовувати не потрібно.

Відповідь: канальне кодування не потрібне. ■

■ Приклад 3.3

У скільки разів спектр сигналу з модуляцією 64-QAM відрізняється від спектру сигналу з модуляцією 16-QAM і як саме відрізняється (ширше чи вужче)?

Розв'язання

Характер зміни спектру для QAM та PSK модуляцій є однаковим.

Спектр сигналу для M-PSK модуляції визначають виразом:

$$S(f) = \frac{E_s}{2} \left[\left(\frac{\sin p(f - f_0)T_s}{p(f - f_0)T_s} \right)^2 + \left(\frac{\sin p(f + f_0)T_s}{p(f + f_0)T_s} \right)^2 \right],$$

де $T_s = \log_2 M \cdot T_b$.

Отже, $\frac{S_{64}}{S_{16}} : \frac{\log_2 64}{\log_2 16} = \frac{6}{4} = \frac{3}{2} = 1,5$ рази.

Відповідь: спектр сигналу 16-QAM ширший у 1,5 рази. ■

3.3 Вибір канального коду

Вибір канального коду буде здійснюватись з існуючих блочних кодів БЧХ, які записуються у вигляді:

$$(n, k),$$

де n – кількість біт після кодування;

k – кількість біт до кодування (інформаційні біти).

Вибір блочного коду повинен формуватись на двох умовах:

1. Попередній вимір кодів (n, k) .

$$\Delta F_k = \frac{n}{k} \cdot \Delta F_{\text{розр.}} \leq \Delta F_{\text{зад.}}$$

де ΔF_k – ширина спектру сигналу після канального кодування;

$\Delta F_{\text{розр.}}$ – ширина спектру модульованого сигналу до кодування;

$\Delta F_{\text{зад.}}$ – задана смуга частот каналу для системи.

2. (n, k) – код повинен задовольняти умові завадостійкості:

$$P_{b_{\text{розр}}} \leq P_{b_{\text{зад}}}.$$

$$2.1 \frac{E_s}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \log_2 M \cdot \frac{k}{n}.$$

$$2.2 P_s \Rightarrow \text{для М-FSK, М-PSK, М-QAM з новим значенням } \frac{E_s}{N_0}.$$

2.3 $P_c \Rightarrow$ для М-FSK та М-PSK (М-QAM) за формулою для P_b без канального кодування:

$$P_c = \frac{2^{\log_2 M - 1}}{2^{\log_2 M} - 1} \cdot P_s \text{ або } P_c = \frac{1}{\log_2 M} \cdot P_s.$$

Ймовірність появи помилкового біта в каналі символів представлена на рис. 3.10.

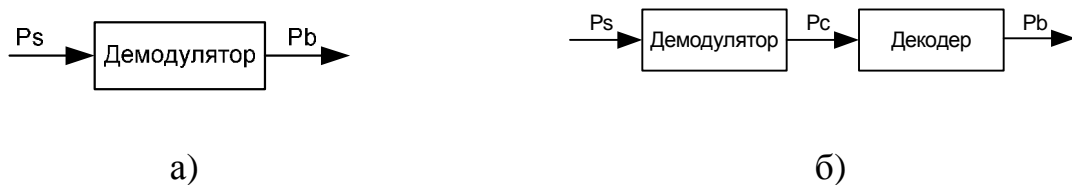


Рисунок 3.10 – Ймовірність появи помилкового біта без канального кодування (а) та з канальним кодуванням (б)

2.4 Ймовірність появи помилкового біта P_b :

$$P_b = \frac{1}{n} \sum_{j=t+1}^n j \cdot C_j^n \cdot P_j^C \cdot (1 - P_C)^{n-j},$$

де n – параметр коду;

t – кратність випрямлених помилок;

$$C_j^n = \frac{n!}{j!(n-j)!}.$$

3.4. Передавання сигналів з кодовим розділенням каналів. Кодування за Волшем

Передавання сигналів з кодовим розділенням каналів відбувається за допомогою розширення спектру методом прямої послідовності та кодування за Волшем.

У випадку розширення спектру методом прямої послідовності інформаційний потік бітів $D(t)$ додається за модулем 2 до послідовності випадкових бітів $C(t)$, яка ще називається псевдовипадковою послідовністю (ПВП) та складається з елементів тривалістю T_c , що значно менша тривалості інформаційного біта T_b . Таким чином, утворюється шумоподібний сигнал (рис. 3.11).

Отже, $T_c \ll T_b$, при чому:

$$T_b = n \cdot T_c,$$

де n – кількість елементів псевдовипадкової послідовності, яку ще називають коефіцієнтом розширення спектру (Spread Factor, SF).

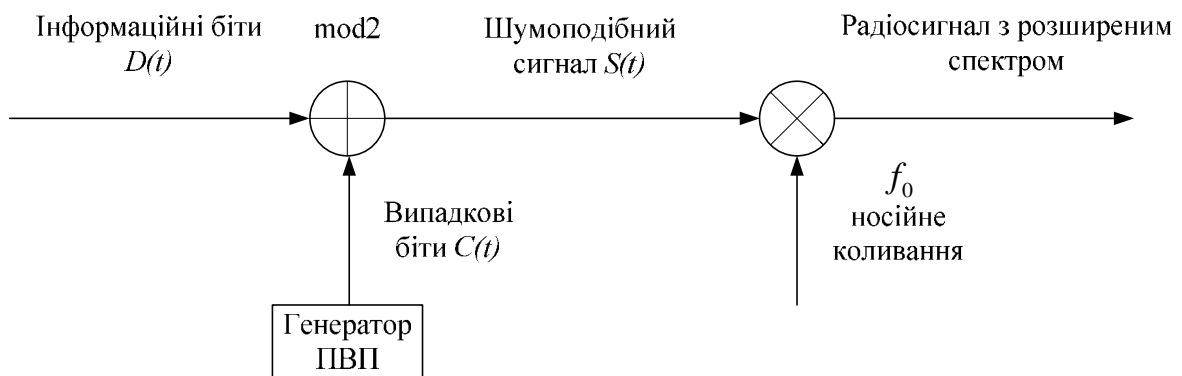


Рисунок 3.11 – Розширення спектру методом прямої послідовності

Кількість елементів ПВП безпосередньо характеризує ступінь розширення спектру сигналу у порівнянні зі смугою частот первинного повідомлення.

Цей процес можна проілюструвати таким рисунком (рис. 3.12).

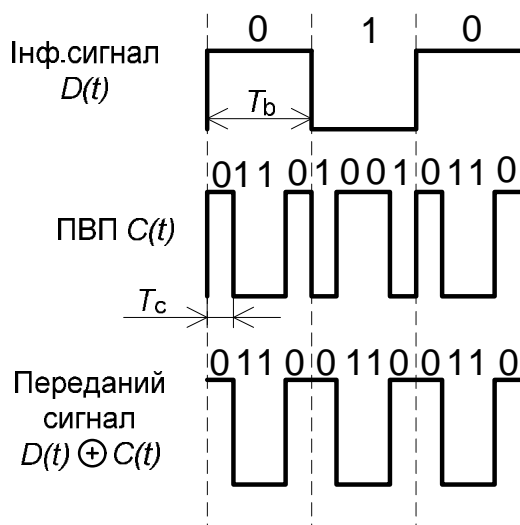


Рисунок 3.12 – Процес розширення спектру

В цьому випадку спектр розширено в чотири рази.

Для реалізації кодового розділення каналів у низхідному напрямку в стандарті cdmaOne використовують кодування за Волшем, яке передбачає застосування ортогональних кодів Волша.

Умова ортогональності кодів Волша полягає в наступному:

$$C_{ij}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} W_i(t) \cdot W_j(t - \tau) dt = \begin{cases} 0, & \text{якщо } i \neq j \\ \neq 0, & \text{якщо } i = j \end{cases}$$

Сигнали, що задовольняють цій умові, можуть передаватись одночасно ($\tau = 0$), оскільки не створюють взаємних завад.

■ Приклад 3.4

Визначити, чи є пара послідовностей ортогональними:

$$W_1 = 01010101,$$

$$W_2 = 01101001.$$

Розв'язання

Умова ортогональності послідовностей:

$$C_{ij} = \frac{1}{T} \int_0^T W_1 \cdot W_2 dt \approx \sum_{j=1}^8 W_{1j} \cdot W_{2j} = 0,$$

$$C_{ij} = (-1) \cdot (-1) + 1 \cdot 1 + (-1) \cdot 1 + 1 \cdot (-1) + (-1) \cdot 1 + 1 \cdot (-1) + (-1) \cdot (-1) + 1 \cdot 1 = 0.$$

Відповідь: пара послідовностей є ортогональною. ■

■ Приклад 3.5

Передати повідомлення від трьох абонентів через одну спільну смугу частот із застосуванням кодового розділення каналів за допомогою послідовностей:

$$W_1 = 0000 \text{ повідомлення 1} - 110,$$

$$W_2 = 0101 \text{ повідомлення 2} - 010,$$

$$W_3 = 0011 \text{ повідомлення 3} - 001.$$

Знайти коефіцієнт розширення спектру.

Розв'язання

Представимо повідомлення та розширювальні послідовності у вигляді логічних рівнів:

$$1) W_1 = (-1, -1, -1, -1) \text{ повідомлення 1} = (+1, +1, -1),$$

$$W_2 = (-1, +1, -1, +1) \text{ повідомлення 2} = (-1, +1, -1),$$

$$W_3 = (-1, -1, +1, +1) \text{ повідомлення 3} = (-1, -1, +1),$$

Комбінацію розширювальної послідовності з повідомленням отримаємо множенням всіх розрядів розширювальної послідовності на значення інформаційного біта. Сумарний розширений сигнал отримаємо додаванням сигналів розширених інформаційних послідовностей.

$$\begin{array}{r} S_1 + W_1 \\ -1, -1, -1, -1 \\ \times \\ +1 \quad +1 \quad -1 \end{array}$$

Тоді

$$S_1 + W_1$$

$$(-1, -1, -1, -1); (-1, -1, -1, -1); (+1, +1, +1, +1)$$

$$S_2 + W_2$$

$$(+1, -1, +1, -1); (-1, +1, -1, +1); (+1, -1, +1, -1)$$

$$S_3 + W_3$$

$$(+1, +1, -1, -1); (+1, +1, -1, -1); (-1, -1, +1, +1)$$

Сумарний розширений сигнал:

$$\sum_{i=1}^3 S_i + W_i = (+1, -1, -1, -3, -1, +1, -3, -1, +1, -1, +3, +1)$$

2) Коефіцієнт розширення спектру знайдемо за виразом:

$$SF = \frac{R_c}{R_b} = \frac{T_b}{1} \cdot \frac{1}{T_c},$$

Оскільки $T_b = 4T_c$, тоді

$$SF = \frac{4T_c}{T_c} = 4.$$

Відповідь: $SF = 4$. ■

■ Приклад 3.6

Використовуючи розширений сумарний сигнал з прикладу 3.5, здійснити виділення інформації повідомлення за допомогою розширювальної послідовності:

а) $W_2 = 0101$;

б) $W_4 = 0110$.

Розв'язання

Представимо розширювальні послідовності у вигляді логічних рівнів:

а) $(-1, +1, -1, +1)$;

б) $(-1, +1, +1, -1)$.

Сумарний розширений сигнал з прикладу 3.5:

$$(+1, -1, -1, -3, -1, +1, -3, -1, +1, -1, +3, +1).$$

Для відновлення інформаційної послідовності кожний розряд розширеного інформаційного сигналу множиться на відповідний розряд розширювальної послідовності, після чого отримані результати підсумовуються в межах періоду розширювальної послідовності. Тоді:

а) $(-1, -1, +1, -3, +1, +1, +3, -1, -1, -1, -3, +1)$ – добуток з W_2 ,

$$\begin{pmatrix} -4, & +4, & -4 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ – вихід інтегратора,}$$

відповідає переданому повідомленню №2.

б) $(-1, -1, -1, +3, +1, +1, -3, +1, -1, -1, +3, -1)$ – добуток з W_4 ,

$$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & \text{– вихід інтегратора} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & \text{– кодова послідовність} \end{matrix}$$

Відповідь: а) повідомлення 010, б) за допомогою розширювальної послідовності W_4 повідомлення не було передано. ■

Задачі для самостійного розв'язання

1. Знайти мінімальну ширину смуги модульованого сигналу ΔF , якщо система рухомого зв'язку використовує модуляцію 8-PSK для передавання даних із швидкістю $R = 4800$ біт/с.

2. Знайти мінімальну ширину смуги модульованого сигналу ΔF , якщо система рухомого зв'язку використовує модуляцію 8-FSK для передавання даних із швидкістю $R = 19200$ біт/с.

3. Знайти швидкість передавання даних R , яка забезпечується за допомогою модуляції 4-FSK, якщо мінімальна смуга модульованого сигналу складає $\Delta F = 25600$ Гц.

4. Визначити ймовірність появи помилкового біта P_B у випадку передавання даних із швидкістю $R = 9600$ біт/с з використанням модуляції 8-PSK, якщо відношення сигнал/шум на вході приймача $P_r / N_0 = 50$ дБ.

5. Визначити ймовірність появи помилкового біта P_B у випадку передавання даних із швидкістю $R = 9600$ біт/с з використанням модуляції 4-FSK, якщо відношення сигнал/шум на вході приймача $P_r / N_0 = 52$ дБ.

6. Визначити, в скільки разів ширина спектру сигналу, що модулюється за допомогою модуляції 16-QAM, більше ширини спектру сигналу, що модулюється за допомогою модуляції QPSK.

7. Визначити кількість абонентів в стільнику, що можуть користуватися послугами системи cdmaOne, якщо коефіцієнт розширення спектру складає 125, а допустиме відношення сигнал-завада S/I дорівнює 6 дБ при середній розмовній активності користувачів $V = 2$.

8. Чи є наведені кодові послідовності а) 0000 1111 та 0101 1010; б) 0101 0001 та 1111 0000 ортогональними? Доведіть.

9. Розрахувати номінальну та фактичну ємність стільника CDMA згідно із заданим варіантом значень параметрів формули Вітербі. Для незаданих параметрів прийняти типові значення.

Варіант	M	SF	V	$1 + i$	S / I
1	1		1		2
2	2		1,5		3
3	2			1,2	4
4		32		1,2	
5		128		1,4	
6		256	1,2		
7			1		7
8	1				1

10. Розрахувати мінімально необхідне відношення сигнал/завада для забезпечення заданої ємності стільника CDMA, а також її номінальну ємність згідно із заданим варіантом. Для незаданих параметрів прийняти типові значення.

Варіант	M	SF	V	$1 + i$	N_u
1	1	-			5
2	1	-	1		10
3	2	-		1,1	20
4		-	1,2	1,2	30
5		128	1,4	1,3	50100
6		128		1,4	150
7		256			250
8	1	256			

РОЗДІЛ 4. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторна робота №1

ОСНОВИ РОБОТИ В ПРОГРАМІ ATOLL. РОБОТА З ЦИФРОВИМИ КАРТАМИ МІСЦЕВОСТІ

Мета роботи: дослідити робоче середовище програми Atoll; отримати базові навички роботи з цифровими картами місцевості в програмному комплексі для проектування радіопокриття.

Теоретичні відомості

Для створення нового проекту необхідно запустити програму Atoll і обирати File → New → From a Document Template. Тоді у вікні, що з'явилося (рис. 4.1), обираємо потрібну радіотехнологію.

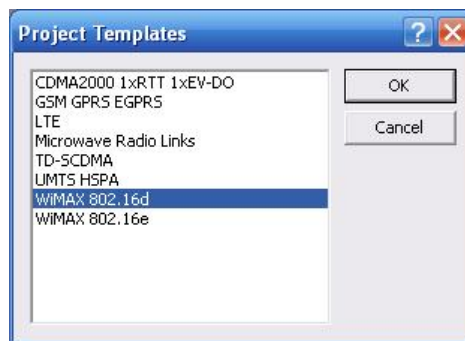


Рисунок 4.1 – Вибір радіотехнології

Після цього з'явиться робоче середовище, як показано на рис. 4.2.

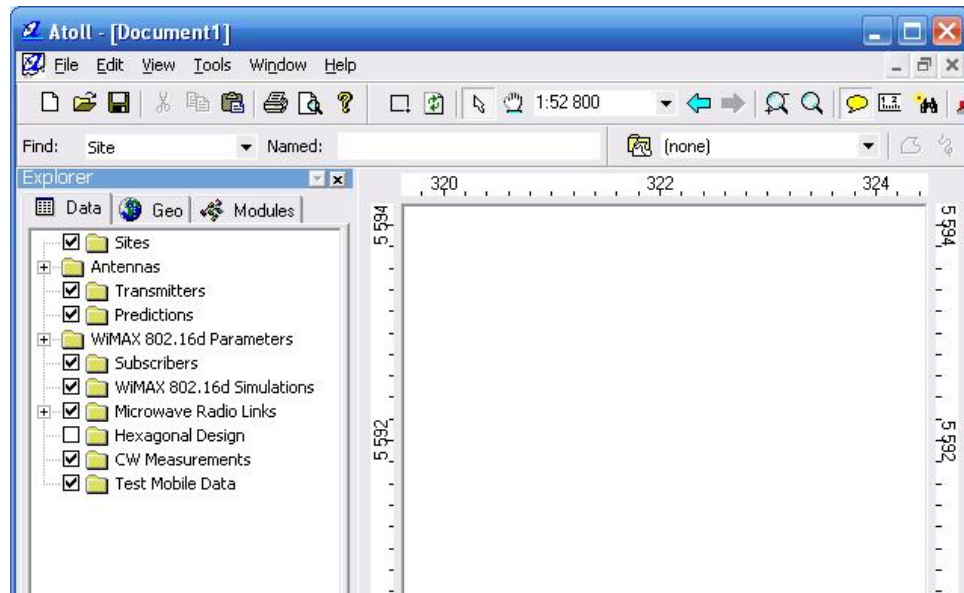


Рисунок 4.2 – Робоче середовище Atoll

Наступним кроком є імпортування цифрових карт в проект. У програмі Atoll використовують спеціальні електронні карти місцевості. Для будь-якої ділянки земної поверхні для повноцінного моделювання необхідно мати:

- карти висот рельєфу та забудови (heights map, buildings map);
- карти розташування фізичних об'єктів-перешкод – будівель, інженерних споруд, рослинності (obstacles map);
- карти завод та шумів (clutter map);
- векторні карти (vector) місцевості.

Вибираємо File → Import, у вікні, що з'явилося, потрібно вказати файли карт. Імпортуємо цифрові карти по черзі:

1. Спочатку обираємо карти висот рельєфу і забудови – height.grd та build(ings).grd відповідно. У вікні, що з'явиться після їх вибору (рис. 4.3), нічого не потрібно змінювати, лише потрібно поставити позначку навпроти «Embed in document». Карти автоматично будуть розташовані в розділі digital terrain model вкладки «Geo» (рис. 4.4).

Важливо! Аби карти, які імпортуються, зберігалися безпосередньо в проект .atl, необхідно **завжди** ставити позначку навпроти Embed in document (рис. 4.3, відмічено червоним) і лише потім натискати «Import». Без цієї позначки проект просто буде посилатися на папку на вашому комп'ютері.

Відкриваючи його на іншому ПК, програма не зможе імпортувати електронні карти.

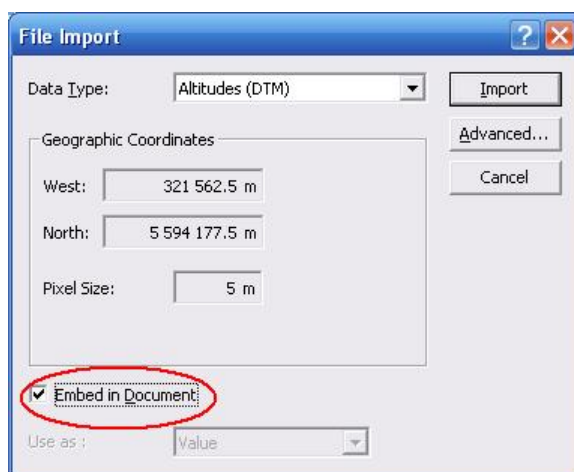


Рисунок 4.3 – Імпортування карт висот рельєфу і забудови

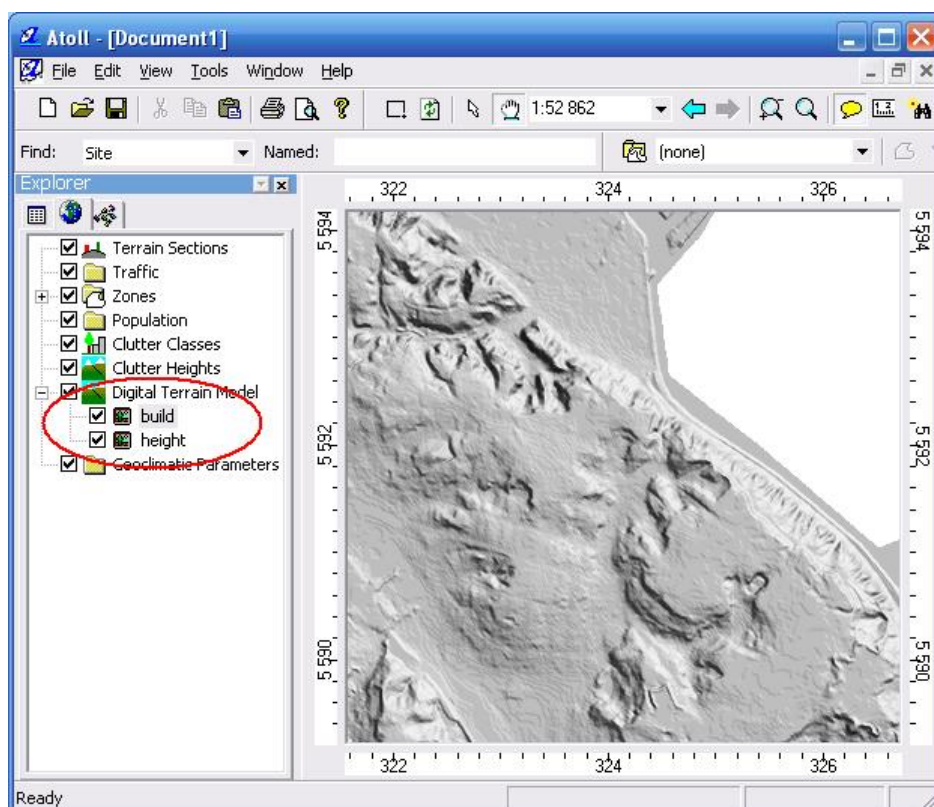


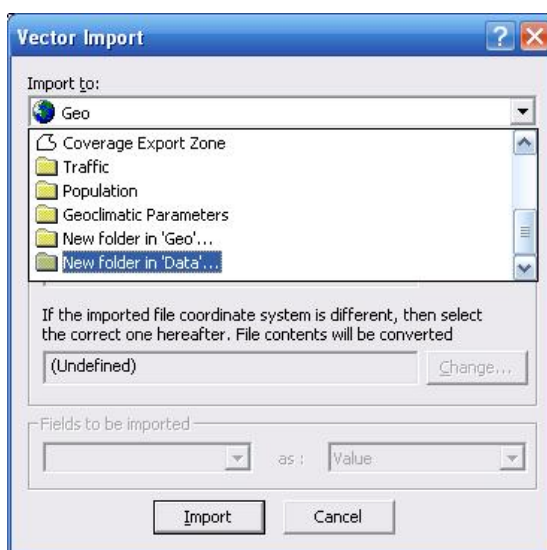
Рисунок 4.4 – Карти висот рельєфу і забудови у проекті

2. Далі завантажуюмо векторні карти. Зазвичай ці карти мають назву buildings.TAB, vegetation.TAB (папка obstacles), highway.TAB, inlandwater.TAB, majorroad.TAB, streets.TAB, freeway.TAB та ін. (папка vector). У вікні «Открыть» (File → Import) вибираємо всі карти одразу (виділяємо всі вище

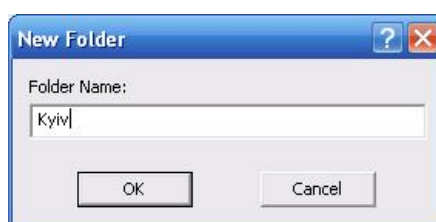
перераховані файли з розширенням .TAB) і вказуємо папку, яка буде зберігати імпортовані файли. Для зручності краще створити нову папку – в меню вікна Vector Import вибрати варіант «New folder in 'Geo'...» (рис. 4.5,а) та задати назву нової папки (рис. 4.5,б).

3. Для наочності також імпортуємо карту завод і шумів – clutter.grc.

Після імпортування усіх карт в робочому вікні з'явиться багат шарова карта місцевості (рис. 4.6). Векторні карти, що містяться у папці Київ, повинні бути вище усіх інших карт, тому всю папку потрібно просто перетягнути мишкою вгору (як показано на рис. 4.6).



a)



б)

Рисунок 4.5 – Вибір нової папки (а) та надання їй імені (б)

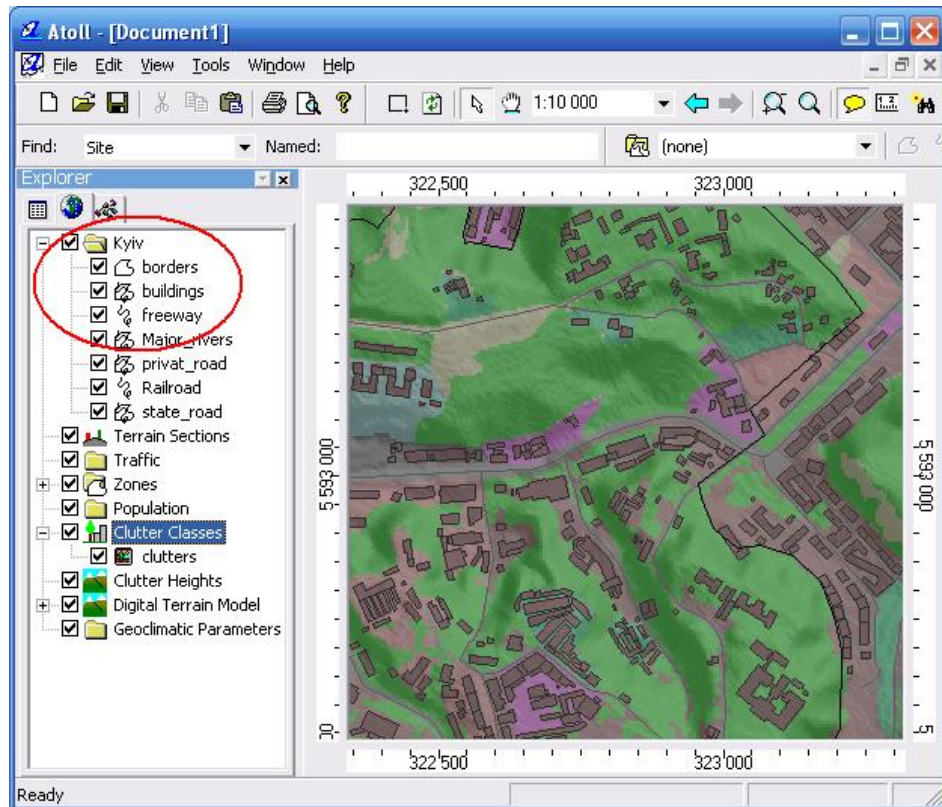


Рисунок 4.6 – Результат імпортування цифрових карт місцевості

Обов'язково в процесі створення необхідно зберегти проект: File → Save as, у вікні, що з'явилося, вибрати папку, в якій зберігатиметься файл, та задати ім'я для проекту (рис. 4.7). Усі проекти, створенні в середовищі Atoll, мають розширення .ATL.

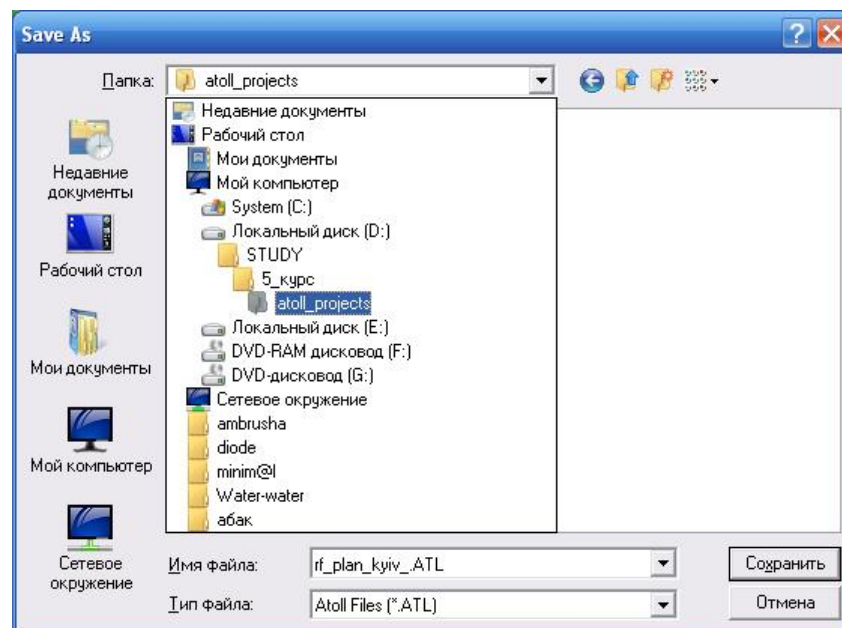


Рисунок 4.7 – Збереження проекту

Збережений проект складається з 2 частин: документу з розширенням .ATL та папки, що має в кінці імені закінчення .losses (рис. 4.8).

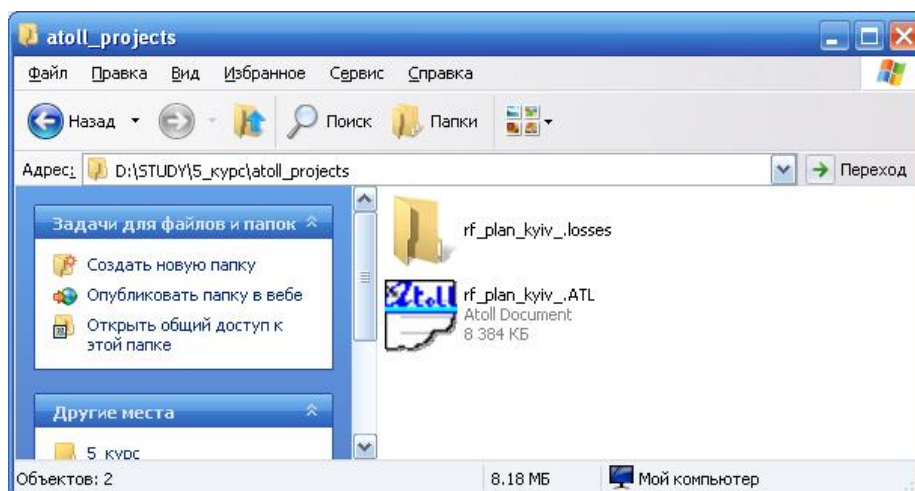


Рисунок 4.8 – Формат зберігання проекту Atoll

Для наочності бажано виконати кольорове виділення шару «buildings», щоб кожен діапазон висот забудови мав свій колір: вкладка «Geo» → права кнопка миші по шару «buildings» → Properties (рис. 4.9).

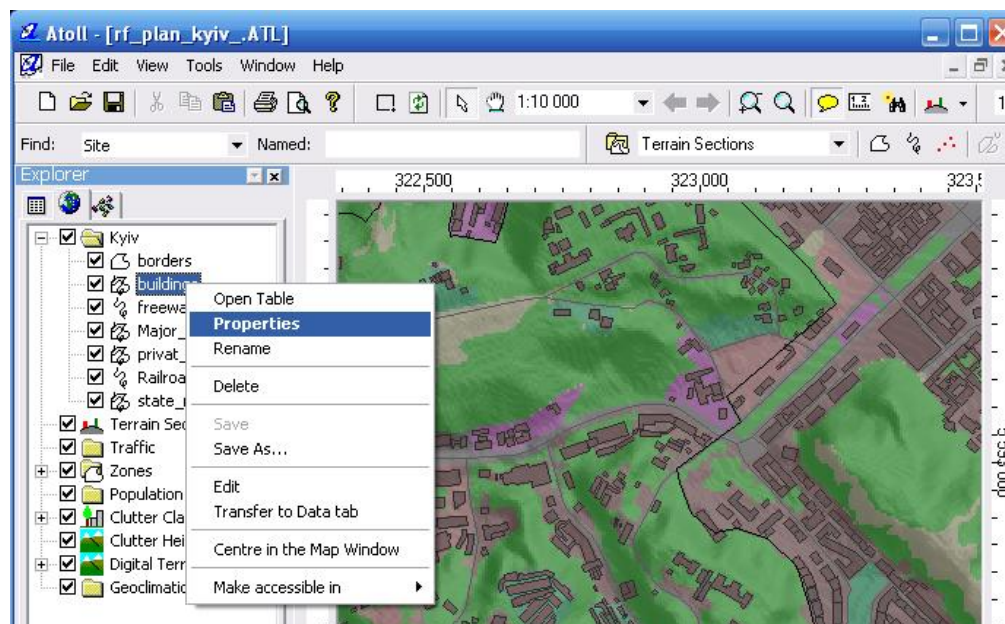


Рисунок 4.9 – Виділення шару «buildings»

У вікні, що з'явилося (buildings properties, рис. 4.10), вибираємо вкладку «Display», під написом «Display Type» вибираємо Value intervals, а під «Field» вибираємо Height і натискаємо «Применить».

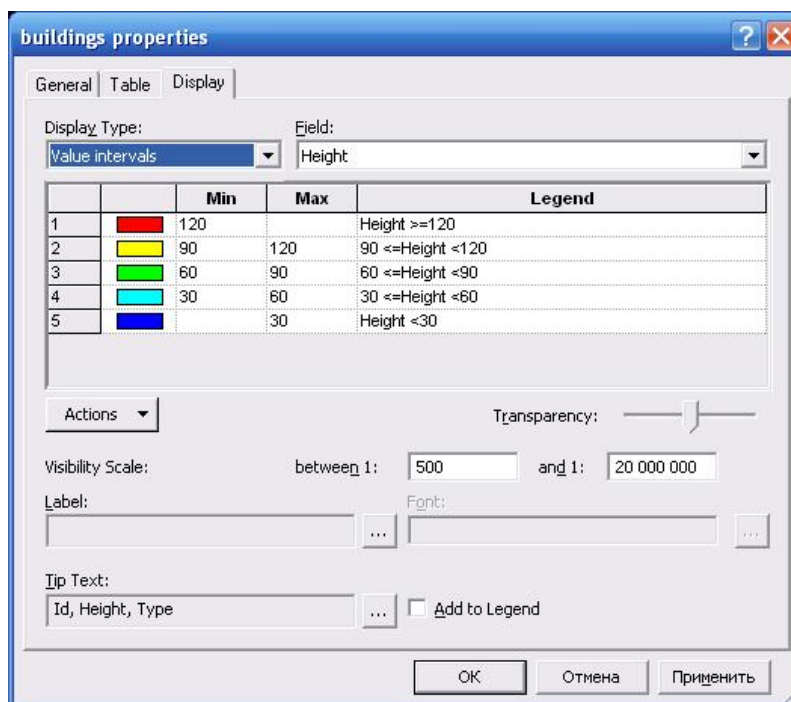


Рисунок 4.10 – Властивості шару «buildings»

Результат такої операції наведено на рис. 4.11. Як видно з рисунку, найвищі будинки позначені червоним кольором, трохи нижчі – жовтим, найнижчі – блакитним.

Примітка. Щоб кольорове виділення було чітким, необхідно, щоб шар «buildings» знаходився якнайвище, тобто над усіма іншими векторними картами.

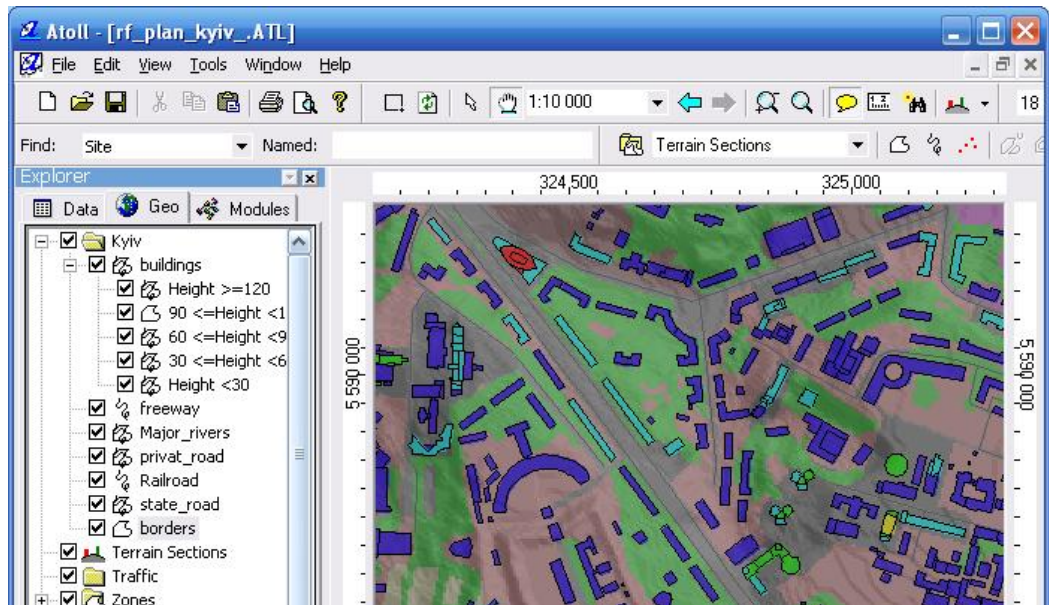


Рисунок 4.11 – Виділення кольором висотних діапазонів забудови

Маючи наглядне виділення найвищих споруд, можна розміщувати на них базові станції.

Завдання на лабораторну роботу

Створити новий проект в програмі Atoll. Завантажити в нього цифрові карти місцевості відповідно до варіанту завдання:

- 1 варіант: м. Алмати;
- 2 варіант: м. Будапешт;
- 3 варіант: м. Єреван;
- 4 варіант: м. Софія;
- 5 варіант: м. Таллінн;
- 6 варіант: м. Тегеран.

Маніпулюючи шарами, що відповідають різним типам карт, з'ясувати, який перепад висот (мінімальне та максимальне значення) на заданій місцевості, які висота найвищих будівель на заданій місцевості; який тип рослинності є типовим для цієї місцевості і чи суттєво впливає вона на процес поширення радіохвиль. Ознайомитись з інформацією, яка міститься на карті шумів і завод. Зробити висновки про призначення різних шарів цифрових карт місцевості.

Порядок виконання роботи

1. Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття GSM/GPRS/EGPRS.

2. Імпортувати в проект цифрові карти місцевості - карти висот рельєфу та забудови (height.grd та build(ings).grd), карти об'єктів-перешкод (buildings.TAB, vegetation.TAB), інші векторні карти місцевості (highway.TAB, inlandwater.TAB, majorroad.TAB, streets.TAB, freeway.TAB та ін.), карти шумів та завад (clutter.grc).

3. Зробити шар векторних карт першим у списку, перетягнувши папку, що його містить, угору до початку закладки 'Geo'. Звернути увагу на чіткість відображення об'єктів, представлених на карті. Другим шаром у списку можна зробити карту шумів і завад clutter classes.

4. Вимкнувши всі завантажені шари, окрім шару висот рельєфу і забудови (зняти позначки на шарі векторних карт та шарі класів шумів і завад clutter classes), отримати зображення рельєфу місцевості сірого кольору.

5. Для наочності виконати кольорове виділення шару «Digital Terrain Model», щоб кожен діапазон висот рельєфу мав свій колір: вкладка «Geo» → права кнопка миші по шару «Digital Terrain Model» → Properties. Якщо перепад висот знаходиться в межах 100 м, можна додати додаткові значення висот, які будуть описуватися певним значенням кольору. *Наприклад*, кольори можуть бути присвоєні значенням висот між позначками 100 та 200 м (125, 150, 175 м). Для цього у вікні Digital Terrain Model properties виділити те значення висоти, вище чи нижче якого треба додати нове значення, натиснути на кнопку Actions, обрати у списку Insert After чи Insert Before та задати новий колір, клацнувши в полі кольору у рядку значення висоти (150 м), яка щойно автоматично з'явилась.

6. За результатами виконання попереднього пункту з'ясувати, який перепад висот (мінімальне та максимальне значення) на заданій місцевості.

7. Увімкнути векторні шари, відмінити кольорове виділення шару «Digital Terrain Model» (під написом «Display Type» вибирати знову Discrete

values), для наочності виконати кольорове виділення векторного шару «buildings», щоб кожен діапазон висот забудови мав свій колір.

8. За результатами виконання попереднього пункту з'ясувати висоту найвищих будівель на заданій місцевості.

9. ¹Вимкнути шар «buildings», з'ясувати, яка рослинність домінує на заданій місцевості. Для цього на шарі «vegetation» клацнути правою кнопкою миші «vegetation» → Properties, у вікні, що з'явилося (vegetation properties), вибираємо вкладку «Display», під написом «Display Type» вибираємо Discrete intervals, а під «Field» вибираємо Type. Ознайомитися з легендою, що з'явилася.

10. Увімкнути шар класів шумів і завад clutter classes, вимкнувши інші шари. Ознайомитись з інформацією, яка міститься на карті шумів і завад.

Зміст звіту

1. Номер та тема роботи на титульному аркуші.
2. Мета роботи та порядок виконання роботи на наступному аркуші.
3. Результати виконання роботи: за п.3 – представлення карти висот місцевості в градаціях сірого; за п.5 – кольорове представлення карти висот з поясненнями виконання цього пункту; висновки за п.6; за п.7 – кольорове представлення шару «buildings» з поясненнями виконання цього пункту; висновки за п.8 та п.10.

Контрольні запитання

1. Які типи карт необхідно мати для проектування радіопокриття?
2. Який зміст цифрових карт висот рельєфу та забудови?
3. Яку інформацію містять векторні карти місцевості?
4. В якому порядку бажано розташовувати шари цифрової карти місцевості і чому?
5. Як змінити кольорове відображення шару на цифровій карті місцевості?
6. З яких частин складається збережений проект в середовищі Atoll?

¹ Виконувати лише у випадку наявності відповідної карти для даної місцевості

Лабораторна робота №2

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОПОКРИТТЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ В ATOLL

Мета роботи: отримати навички моделювання радіопокриття базової станції (БС) в програмі Atoll; навчитися налаштовувати параметри передавача БС та антени.

Теоретичні відомості

Базові станції доцільно розташовувати на найвищих точках рельєфу або на найвищих спорудах, якщо це не суперечить вимогам санітарних норм. Щоб розташувати БС на карті місцевості, перейдемо до роботи з панелью конфігурації БС (рис. 4.12).

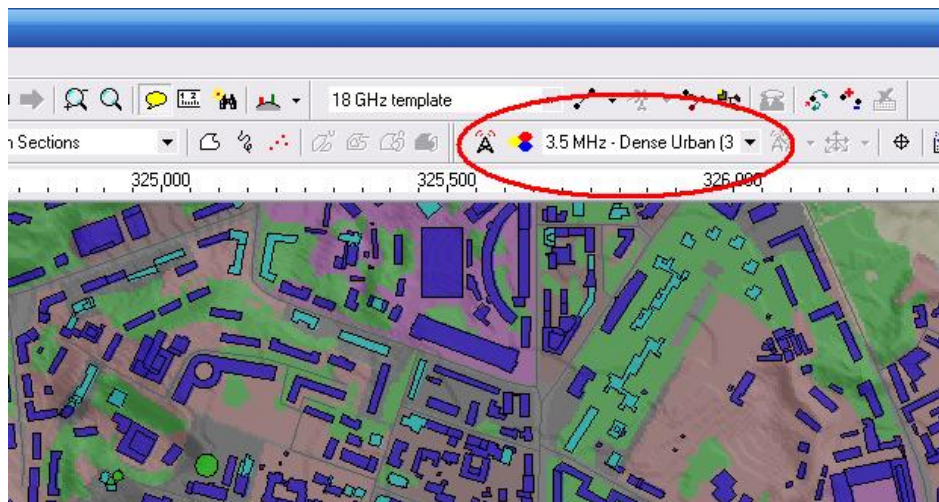


Рисунок 4.12 – Панель роботи з конфігурацією БС

Базову станцію можна вибрати «шаблонного» типу, але зазвичай її треба налаштувати під власні умови. На панелі конфігурації БС викликаємо випадне меню (рис. 4.13) та вибираємо останній пункт – «Manage Templates».

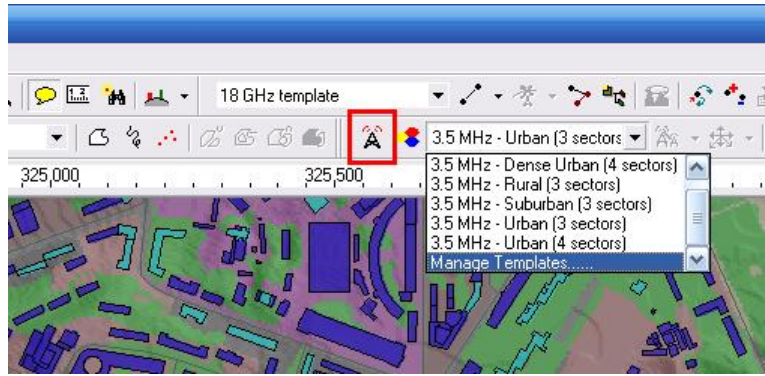


Рисунок 4.13 – Панель налаштування параметрів БС

У вікні, що з'явилося (рис. 4.14), вибираємо потрібний нам приклад БС (urban – для міста, suburban – для передмістя тощо) та натискаємо «Add...» – виклик вікна конфігурації.

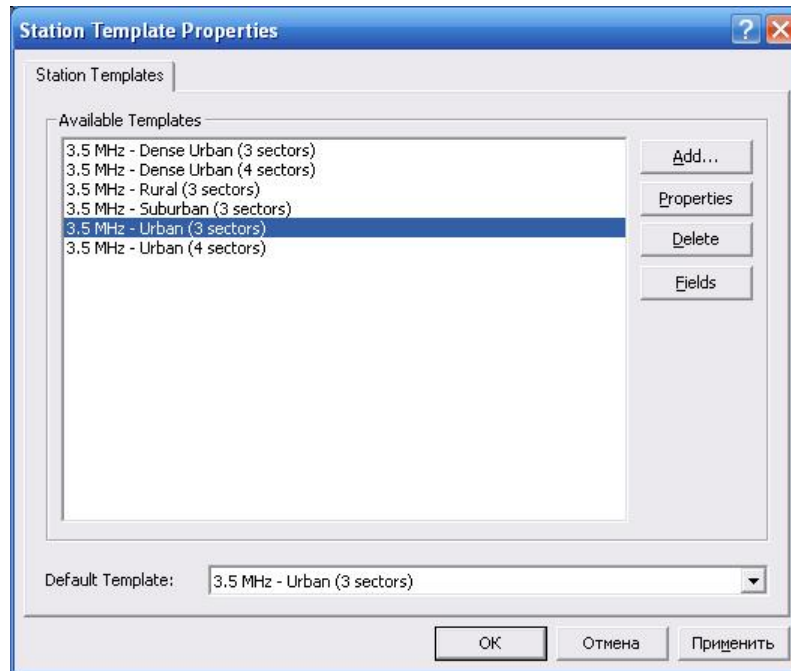



Рисунок 4.14 – Перехід до конфігурації БС

Вікно конфігурації (рис. 4.15) дозволяє здійснювати налаштування таких параметрів БС, як кількість секторів (1), радіус стільника (2), висота підвісу антени (3), модель антени передавача (4), обладнання смарт-антени (5), схема МІМО (6), модель поширення радіохвиль (7) та багато інших.

Важливо! Слід зазначити, що параметри (5) та (6) є доступними **не для всіх** радіотехнологій. Наприклад, для GSM/GPRS/EGPRS ці параметри відсутні.

Вибравши тип БС (наприклад, 3,5 MHz – Urban (3 sectors)) на панелі конфігурації БС, або налаштувавши станцію власноруч (процес описано вище), натискаємо на піктограму із зображенням БС (на рис. 4.13 виділено червоною рамкою). Курсор миші набуде виду , де «+» потрібно навести на місце запланованого розміщення БС. Після наведення «+», наприклад, на будинок натискаємо на ліву кнопку миші. В результаті з'явиться БС (рис. 4.16).

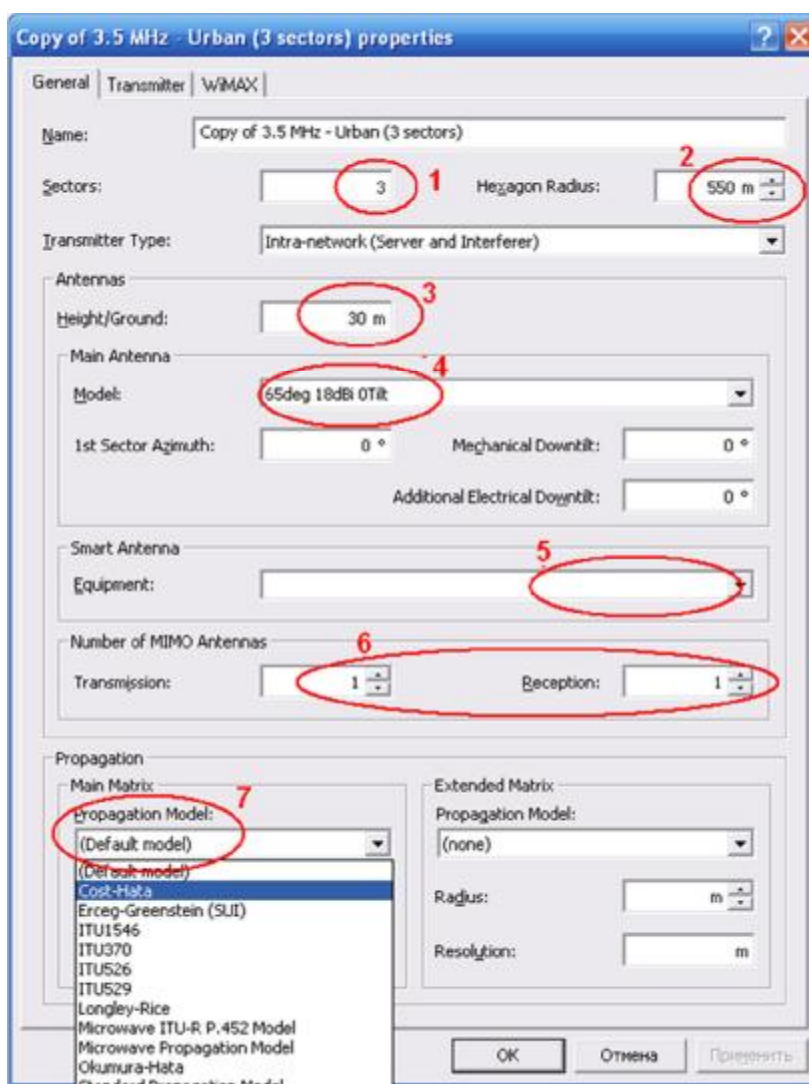


Рисунок 4.15 – Вікно налаштування параметрів БС

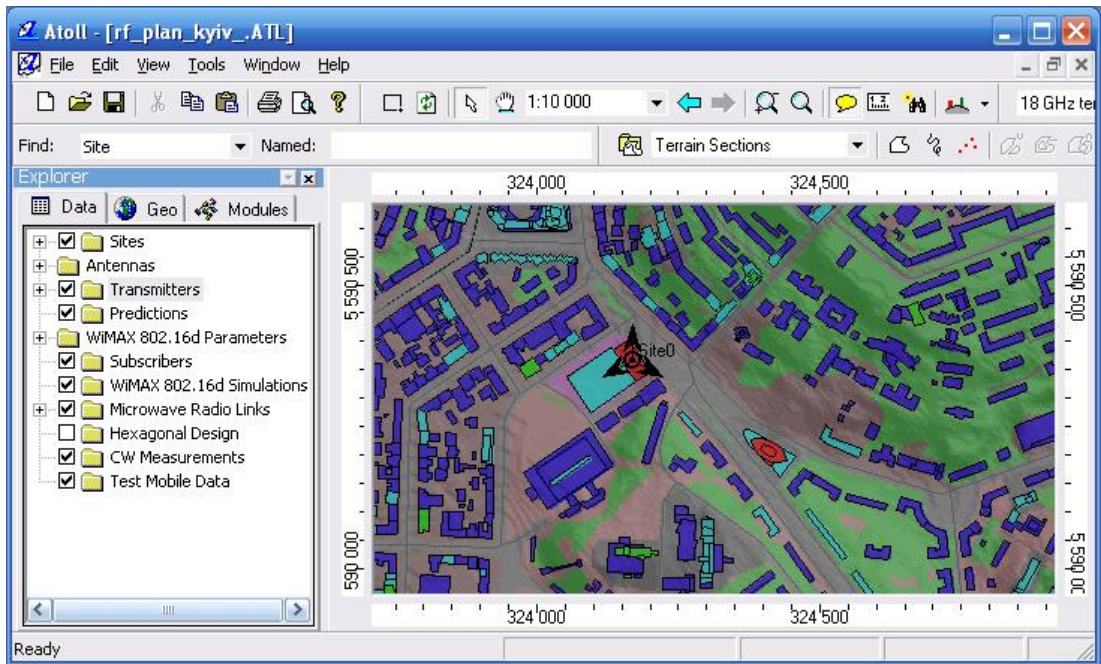


Рисунок 4.16 – Вид базової станції

Наступним кроком після розташування базових станцій є моделювання покриття. Працюємо у вкладці «Data». Щоб програма виконала моделювання покриття, потрібно правою кнопкою миші натиснути на «Predictions» → «New» (рис. 4.17).

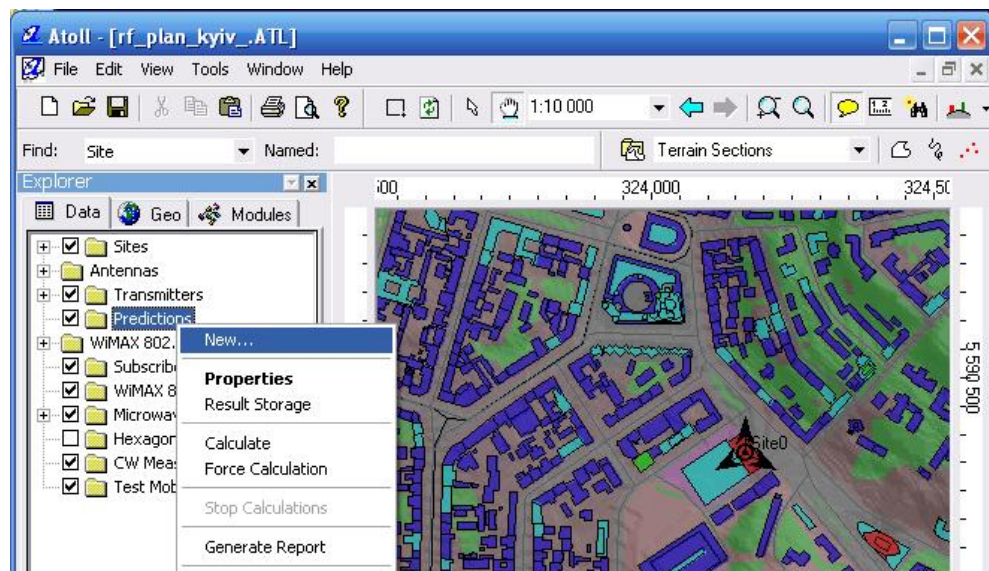
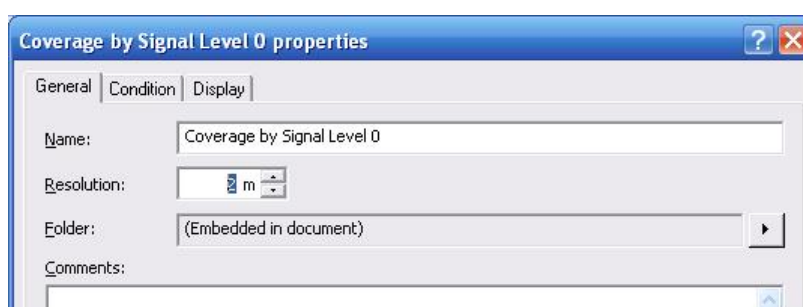


Рисунок 4.17 – Моделювання покриття, яке забезпечує БС

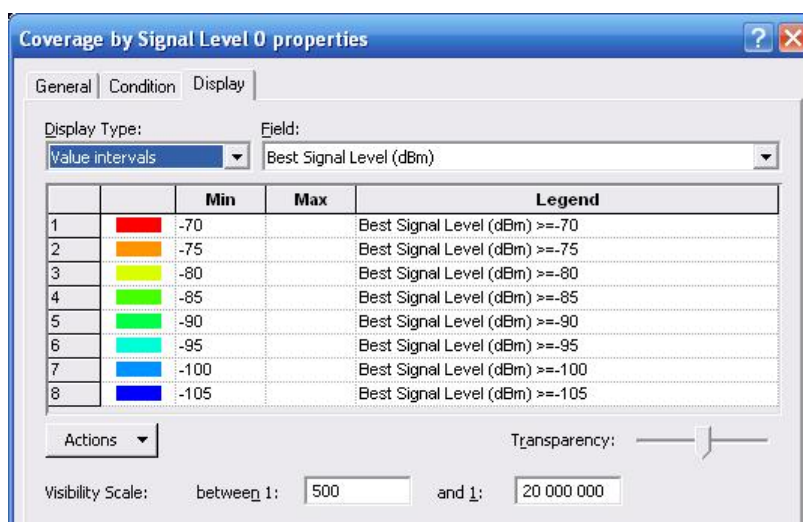
У вікні «Study Types», що з'явилося, вибираємо варіант «Coverage by Signal Level» та натискаємо «ОК».

Після цього з'явиться вікно «Coverage by Signal Level 0 properties». Переходимо на вкладку «General» та змінюємо роздільну здатність («Resolution»), що за замовчуванням дорівнює 50 м, на 2 м (2 m) (рис. 4.18,а).

У вкладці «Display» можна подивитись, яким кольором буде відображатися на карті відповідний діапазон рівня сигналу в дБм. В Atoll за замовчуванням виставлений діапазон від -75 до -105 дБм (рис. 4.18,б), але за необхідності можна редагувати ці межі.



а)



б)

Рисунок 4.18 – Вікно конфігурації покриття – загальні параметри (а) та параметрами відображення (б)

Після встановлення всіх параметрів в закладці «Data» в папці «Predication» потрібно правою кнопкою миші натиснути на «Coverage by Signal Level» і в спливаючому меню вибрати варіант «Calculate» (рис. 4.19). Почнеться розрахунок покриття, який триває кілька секунд, після чого на карті з'явиться результат моделювання у вигляді кольорових рівнів сигналу навколо БС (рис. 4.20).

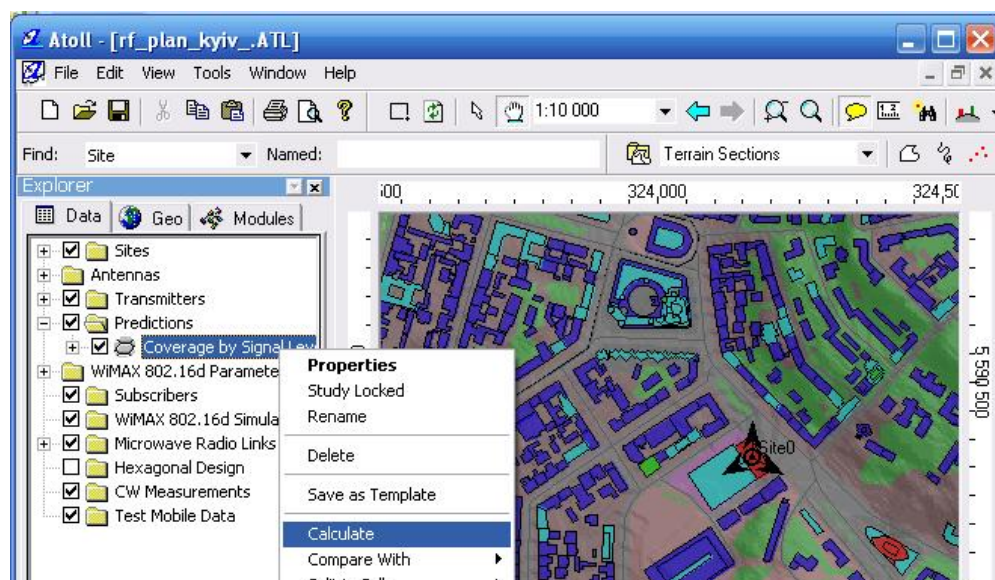


Рисунок 4.19 – Виклик команди для розрахунку покриття

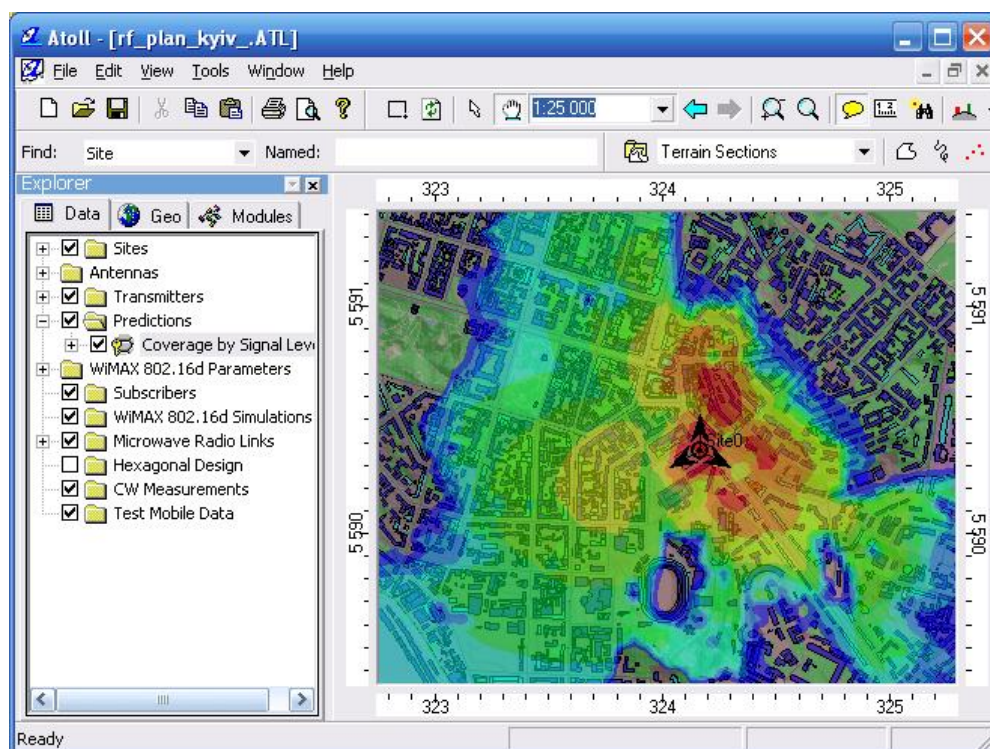


Рисунок 4.20 – Результат моделювання рівнів сигналу від БС

Щоб у робочому вікні поряд з картою покриття відображалася відповідність кожному кольору рівня сигналу, потрібно додати так звану легенду – «View» → «Legend Window». Результат приведено на рис. 4.21.

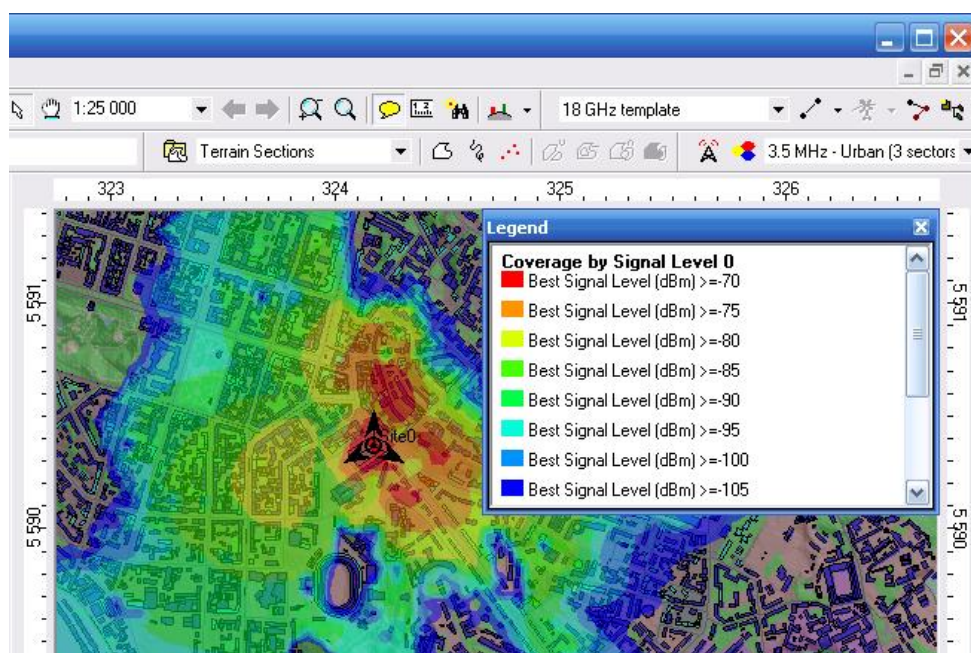
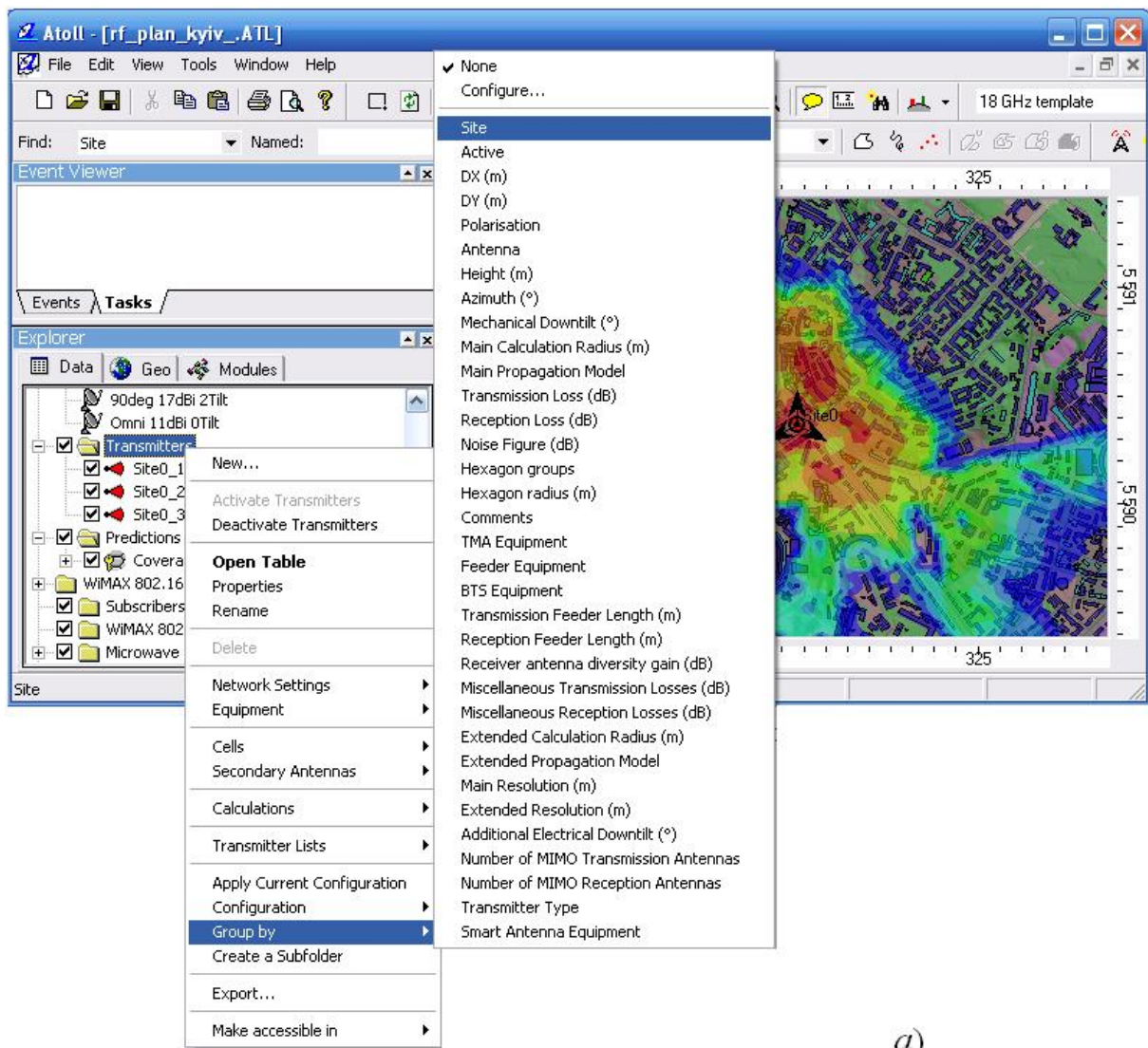


Рисунок 4.21 – Легенда рівнів сигналу

Важливим моментом в моделюванні покриття є конфігурація передавачів БС. Налаштування передавачів здійснюється у вкладці «Data» → «Transmitters». Спочатку кожен передавач (сектор) БС там позначений окремо, наприклад Site0_1 – перший передатчик БС №0, Site1_3 – третій передатчик БС №1 і т. д. (site – те ж саме, що й базова станція). Оскільки БС на території може бути більше 10, конфігурувати кожен сектор незручно і нераціонально. Доцільніше об'єднати передавачі окремої БС в одну групу – як це зробити, наведено на рис. 4.22, і прописувати параметри уже для всієї групи.



a)



б)

Рисунок 4.22 – Об'єднання передавачів БС (а) та вигляд об'єднаних в одну групу передавачів (б)

Тепер можна конфігурувати всю БС. Для цього натискаємо правую кнопкую миші на «Transmitters» і вибираємо варіант «Properties» (рис. 4.23).

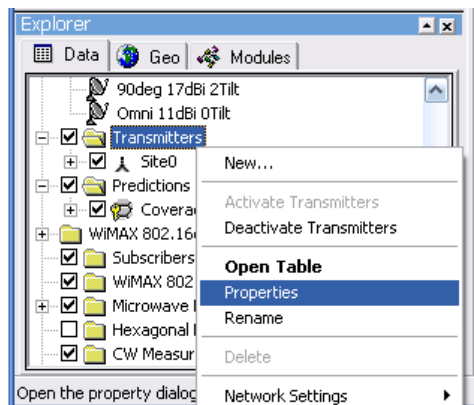


Рисунок 4.23 – Властивості групи передавачів БС

Після виклику цього варіанту з'явиться вікно «Transmitters properties». Воно містить 6 закладок, проте в рамках загальної конфігурації БС достатньо працювати з трьома із них: «Global Parameters», «Propagation» та «Station Templates».

На вкладці «Global Parameters» в основному редагують поля «Margin» (запас) та «Serving cell selection» (вибір стільника, що обслуговується). Вкладка «Station Templates» призначена для редагування параметрів БС всієї групи. На вкладці «Propagation» в основному встановлюють модель поширення радіохвиль (рис. 4.24).

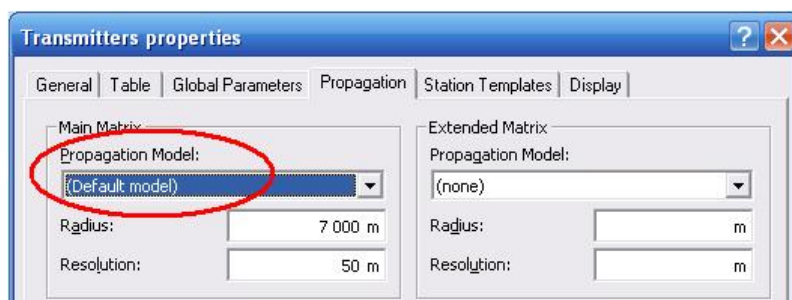


Рисунок 4.24 – Вибір моделі поширення радіохвиль для групи передавачів БС

Вкладку «Display» використовують тоді, коли потрібно змоделювати покриття за кожним передавачем (сектором БС). Для створення такого типу покриття у вкладці «Display» (вікна «Transmitters properties») вибираємо «Display type» – Automatic (рис. 4.25) та натискаємо «ОК» внизу вікна.

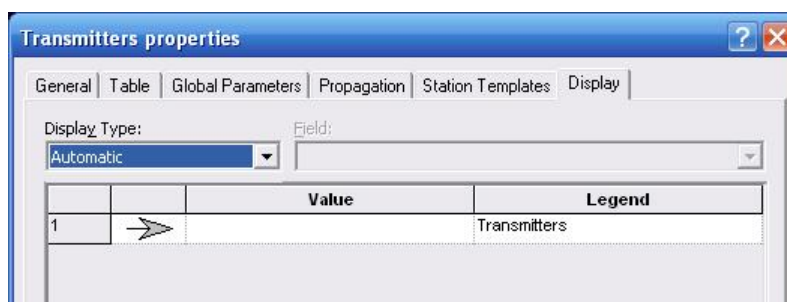


Рисунок 4.25 – Закладка «Display» вікна «Transmitters properties»

Після цього моделюємо нове покриття: натискаємо правою кнопкою миші на папку «Predication» (закладка «Data») → «New» і в вікні «Study Type» обираємо «Coverage by Transmitter» (рис. 4.26) та натискаємо «ОК».

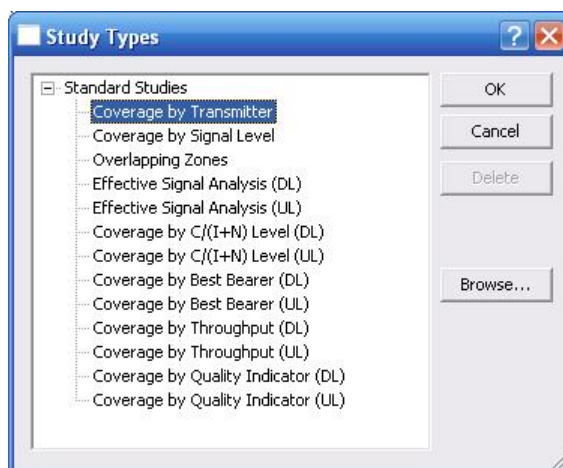


Рисунок 4.26 – Моделювання покриття за секторами БС

З'явиться вікно «Coverage by Transmitter 0 properties», в якому потрібно у вкладці «General» змінити роздільну здатність (Resolution) на меншу (підходить 2 м) та натиснути «ОК».

Після виконання описаних кроків в папці «Predication» (вікно «Explorer», вкладка «Data») з'явиться нове не обчислене покриття – вікно «Coverage by Transmitter 0» (рис. 4.27). Далі виконуємо уже відому процедуру – правою кнопкою миші натискаємо на «Coverage by Transmitter 0» і в спливаючому меню вибираємо варіант «Calculate».

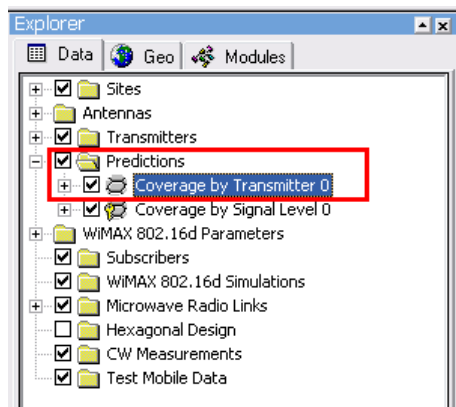


Рисунок 4.27 – Поява нового покриття в «Predication»

Результат моделювання покриття за секторами БС показано на рис. 4.28.

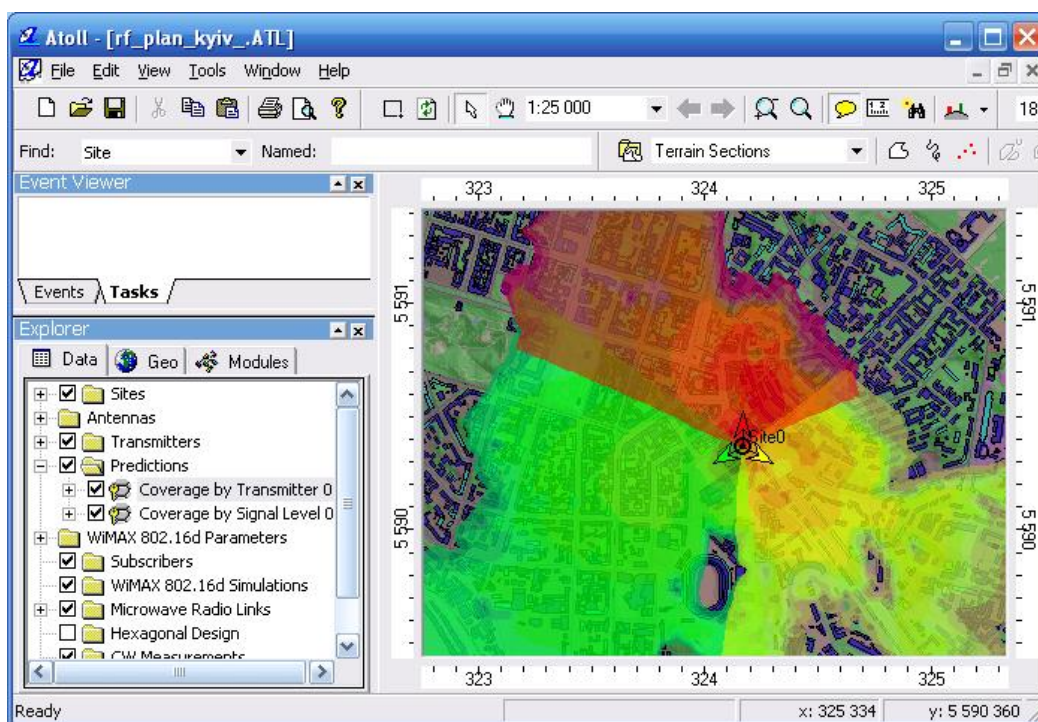


Рисунок 4.28 – Результат моделювання покриття за секторами БС

Завдання на лабораторну роботу

Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття GSM/GPRS/EGPRS. Завантажити в нього цифрові карти місцевості відповідно до варіанту завдання:

- 1 варіант: м. Алмати;
- 2 варіант: м. Будапешт;

- 3 варіант: м. Єреван;
- 4 варіант: м. Софія;
- 5 варіант: м. Таллінн;
- 6 варіант: м. Тегеран.

Розташувати базову станцію в обраному місці, задати тип БС з трьома секторами. **Варіанти 1, 3, 5 використовують БС GSM 1800, варіанти 2, 4, 6 – БС GSM 900.** Змоделювати радіопокриття, що створюється БС. Почергово змінюючи висоту підвісу антени БС та потужність передавача БС, повторити моделювання радіопокриття. Пояснити зміни, що спостерігаються. Обравши місце розташування іншої БС, задати тип БС з одним сектором. Змоделювати радіопокриття, що створюється такою БС.

Порядок виконання роботи

1. Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття GSM/GPRS/EGPRS.

2. Імпортувати в проект цифрові карти місцевості - карти висот рельєфу та забудови (height.grd та build(ings).grd), карти об'єктів-перешкод (buildings.TAB, vegetation.TAB), інші векторні карти місцевості (highway.TAB, inlandwater.TAB, majorroad.TAB, streets.TAB, freeway.TAB та ін.).

3. Розташувати базову станцію в обраному місці, задати тип БС з трьома секторами. Перейшовши до вікна конфігурації БС (див. рис. 2.3), створити нову конфігурацію, натиснувши «Add». Задати висоту підвісу антени (5 м) та обрати модель антени, що відповідає завданню.

4. Змоделювати радіопокриття БС за рівнем сигналу, як показано на рис. 2.6 та 2.7.

5. Змінити для кожного сектора висоту підвісу антени БС на 10 м. Змоделювати радіопокриття БС за рівнем сигналу. Відзначити вплив висоти підвісу антени БС на покриття.

6. Зменшити для кожного сектора потужність передавача БС на 10 дБм. Змоделювати радіопокриття БС за рівнем сигналу. Відзначити вплив потужності передавача БС на покриття.

7. Об'єднавши передавачі БС у групу (див. рис. 4.22), виконати моделювання радіопокриття, що створюється окремими секторами даної БС.

8. Обравши місце розташування іншої БС, задати тип БС з одним сектором. Перейшовши до вікна конфігурації БС, створити нову конфігурацію, натиснувши «Add». Задати висоту підвісу антени (5 м) та обрати модель антени, що відповідає завданню.

9. Змоделювати радіопокриття, що створюється БС з одним сектором.

10. Використовуючи інформацію про антени з вкладки «Data» → «Antennas», замалювати діаграми направленості використаних двох антен. Записати інші параметри: частотний діапазон, виробника, коефіцієнт підсилення, величину нахилу антени у вертикальній площині.

Зміст звіту

1. Номер та тема роботи на титульному аркуші.
2. Мета роботи та порядок виконання роботи на наступному аркуші.
3. Результати виконання роботи: за п.3-6 – конфігурації БС та радіопокриття за рівнем сигналу; висновки за п.5-6; за п.7 – радіопокриття за окремими секторами даної БС; за п.8-9 – конфігурація БС та радіопокриття за рівнем сигналу; за п.10 – параметри використовуваних антен.

Контрольні запитання

1. Що означають терміни urban, suburban та rural в шаблонах БС?
2. Які параметри БС можна змінювати у вікні конфігурації?
3. Як виконати моделювання радіопокриття за рівнем сигналу? А за окремими секторами БС?
4. Як змінюється площа радіопокриття в результаті збільшення висоти підвісу антени БС та зменшення потужності передавачів кожного сектору БС?

5. Якщо БС розташована на даху чи фасаді будинку, як обчислюється висота антени БС відносно поверхні землі в кожному з цих випадків?

6. Чим відрізняються дві антени, описані нижче: 65deg 17dBi 6Tilt 1800MHz та 30deg 18dBi 0Tilt 1800MHz?

Лабораторна робота №3

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОПОКРИТТЯ СИСТЕМИ GSM НА ЗАДАНІЙ ТЕРИТОРІЇ В ATOLL

Мета роботи: отримати навички моделювання радіопокриття системи GSM в програмі Atoll.

Теоретичні відомості

Перед тим, як розташовувати БС на цифровій карті місцевості, потрібно визначити необхідну кількість БС для забезпечення абонентської ємності на заданій території.

Якщо є карта розподілу інтенсивності трафіку на вказаній території, то програма Atoll може підрахувати кількість БС самостійно. Але часто такі карти є недоступними, тому визначення кількості БС проводять вручну. Для цього потрібно виконати такі розрахунки.

1. Визначити загальну кількість частотних каналів, які виділено для розгортання мережі стільникового зв'язку:

$$n_k = \text{int} \left(\frac{F}{\Delta f_k} \right),$$

де F – смуга частот, виділена оператору за умовами ліцензії для розгортання системи стільникового зв'язку, МГц;

Δf_k – смуга частот одного радіоканалу, кГц.

2. Визначити кількість частотних каналів для обслуговування абонентів в одному секторі одного стільника:

$$n_{\text{чк}_c} = \text{int} \left(\frac{n_k}{M \cdot C} \right),$$

де M – кількість секторів у стільнику;

C – розмір кластеру.

3. Визначити кількість потенційних абонентів:

$$N_A = Z \cdot \mu \cdot \rho \cdot S,$$

де Z – запланована доля ринку ($Z = 80\%$, не враховуючи населення, старше 12 років, та літніх людей), для GSM-900 доля ринку може складати менше 50% через низьку абонентську ємність;

μ – проникність даного типу сервісу в Україні (для стільникового зв'язку $\mu=1,1$);

ρ – щільність населення, чол./км², розраховується як відношення кількості населення в місті $N_{\text{нас}}$ до площі території, яку займає місто, $S_{\text{тер}}$;

S – площа території, на якій розгортають систему стільникового зв'язку, км².

4. Визначити необхідну пропускну здатність мережі для якісного обслуговування N_A абонентів (загальний трафік в мережі):

$$A_A = N_A \cdot A_0,$$

де A_0 – інтенсивність трафіку, що генерується одним абонентом, Ерл;

5. Визначити інтенсивність трафіку, що створюється однією БС.

Для цього спочатку треба визначити кількість фізичних каналів в стільнику:

$$N_{\text{фк}_\text{ст}} = M \cdot n_{\text{чк}_\text{ст}} \cdot N_{\text{фк}_\text{чк}},$$

де $N_{\text{фк}_\text{чк}}$ – кількість фізичних каналів в одному радіоканалі (для системи GSM $N_{\text{фк}_\text{чк}} = 8$).

Для визначення інтенсивності трафіку $A_{\text{БС}}$, що створюється однією БС, потрібно скористатися таблицею першої формули Ерланга – Erlang B (див. додаток А) або калькулятором Ерланга, наданого викладачем, куди потрібно

ввести значення ймовірності блокування виклику $P_{\text{бл}}$ та знайдену кількість фізичних каналів в стільнику $N_{\text{фк_ст}}$.

6. Визначити кількість базових станцій:

$$N_{\text{BC}} = \frac{A_{\text{A}}}{A_{\text{BC}}}.$$

7. Визначити радіус стільника:

$$R_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{2S}{3\sqrt{3}N_{\text{BC}}}}.$$

Виконавши вищезазначені розрахунки, можна переходити до встановлення БС на місцевості.

Об'єктами встановлення БС можуть бути виробничі, адміністративні, житлові будівлі і будівлі суспільного призначення. Антени можуть встановлюватись на спеціальні металоконструкції на дахах і стінах будівель, на освітлювальних опорах, димарях.

Важливо! Розташування БС повинно відповідати стільниковій структурі, тому обладнання БС може встановлюватись **не на найвищих** спорудах в даній місцевості.

Щоб стільникова структура відображалась в програмі Atoll, перед тим, як розташовувати БС на карті місцевості, необхідно поставити позначку навпроти «Hexagonal Design» на вкладці «Data» (рис. 4.29).

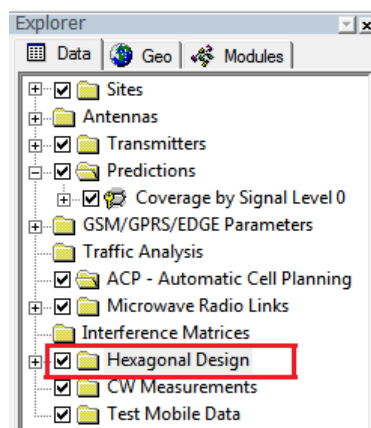


Рисунок 4.29 – Відображення стільникової структури на карті

У вікні налаштування параметрів БС необхідно обов'язково вказати обчислений радіус стільника в полі «Hexagon Radius» (рис. 4.30). Інші налаштування встановлюють відповідно до знань, отриманих під час виконання попередньої лабораторної роботи.

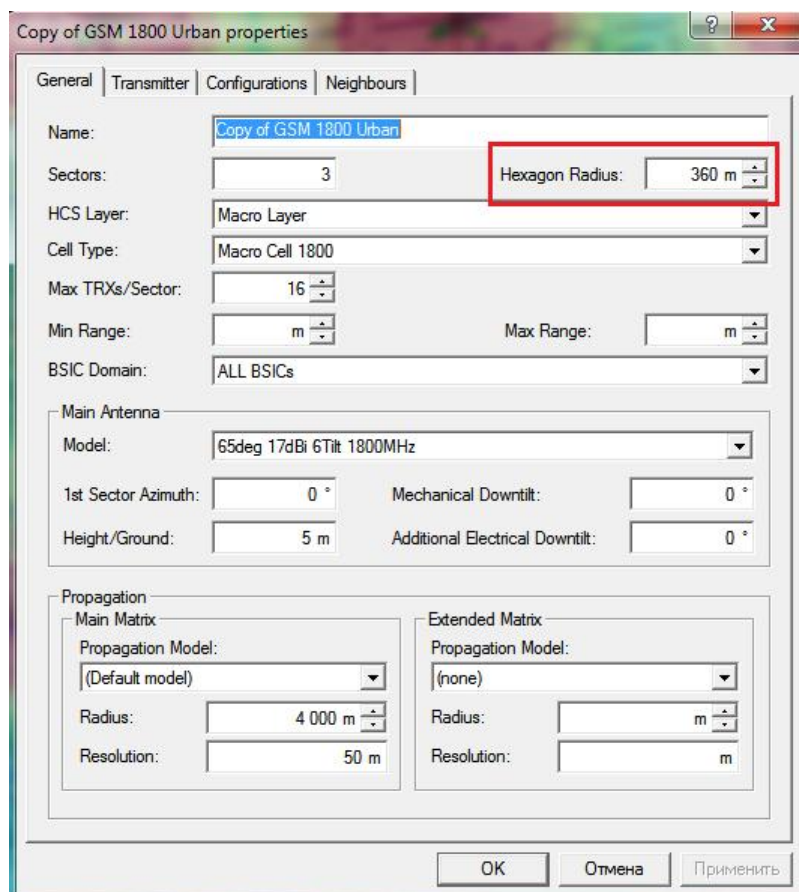


Рисунок 4.30 – Встановлення значення радіусу стільника

По закінченні процедури розташування базових станцій треба провести моделювання радіопокриття за рівнем сигналу (Coverage by signal level) та проаналізувати статистику радіопокриття за рівнем сигналу (рис. 4.31-4.32).

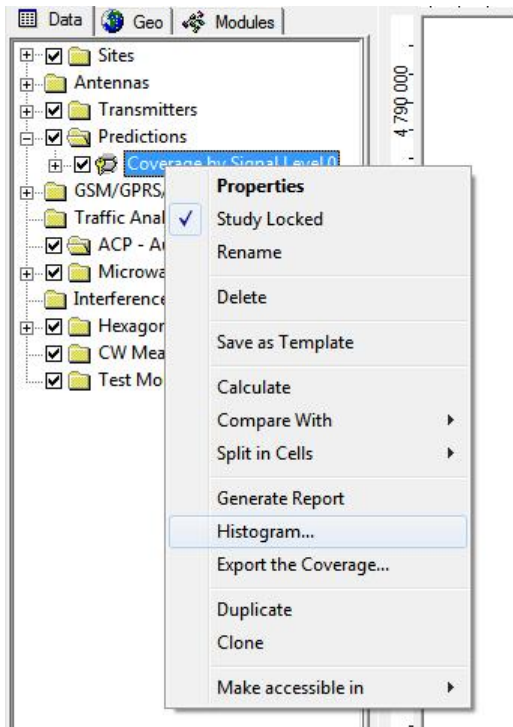


Рисунок 4.31 – Виклик статистики радіопокриття за допомогою гістограми

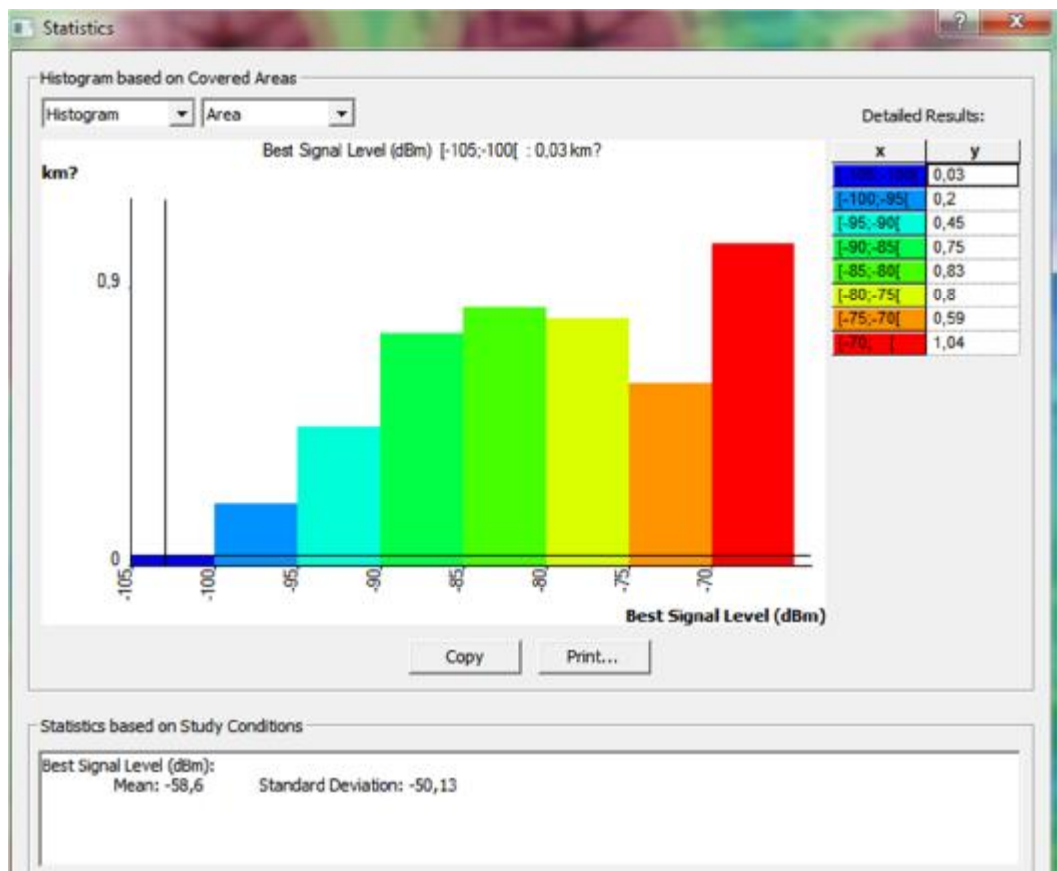


Рисунок 4.32 – Статистика радіопокриття за рівнем сигналу

Більше статистичних даних для аналізу покриття можна отримати, клацнувши правою кнопкою миші на опції «Coverage by signal level0» та вибравши не пункт «Histogram», а «Generate Report» (рис. 4.31).

Моделювання радіопокриття вважають завершеним, якщо відсоток територія покриття з рівнем сигналу менше -100 дБм (нижче порогу чутливості МС) не перевищує 10%. В іншому випадку потрібно спробувати або змінити висоту підвісу антени БС, або місце розташування обладнання БС (наприклад, перенести БС на сусідню більш високу будівлю) , або додати ще одну БС на ту частину території, де покриття відсутнє.

Завдання на лабораторну роботу

Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття GSM/GPRS/EGPRS. Завантажити в нього цифрові карти місцевості відповідно до варіанту завдання та виконати попередній розрахунок кількості БС і радіусу стільника, використовуючи параметри, наведені в табл. 4.1.

Розташувати базові станції на цифровій карті місцевості, приблизно дотримуючись стільникової структури. Виконати моделювання радіопокриття системи GSM на заданій території.

Викликати статистику радіопокриття за рівнем сигналу на заданій місцевості та визначити доцільність зміни розташування окремих БС чи значення висоти підвісу антени для певних БС.

Таблиця 4.1 – Початкові дані до лабораторної роботи №3

Бригада №	F , МГц	Система	M	C	Місто	$N_{\text{нас}}$, чол.	$S_{\text{тер}}$, км ²	A_0 , Ерл	$P_{\text{бл}}$, %
1	15	GSM 1800	3	4	Алмати	1 434 755	451	0,1	2
2	8	GSM 900	3	3	Будапешт	1 736 000	525	0,1	2
3	10	GSM 1800	3	4	Єреван	3764,31 ²		0,05	3
4	10	GSM 900	3	3	Софія	1 359 520	492	0,05	3
5	18	GSM 1800	3	4	Таллінн	416 993	159	0,1	5
6	15	GSM 900	3	3	Тегеран	8 778 535	707	0,1	5

Порядок виконання роботи

1. Виконати попередній розрахунок кількості БС і радіусу стільника, використовуючи параметри системи зв'язку відповідно до варіанту завдання, наведені в табл. 4.1.

2. Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття GSM/GPRS/EGPRS.

3. Імпортувати в проект цифрові карти місцевості - карти висот рельєфу та забудови (height.grd та build(ings).grd), карти об'єктів-перешкод (buildings.TAB, vegetation.TAB), інші векторні карти місцевості (highway.TAB, inlandwater.TAB, majorroad.TAB, streets.TAB, freeway.TAB та ін.).

4. Розташувати базові станції на цифровій карті місцевості, приблизно дотримуючись стільникової структури та використовуючи отриману в результаті розрахунків інформацію про кількість БС та радіус стільника. Встановити значення висоти підвісу антени БС рівним 2 м.

5. Виконати моделювання радіопокриття системи GSM за рівнем сигналу на заданій території.

6. Викликати статистику радіопокриття за рівнем сигналу на заданій місцевості (див. рис. 4.31). Проаналізувати гістограму радіопокриття за рівнем

² Вказана щільність населення в чол./км²

сигналу та визначити доцільність подальшої зміни розташування окремих БС чи значення висоти підвісу антени для певних БС.

7. У випадку необхідності виконати оптимізацію мережі, змінивши або висоту підвісу антени БС (збільшити до 5-6 м у випадку низьких будівель), або місце розташування обладнання БС (наприклад, перенести БС на сусідню більш високу будівлю) , або додавши ще одну БС на ту частину території, де покриття відсутнє.

Зміст звіту

4. Номер та тема роботи на титульному аркуші.
5. Мета роботи та порядок виконання роботи на наступному аркуші.
6. Результати виконання роботи: за п.1 – результати розрахунку кількості БС і радіусу стільника; за п.4 – розташування БС на карті місцевості з зображенням стільникової структури мережі; за п.5 – радіопокриття системи GSM за рівнем сигналу; за п.6 – гістограма покриття за рівнем сигналу; за п.7 – покращене радіопокриття та гістограма, що це підтверджує.

Контрольні запитання

1. Які два способи визначення кількості БС вам відомі?
2. Як визначають кількість потенційних абонентів системи GSM?
3. Як визначити інтенсивність трафіку, що створюється однією БС?
4. Що таке ймовірність блокування виклику?
5. Яка система зв'язку матиме потенційно більшу абонентську ємність – GSM-900 чи GSM-1800? Чому?
6. Як в програмі Atoll увімкнути відображення стільникової структури?
7. Що є критерієм успішного завершення моделювання радіопокриття?

Лабораторна робота №4

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ ЛІНІЇ ДЛЯ ОБ'ЄДНАННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ В МЕРЕЖУ

Мета роботи: отримати навички об'єднання базових станцій в мережу за допомогою радіорелейних ліній зв'язку, а також створення та аналізу профілю радіотраси в програмі Atoll.

Теоретичні відомості

Для зв'язку базових станцій БС з контролером найчастіше використовують орендовані стаціонарні лінії зв'язку. Проте ці лінії не завжди доступні в потрібній кількості, а тому оператор часто вимушений організувати потоки власними засобами. Прокладання власних стаціонарних ліній, особливо в умовах міста, в більшості випадків нераціональне і економічно не вигідне. Найкращим способом вирішення цієї проблеми є організація власної **радіорелейної мережі**, що є сукупністю приймально-передавальних пристроїв та антен з вузькою спрямованістю випромінювання.

Одним з прикладів радіорелейного обладнання, призначеного для стільникових мереж, є обладнання Mini Link фірми Ericsson. Система радіорелейного зв'язку Ericsson Mini Link призначена для передавання на невеликі відстані (максимальна відстань - декілька десятків кілометрів), що ідеально підходить для з'єднання БС між собою і з контролером. Легка радіорелейна система характеризується невеликими габаритними розмірами, що полегшує вимоги щодо її встановлення.



Рисунок 4.33 – Вигляд виносної підсистеми Ericsson Mini Link

Ericsson Mini Link складається з *антенного радіомодуля, параболічного дзеркала* (виносна підсистема) і *модуля доступу* (підсистема, що розміщується в приміщенні) (рис. 4.33). Підсистеми зв'язані між собою коаксіальним кабелем. Радіомодуль можна розмістити на будь-якому високому будинку чи щоглі, потрібно лише забезпечити **пряму видимість** між щоглами.

Модуль доступу є незалежним від частотної смуги і містить модем, комутатор/мультиплексор та сервісний блок, який дозволяє стежити за станом зв'язку всієї радіорелейної мережі.

Існує два основні способи під'єднання БС до контролера (рис. 4.34):

- деревоподібне під'єднання;
- сіткоподібне під'єднання.

У випадку деревоподібного під'єднання вихід з ладу хоча б однієї з ділянок може призвести до одночасної втрати зв'язку з кількома станціями, проте такий спосіб є більш вигідний з економічної точки зору. Сіткоподібне під'єднання характеризується високою надійністю, проте вимагає великих економічних затрат. Тому на практиці переважно використовують комбінацію цих двох способів під'єднання: деревоподібне з'єднання базових станцій з петлею.

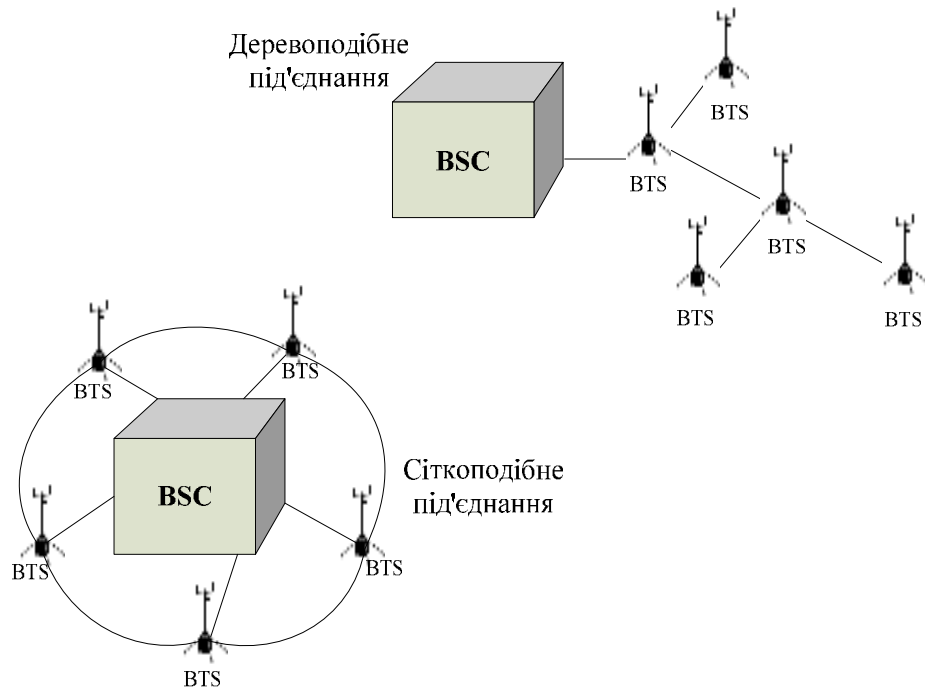


Рисунок 4.34 – Способи під'єднання базових станцій до контролера BSC

В цілому, використання власних радіорелейних ліній зв'язку вирішує проблеми з'єднання з новими базовими станціями, а також дозволяє забезпечувати необхідні обхідні шляхи та резервування у випадку виходу з ладу окремих БС.

Для організації радіорелейної лінії між двома БС в програмі Atoll спочатку необхідно задати систему координат, що відповідає географічному місцю розташування мережі (Tools → Options, вкладка «Coordinates», рис. 4.35).

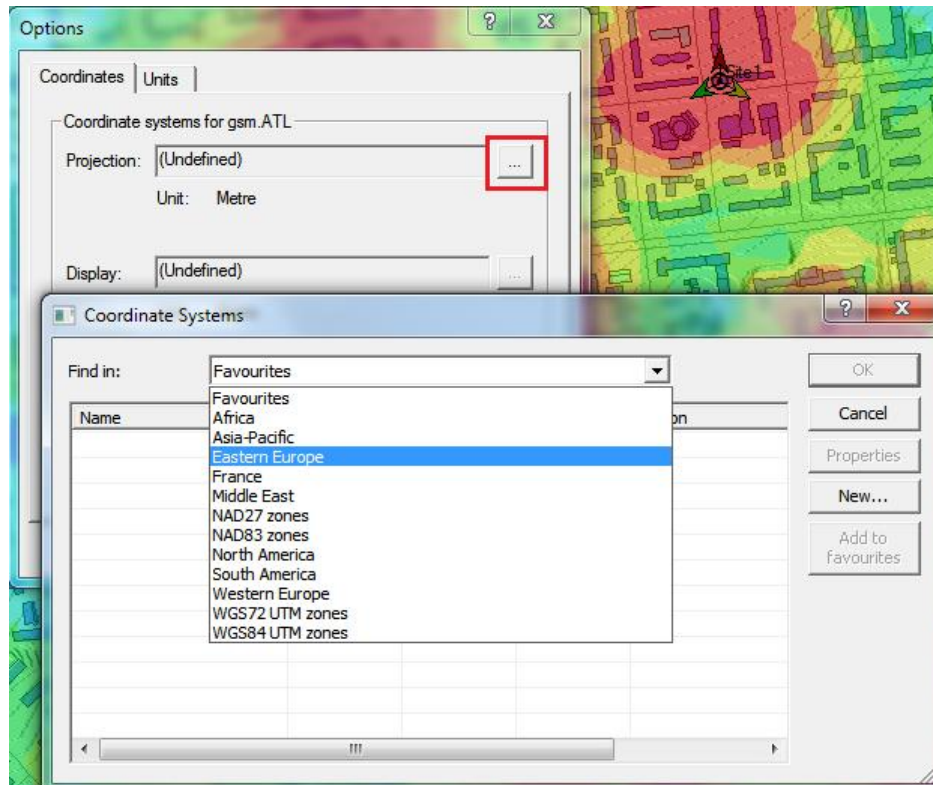


Рисунок 4.35 – Вибір системи координат

Перед створенням радіорелейної лінії необхідно внести деякі зміни до існуючого проекту:

- необхідно на цифровій карті місцевості (Digital Terrain Model, вкладка «Geo») видалити карту висот рельєфу «height», залишивши лише висоти будівель «buildings», інакше профіль радіолінії не буде відображатись коректно (рис. 4.36), при цьому бажано зробити шар Digital Terrain Model невидимим, знявши відповідну позначку навпроти нього;
- вимкнути результати моделювання радіопокриття за рівнем сигналу, знявши відповідну позначку у вкладці «Data».

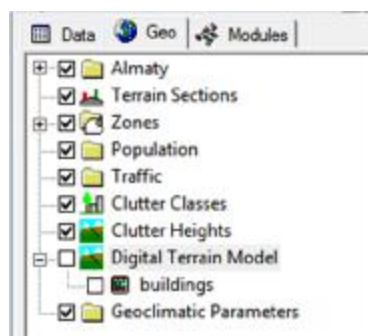


Рисунок 4.36 – Вигляд вкладки «Geo» після видалення карти висот

Для створення радіорелейної лінії (РРЛ) між двома БС необхідно на панелі роботи з конфігурацією РРЛ (рис. 4.36) обрати опцію «Height Profile», вказати БС, між якими заплановано прокладання РРЛ, клацнути правою кнопкою миші на лінії, яка щойно з'явилася, обрати пункт «Create Link» (рис. 4.37).

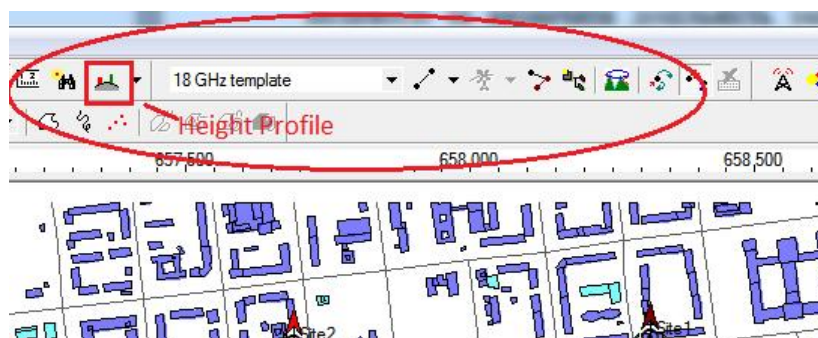


Рисунок 4.36 – Панель конфігурації РРЛ

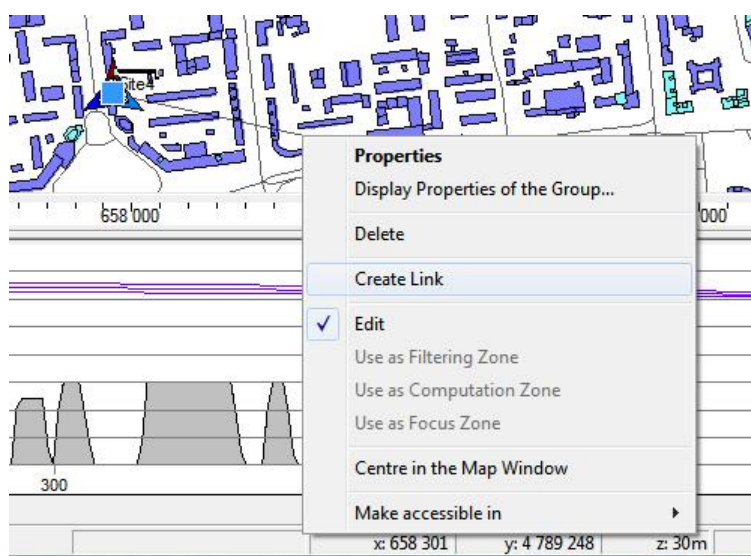


Рисунок 4.37 – Створення РРЛ

В початкових налаштуваннях висота підвісу антени РРЛ дорівнює 50 м. Проте насправді антена розташована на такій же висоті, що й антени БС. Змінити цей параметр можна, двічі клацнувши на РРЛ та знайшовши пункт «Antenna, Height/Ground» у вкладці «Radio». Слід зауважити, що висоту антени треба змінювати для обох сайтів, які утворюють РРЛ. В результаті отримаємо профіль радіолінії, як показано на рис. 4.38.

Як видно з рис. 4.38. на шляху передавання сигналу є три перешкоди. В такому випадку прямої видимості між передавачем та приймачем РРЛ немає, тому вона функціонувати не буде. Для вирішення цієї проблеми використовують пристрої, які називають повторювачами (Repeaters). Для встановлення повторювача необхідно клацнути на лінії РРЛ правою кнопкою миші, обрати «Insert Repeater» та вказати місце його розташування так, щоб забезпечити пряму видимість між повторювачем та обома сайтами РРЛ (рис. 4.39).

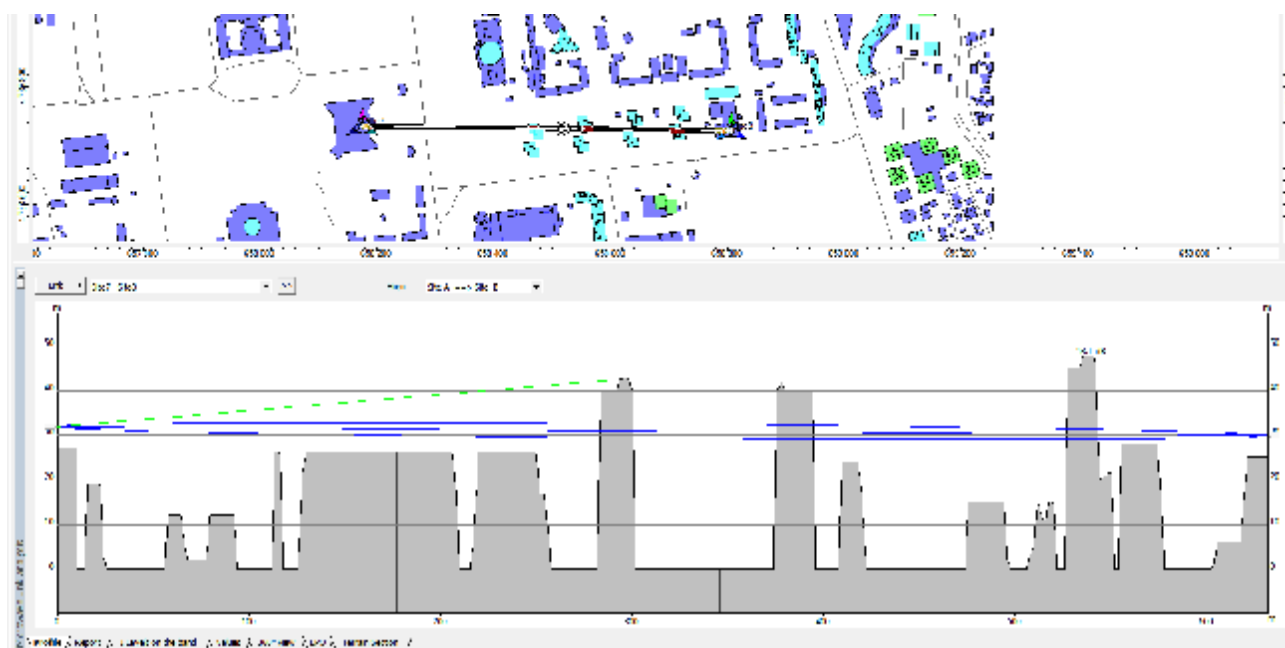


Рисунок 4.38 – Профіль РРЛ

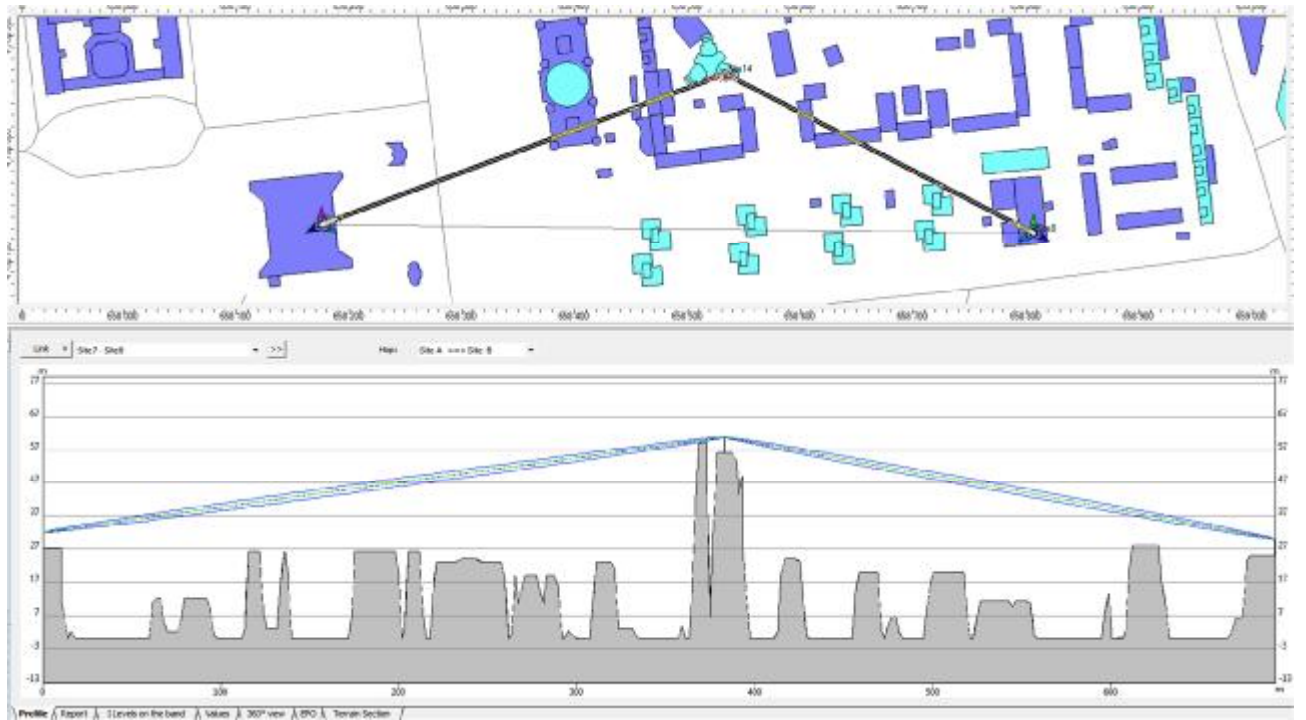


Рисунок 4.39 – Профіль РРЛ з повторювачем

В початкових налаштуваннях висота підвісу антени повторювача РРЛ дорівнює 30 м. Змінити висоту антени можна, двічі клацнувши на РРЛ та виконавши вказівки, показані на рис. 4.40.

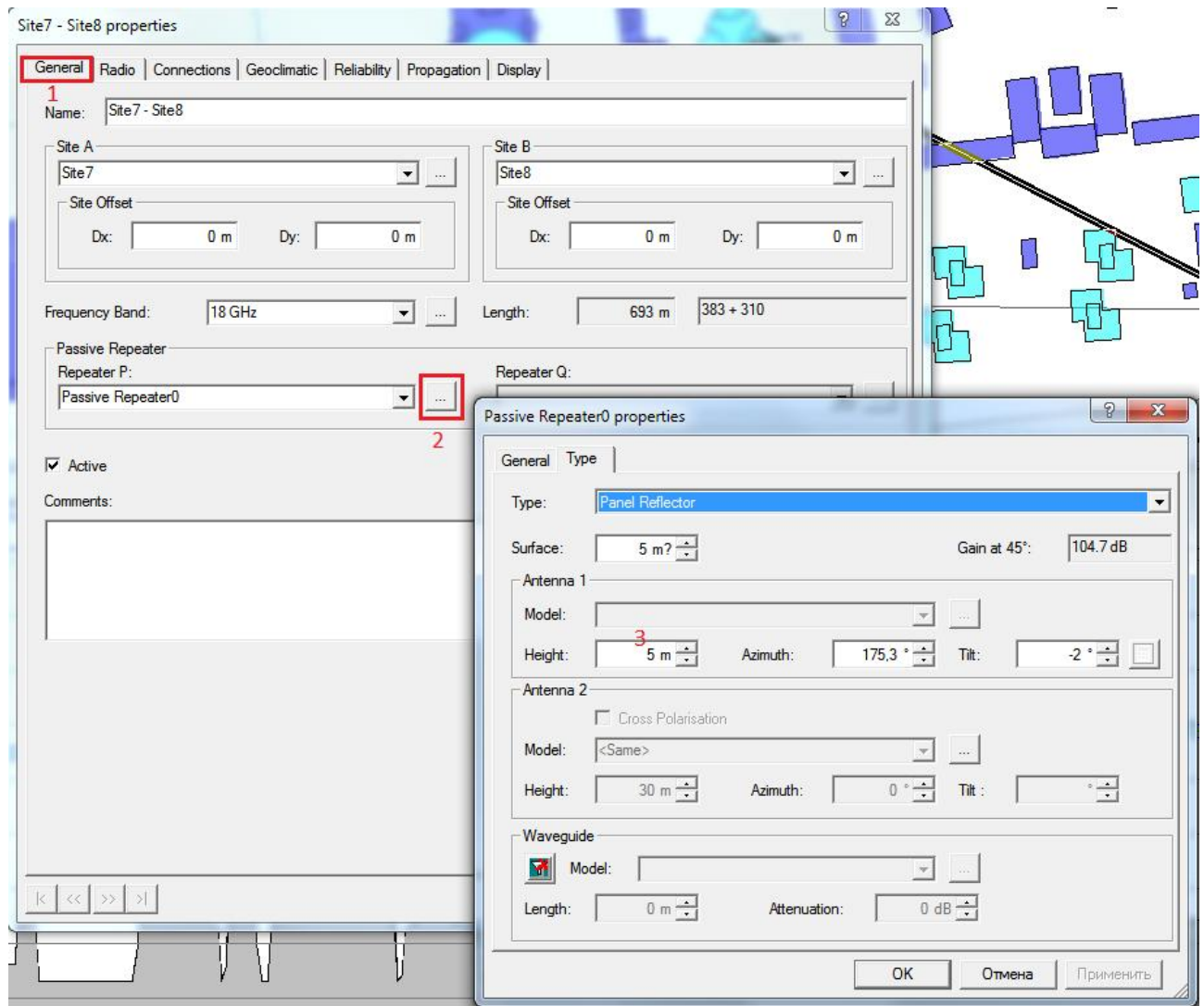


Рисунок 4.40 – Зміна висоти антени повторювача РРЛ

Виконуючи аналогічні дії, можна забезпечити підключення всіх БС мережі до контролера, використовуючи схеми, показані на рис. 4.34.

Завдання на лабораторну роботу

Використовуючи проект з попередньої лабораторної роботи, виконати підключення базових станцій до контролера за допомогою радіорелейних ліній зв'язку.

Забезпечити пряму видимість між усіма приймально-передавальними модулями РРЛ, застосовуючи повторювачі. Кількість повторювачів на радіолінії між двома сайтами повинна бути не більше одного. Підключення виконати за деревоподібною схемою.

Записати параметри приймально-передавальних модулів та антен, а також повторювачів.

Порядок виконання роботи

1. Відкрити проект Atoll, створений в попередній лабораторній роботі.
2. Задати систему координат, що відповідає географічному місцю розташування мережі (Tools → Options, вкладка «Coordinates», див. рис. 4.35).
3. Видалити карту висот рельєфу «height», залишивши лише висоти будівель «buildings» (див. рис. 4.36), при цьому бажано зробити шар Digital Terrain Model невидимим, знявши відповідну позначку навпроти нього; вимкнути результати моделювання радіопокриття за рівнем сигналу, знявши відповідну позначку у вкладці «Data».
4. Обравши БС в центрі зони покриття, створити РРЛ між цією БС та сусідніми БС за деревоподібною схемою. Встановити висоту підвісу антен РРЛ аналогічною до висоти підвісу антен БС.
5. Перевірити наявність прямої видимості між приймально-передавальними модулями створених РРЛ. Навести профілі створених РРЛ.
6. У випадку відсутності прямої видимості додати повторювачі, при чому кількість повторювачів на радіолінії між двома сайтами повинна бути не більше одного. Встановити висоту підвісу антен повторювачів аналогічною до висоти підвісу антен БС.
7. Навести профілі тих ділянок РРЛ, де було використано повторювачі.
8. Навести карту мережі з підключеними БС за допомогою РРЛ і записати параметри приймально-передавальних модулів та антен, а також повторювачів (див. вікно «Site – Site Properties», вкладки «General» і «Radio»).

Зміст звіту

1. Номер та тема роботи на титульному аркуші.
2. Мета роботи та порядок виконання роботи на наступному аркуші.

3. Результати виконання роботи: за п.3 – карта місцевості з встановленими БС; за п.4-5 – РРЛ та їх профілі для утворених ліній, що сполучають всі БС; за п.6-7 – РРЛ з повторювачами та їх профілі; за п.8 – карта місцевості з встановленими БС та показаними РРЛ, параметри обладнання РРЛ – антен, приймально-передавальних модулів та повторювачів.

Контрольні запитання

1. Які два способи підключення БС до мережі ви знаєте? В яких випадках з цією метою використовують радіорелейні лінії зв'язку?
2. Що таке РРЛ?
3. Який склад обладнання РРЛ Mini Link фірми Ericsson?
4. В чому полягає умова функціонування РРЛ та як її забезпечити в реальних умовах?
5. Як створити РРЛ між двома сайтами в програмі Atoll?
6. Що таке профіль РРЛ?
7. Як встановити повторювач для радіолінії в програмі Atoll?

Лабораторна робота №5

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ В ATOLL

Мета роботи: отримати навички налаштування моделей поширення радіохвиль (ПРХ) для моделювання радіопокриття в програмі Atoll; з'ясувати призначення та особливості застосування моделей ПРХ, описаних в програмі.

Теоретичні відомості

В попередніх лабораторних роботах моделювання радіопокриття базових станцій здійснювалося для моделей ПРХ, які визначалися програмою за замовчуванням. Насправді необхідно перед початком моделювання вказати модель, яка найбільше відповідає вимогам системи зв'язку та початковим умовам проекту.

Програма Atoll використовує 11 моделей ПРХ, які відповідають широкому спектру безпроводових телекомунікаційних систем різного призначення – від наземних та морських рухомих служб, які працюють в діапазонах частот нижче 400 МГц, до мікрохвильових ліній зв'язку (РРЛ), що використовують частоти до 10000 – 18000 МГц, з рухомими та фіксованими (нерухомими) абонентськими приймачами. Перелік моделей ПРХ для програми Atoll з особливостями їх застосування наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Моделі ПРХ, які застосовують в Atoll

Модель ПРХ	Частотний діапазон	Дані, що беруться до уваги	Рекомендоване застосування
Longley-Rice (теоретична)	~ 40 МГц	- Профіль місцевості	- Рівнинні області - Дуже низькі частоти
ITU 370-7 Vienna 93	100-400 МГц	- Профіль місцевості	- Значні відстані ($d > 10$ км) - Низькі частоти
ITU 1546	30 - 3000 МГц	- Профіль місцевості	$1 < d < 1000$ км > Радіомовлення > Наземні та морські рухомі служби
ITU 526-5 (теоретична)	30- 10000 МГц	- Профіль місцевості	- Фіксовані приймачі
WLL	30-10000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - детерміновані перешкоди	- Фіксовані приймачі: > Мікрохвильові лінії > WiMAX
Okumura-Hata	150 - 1000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	$1 < d < 20$ км > GSM 900 > CDMA2000 > LTE
Cost-Hata	1500 - 2000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	$1 < d < 20$ км > GSM 1800 > UMTS > LTE
ITU 529-3	300- 1500 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	$1 < d < 100$ км > GSM 900 > CDMA2000 > LTE

Продовження таблиці 4.2

Модель ПРХ	Частотний діапазон	Дані, що беруться до уваги	Рекомендоване застосування
Standard Propagation Model	150-3500 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди	$1 < d < 20$ км > GSM 900 > GSM 1800 > UMTS > CDMA2000 > WiMAX > LTE (доступне автоматичне калібрування моделі)
Erceg- Greenstein (SUI)	1900 - 6000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди (на стороні приймача)	- Міські і приміські області, $100 \text{ м} < d <$ 8 км > Фіксований WiMAX
Sakagami Extended	3000 - 8000 МГц	- Профіль місцевості - Дифракція - статистичні перешкоди	$1 < d < 20$ км > WiMAX (доступне автоматичне калібрування моделі)

Слід звернути увагу на такі особливості моделей:

- деякі моделі описують втрати лише для *нерухомих* (фіксованих) абонентських приймачів;
- більшість моделей для розрахунку величини втрат використовує як *профіль місцевості* (тобто інформацію, отриману з карти висот – DTM), так і інформацію про *тип перешкод* на місцевості (clutter);
- багато моделей може враховувати *дифракцію* радіохвиль на шляху від передавача до приймача.

Докладна інформація про розрахунок величини втрат та врахування дифракції для наведених в табл. 4.2 моделей ПРХ наведена в файлі **Atoll_User_Manual.pdf** (с. 170-184), який був наданий викладачем разом з програмою.

Щоб в програмі Atoll задати модель ПРХ, яка буде використовуватись для всього проекту в цілому, необхідно у вікні «Explorer» обрати вкладку «Data», там клацнути правою кнопкою миші на опції «Predictions» → «Properties». З'явиться вікно, показане на рис. 4.41, де у вкладці Predictions треба вказати модель ПРХ, яка буде застосована до всього проекту за замовчуванням.

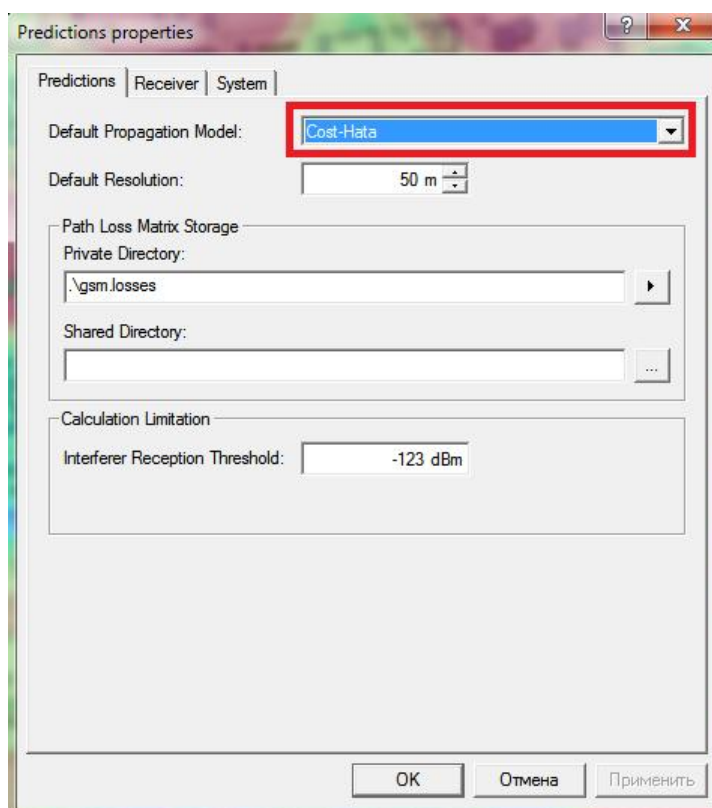


Рисунок 4.41 – Налаштування моделі ПРХ для всього проекту

Вказавши модель ПРХ для всього проекту, можна призначити відповідну модель для всіх передавачів в проекті, як показано рис. 4.42. Для цього у вкладці «Data» клацнути правою кнопкою миші на опції «Transmitters» → «Properties» та вказати як модель поширення Default Model, тобто встановлену за замовчуванням для всього проекту.

Можна призначити модель ПРХ для *групи передавачів* окремої БС (рис. 4.43). Для цього треба згрупувати передавачі за певною ознакою, наприклад, за сайтом – у вкладці «Data» клацнути правою кнопкою миші на опції «Transmitters» → «Group by» → «Site», потім обрати потрібний сайт, клацнути на ньому правою кнопкою миші та обрати «Open Table», відшукати стовпчик «Main Propagation Model» і обрати потрібну модель для кожного передавача.

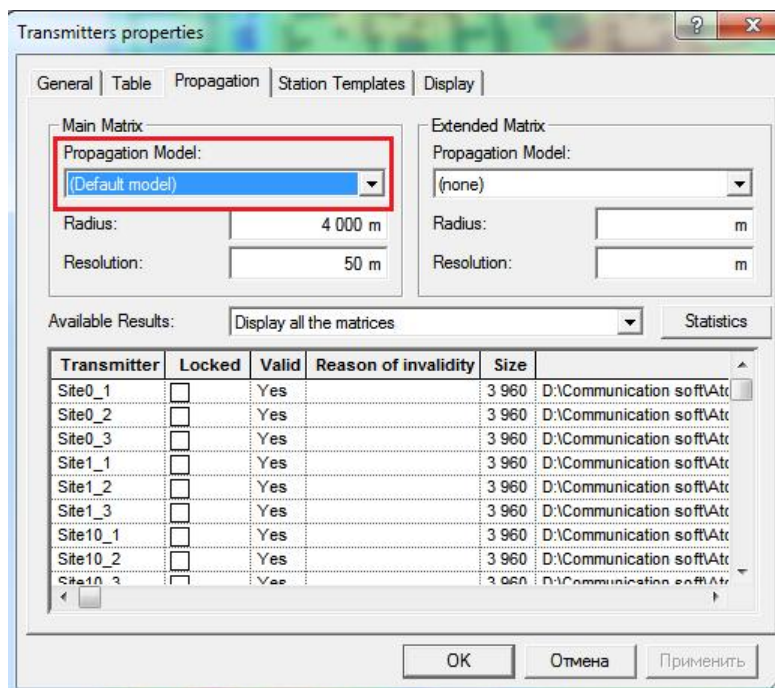


Рисунок 4.42 – Встановлення моделі ПРХ для всіх передавачів проекту

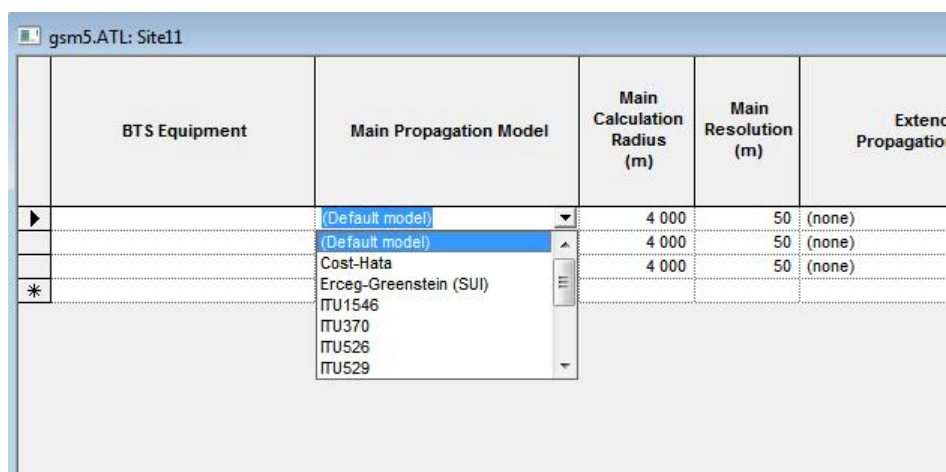


Рисунок 4.43 – Встановлення моделі ПРХ для групи передавачів однієї

БС

Важливо! Роздільну здатність матриці втрат (Resolution) потрібно задавати **лише** під час створення нового покриття («Predictions» → «New» → «Coverage by Signal Level» → «Properties») (рис. 4.44).

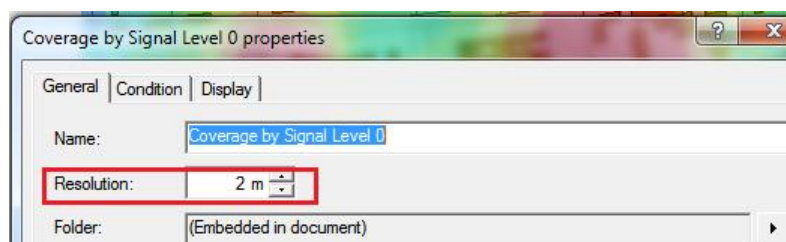


Рисунок 4.44 – Налаштування роздільної здатності матриці втрат

Параметри моделі, яка буде використовуватись для моделювання покриття, можна змінювати. Для цього треба у вікні «Explorer» обрати вкладку «Modules» та клацнути двічі на потрібній моделі. З'явиться вікно властивостей моделі (рис. 4.45, кроки 1-3).

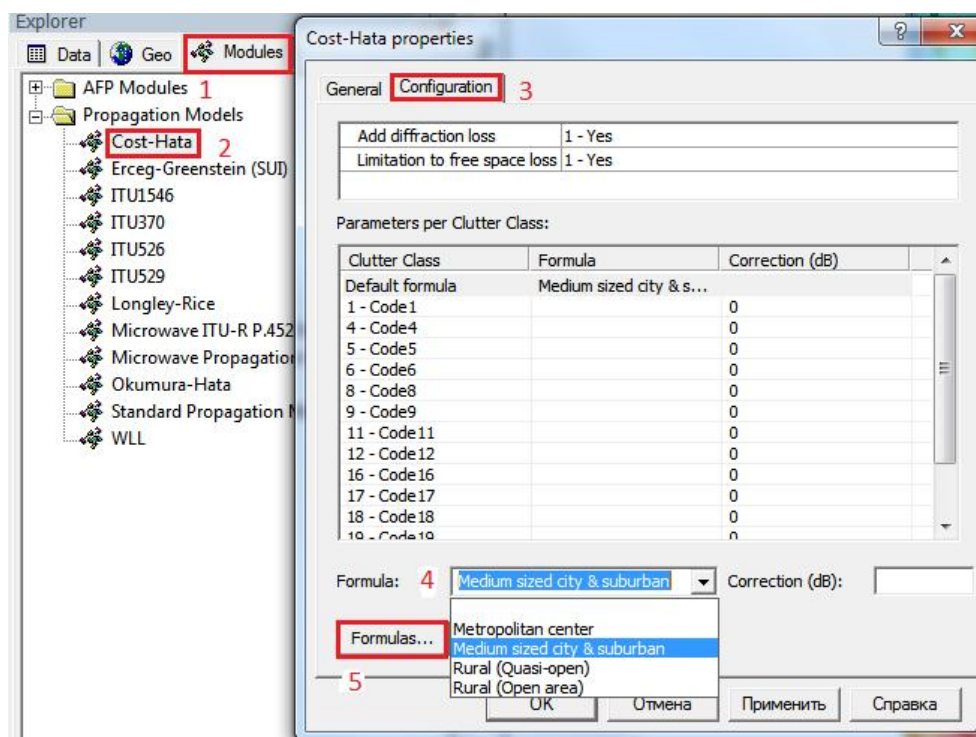


Рисунок 4.45 – Вікно властивостей моделі

В ньому можна вказати формулу, яка буде використовуватись за замовчуванням для цієї моделі (4), а також переглянути і за необхідності відредагувати закладені в модель вирази (5).

Важливо! Оскільки більшість моделей для розрахунку величини втрат використовує як інформацію, отриману з карти висот – DTM, так і інформацію про *тип перешкод* на місцевості (clutter), рекомендовано завантажувати окрім карти висот рельєфу height.grd, ще й карту перешкод та шумів clutter.grc.

Завдання на лабораторну роботу

Використовуючи проект з лабораторної роботи №3, дослідити особливості застосування моделей ПРХ для моделювання радіопокриття.

Змоделювати радіопокриття, використовуючи моделі, наведені в табл. 4.3. Для цього встановити модель ПРХ для всього проекту в цілому та для всіх передавачів у проекті. Задати у властивостях моделі формулу, яка буде використовуватись за замовчуванням для цієї моделі та відповідатиме характеру місцевості відповідно до варіанту.

Проаналізувати статистику покриття та зробити висновки про характер розподілу рівнів сигналу на заданій території, отриманий за допомогою Моделі 1 та Моделі 2.

Змінити формулу за замовчуванням на таку, яка не відповідає заданому характеру місцевості, вказавши, наприклад, формулу для відкритої місцевості (rural) або щільної міської забудови (dense urban) тощо. Спостерігати зміни у розподілі рівнів сигналу. Зробити відповідні висновки.

Таблиця 4.3 – Початкові дані до лабораторної роботи №5

Бригада №	Система	Місто	Модель 1	Модель 2
1	GSM 1800	Алмати	Standard Propagation Model	Cost-Hata
2	GSM 900	Будапешт	Okumura-Hata	ITU 529-3
3	GSM 1800	Єреван	Standard Propagation Model	Cost-Hata
4	GSM 900	Софія	Okumura-Hata	ITU 529-3
5	GSM 1800	Таллінн	Standard Propagation Model	Cost-Hata
6	GSM 900	Тегеран	Okumura-Hata	ITU 529-3

Порядок виконання роботи

1. Відкрити проект Atoll, створений у лабораторній роботі №3.
2. Додати до проекту карту перешкод та шумів clutter.grc.
3. Встановити для усього проекту в цілому та для всіх передавачів у проекті модель ПРХ, що відповідає Моделі 1 (див. рис. 4.41 та 4.42).
4. Задати у властивостях моделі формулу, яка буде використовуватись за замовчуванням для Моделі 1 та відповідатиме характеру місцевості відповідно до варіанту, виконавши послідовно кроки, наведені на рис. 4.45.
5. Змодельювати радіопокриття за рівнем сигналу (Coverage by Signal Level), використовуючи Модель 1, та викликати статистику радіопокриття за допомогою гістограми (Coverage by Signal Level → Histogram).
6. Встановити для всього проекту в цілому та для всіх передавачів у проекті модель ПРХ, що відповідає Моделі 2.
7. Повторити виконання п.4-5.
8. Проаналізувати статистику покриття за рівнем сигналу для Моделі 1 і Моделі 2, зробити висновки про характер розподілу рівнів сигналу на заданій території, отриманий за допомогою цих моделей.
9. Змінити формулу за замовчуванням на таку, яка не відповідає заданому характеру місцевості, вказавши, наприклад, формулу для відкритої місцевості

(rural) або щільної міської забудови (dense urban) тощо. Спостерігати зміни у розподілі рівнів сигналу.

Зміст звіту

1. Номер та тема роботи на титульному аркуші.
2. Мета роботи та порядок виконання роботи на наступному аркуші.
3. Результати виконання роботи: за п.3-4 – скріншоти, що підтверджують налаштування Моделі 1; за п.5 – карта покриття та статистика покриття за рівнем сигналу, отримані за допомогою Моделі 1; за п.6-7 – скріншоти, що підтверджують налаштування Моделі 2, карта покриття та статистика покриття за рівнем сигналу, отримані за допомогою Моделі 2; за п.8 – висновки про характер розподілу рівнів сигналу на заданій території, отриманий за допомогою Моделей 1 і 2; за п.9 – скріншоти, що підтверджують зміну формули за замовчуванням, карта покриття та висновки про вплив зміни формули за замовчуванням на розподіл рівнів сигналу.

Контрольні запитання

1. Скільки моделей ПРХ використовує програма Atoll та які з цих моделей не можна застосувати для оцінки втрат в системах стільникового зв'язку?
2. Які моделі ПРХ можна використати для оцінювання втрат в системі GSM-900? В системі GSM-1800? Поясніть свою відповідь.
3. Які моделі ПРХ можна викорисовувати для фіксованого WiMAX?
4. Інформацію з яких карт використовують моделі ПРХ для визначення величини втрат?
5. Що таке дифракція та яким чином це явище враховується під час визначення втрат в програмі Atoll?
6. Яку інформацію можна отримати з вікна властивостей моделі ПРХ?
7. Як відредагувати формулу, що описує модель ПРХ в програмі Atoll?

Лабораторна робота №6

РОЗПОДІЛЕННЯ РОБОЧИХ ЧАСТОТ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ СИСТЕМИ GSM В ATOLL

Мета роботи: отримати навички налаштування частотних каналів та ідентифікаторів передавачів базових станцій, складання частотного плану системи та проведення точкового аналізу заводової ситуації засобами програми Atoll.

Теоретичні відомості

Смуга частот, виділена системі зв'язку, складається з частотних груп (frequency groups) і областей (frequency domain). Смуга частот визначається частотами, розподіленими для системи GSM/GPRS/EDGE на території обслуговування, зазначеній в проекті. Таким чином, її можна розглядати як фіксовану величину. З іншого боку частотні групи і області можна призначати та змінювати:

- частотна область складається з однієї чи кількох груп і є підмножиною смуги частот, виділеної системі зв'язку.

- частотна група являє собою певний набір частотних каналів.

У програмі Atoll передавачу базової станції призначають певний *ідентифікаційний код базової станції (BSIC)*. Поєднання ідентифікатора BSIC і номера частотного каналу BCCH точно визначає *передавач у заданому секторі*. Ідентифікатори BSIC відрізняються залежно від країни та регіону. BSIC складається з *кольорового коду мережі (NCC)* і *кольорового коду BTS (BCC)*. Ідентифікатори BSIC моделюються за допомогою областей і груп, які можуть призначатися та змінюватися:

- область BSIC складається з однієї чи кількох груп;
- група – це певний набір BSIC.

В Atoll можна розподіляти частоти і BSIC вручну або автоматично.

Важливо пам'ятати, що в процесі розподілення частот кількість частотних каналів $n_{\text{чк}_C}$ для передавача в заданому секторі відповідає кількості приймально-передавальних модулів TRX та визначається відповідно до кроків 1-2 алгоритму розрахунку кількості БС (див. лабораторну роботу №3).

Слід також пам'ятати, що частотні канали розподіляють лише в межах кластеру C (кількість стільників, де частотні групи не повторюються). Таким чином, територія обслуговування *може* містити певну кількість кластерів, де будуть використані частотні канали, що повторюються. Це спричинить виникнення інтерференційних завад (co-channel interference) між передавачами з однаковими частотами, які потрібно контролювати.

Розглянемо процедуру призначення **вручну** ідентифікаторів BSIC та частотних каналів для передавачів БС у програмі Atoll.

Спочатку необхідно призначити область BSIC та обрати з неї значення ідентифікатора BSIC для кожного передавача у секторі (рис. 4.46). Для цього треба в папці «Transmitters» обрати потрібний передавач (наприклад, Site0_1), натиснути на ньому правою кнопкою миші та обрати «Properties». Далі треба перейти на вкладку «TRXs», в полі «BSIC Domain» обрати «All BSICs», а в полі «BSIC» – значення ідентифікатора. Аналогічну процедуру треба повторити для всіх передавачів БС у проекті, присвоюючи їм різні значення ідентифікатора BSIC (бажано в межах одного десятка).

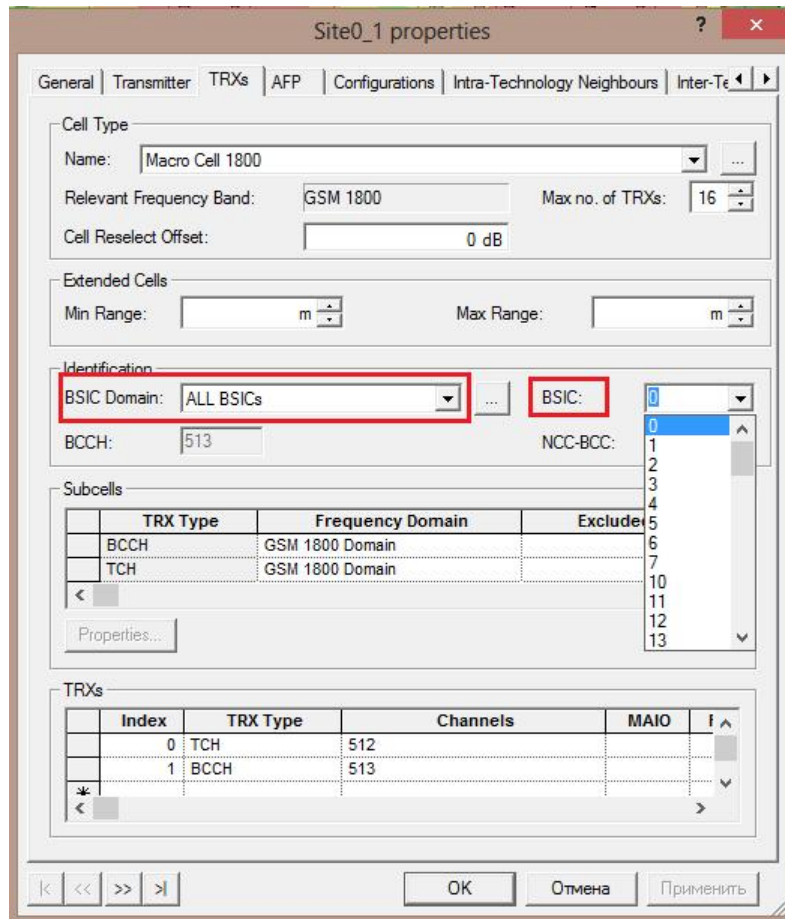


Рисунок 4.46 – Призначення області BSIC та ідентифікатора BSIC для передавача Site0_1

Присвоївши значення BSIC кожному передавачу, можна перейти до розподілення частотних каналів. Розглянемо, як виконати цю процедуру для всіх передавачів у проекті. Для цього треба клацнути правою кнопкою миші на папці «Transmitters», обрати опцію «Subcells» → «TRXs». Відкриється вікно, вигляд якого показано на рис. 4.47.

1	Transmitter	Index	2	TRX Type	3	Channels	MAIO	Freeze channels and MAIO	4	TRX Configuration	EDGE Power Backoff (dB)	TRX Rank	Inter-technology DL Noise Rise (dB)
	Site0_1	0		TCH		512		<input checked="" type="checkbox"/>		Standard	3	0	0
	Site0_1	1		BCCH		513		<input checked="" type="checkbox"/>		Standard	3	0	0
	Site0_2	0		TCH		514		<input checked="" type="checkbox"/>		Standard	3	0	0
	Site0_2	1		BCCH		515		<input checked="" type="checkbox"/>		Standard	3	0	0
	Site0_3	0		TCH		516		<input checked="" type="checkbox"/>		Standard	3	0	0
	Site0_3	1		BCCH		517		<input type="checkbox"/>		Standard	3	0	0

Рисунок 4.47 – Вигляд вікна, що ілюструє частотний план системи

Заповнення таблиці відбувається у такій послідовності:

1. В полі, що відповідає новому запису, та в колонці «Transmitter» обрати потрібний передавач.
2. В колонці «TRX type» вибрати тип каналу. Слід зазначити, що в передавачі, який обслуговує один сектор, має бути щонайменше один канал типу BCCH, інші канали – це канали TCH.
3. В колонці «Channels» вибрати номер каналу. Поставити позначку навпроти «Freeze channels». Це зафіксує значення частотного каналу і не дозволить його змінити програмі, коли потрібно буде повторно використовувати частотні канали.
4. В колонці «TRX configuration» обрати стандартну конфігурацію TRX. Клацнути мишею в полі нового запису.

Повторити кроки 1-5 для іншого передавача чи іншого TRX того ж передавача.

Важливо! Одному сектору треба призначити таку кількість TRX, яка відповідає кількості частотних каналів в секторі $n_{чк_с}$.

Далі необхідно пересвідчитись, що частотні канали, виділені для кожного сектору, належать частотній області, яка відповідає проекту (в нашому випадку GSM 1800 Domain чи GSM 900 Domain) (рис. 4.48, поз. 1). У випадку, коли параметри окремо взятого передавача було введено неправильно, їх можна

відкоригувати так, як показано на рис. 4.48, поз.2. Для цього лише треба перейти до властивостей потрібного передавача (вкладка «TRXs»).

Для того, щоб після завершення процедури розподілення каналів експортувати частотний план у файл, наприклад, у форматі Excel, необхідно, відкривши вікно частотного плану (рис. 4.47), виділити всі поля, клацнути правою кнопкою миші на виділеній чорним кольором області та обрати «Export» (рис. 4.49). З'явиться вікно експортування даних, де треба знову натиснути «Export» та вказати формат файлу, в який треба передати дані.

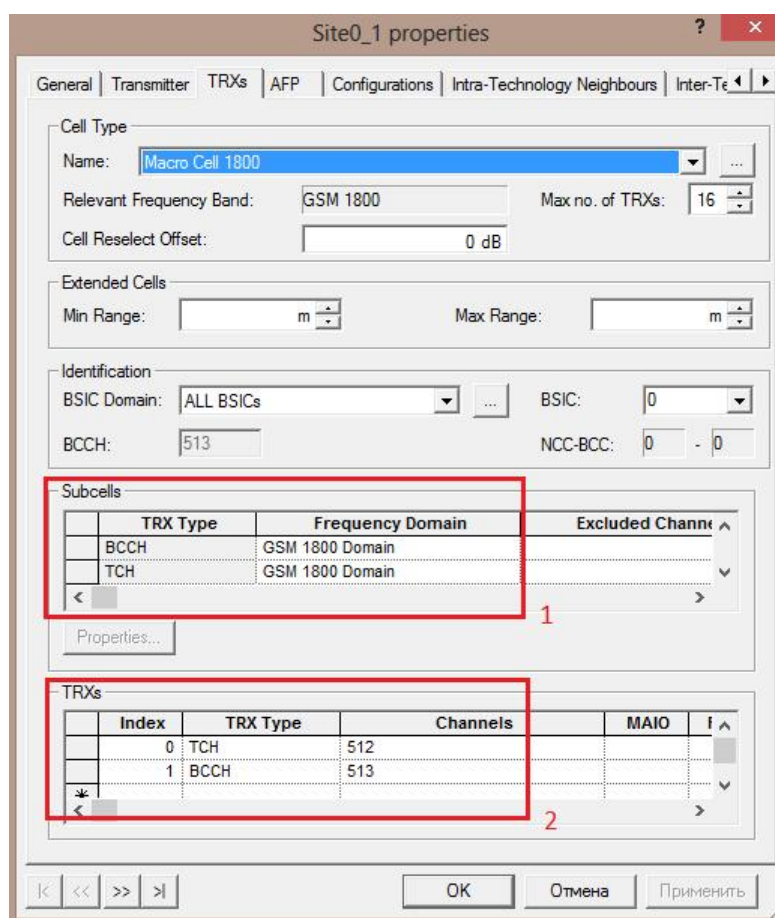


Рисунок 4.48 – Коригування параметрів окремо взятого передавача

	Transmitter	Index	TRX Type	Channels
	Site0_1	0	TCH	512
	Site0_1	1	BCCH	513
	Site0_2	0	TCH	514
	Site0_2	1	BCCH	515
▶	Site0_3	0	TCH	516
	Site0_3	1	BCCH	517
*				

Import...

Export...

Record Properties

Table Fields

Display Columns...

Hide Columns...

Рисунок 4.49 – Експортування частотного плану в файл

В програмі Atoll є можливість виконати точковий аналіз, розташовуючи мобільну станцію у довільній точці на карті покриття. Це дозволяє оцінити рівень сигналу в даній точці від передавачів різних БС (визначаючи, яка БС обслуговуватиме МС в даній точці), оцінити профіль радіолінії між МС та сектором БС, що її обслуговує, та оцінити рівні інтерференційних завад і завад у сусідньому каналі.

Щоб перейти в режим точкового аналізу, треба на панелі інструментів натиснути кнопку «Point Analysis Tool» (рис. 4.50).

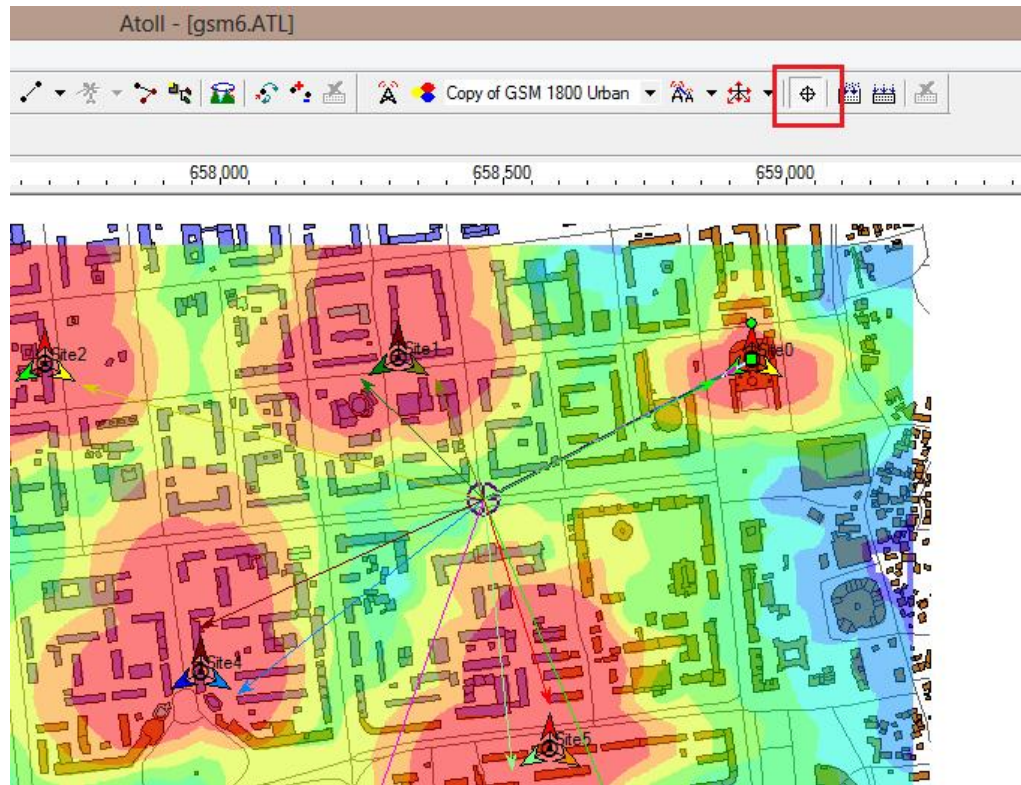


Рисунок 4.50 – Викликання режиму точкового аналізу

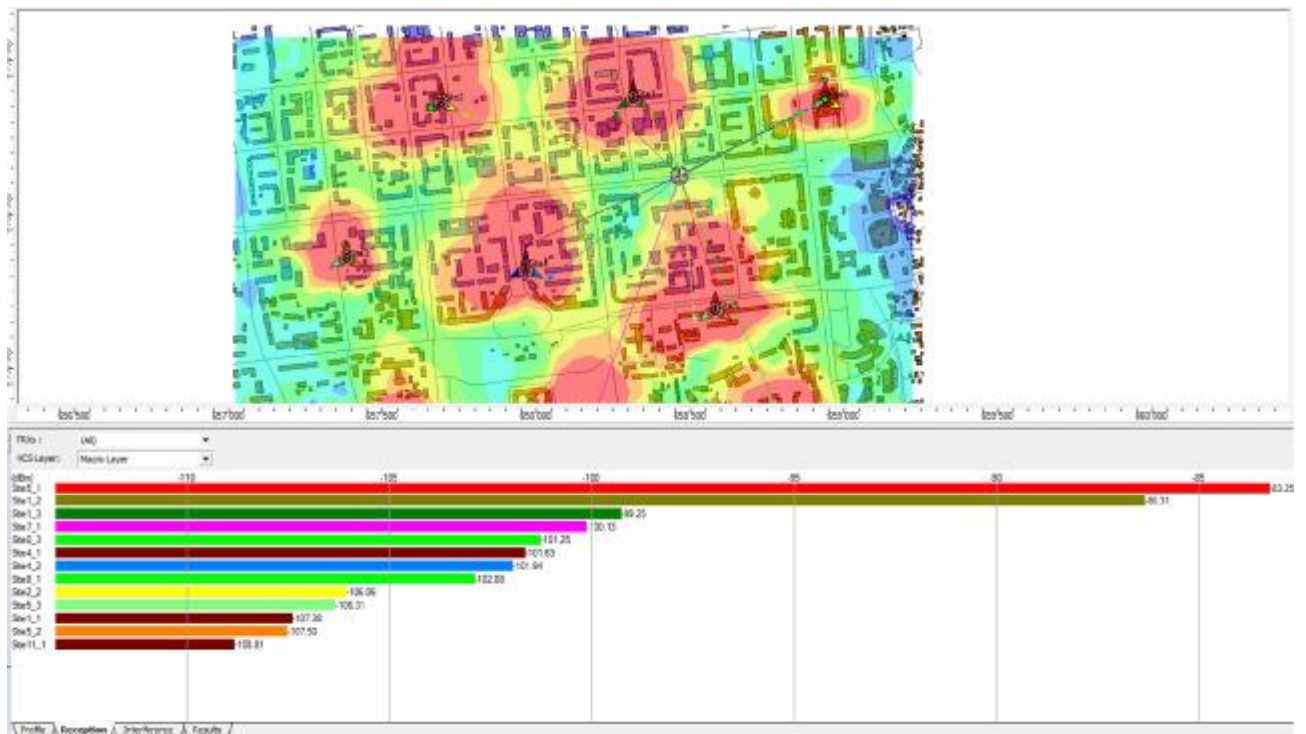


Рисунок 4.51 – Режим точкового аналізу

Клацнувши мишкою в довільній точці карти покриття, відкриється вікно «Point Analysis Tool» (рис. 4.51) у вкладці «Reception». Тут можна оцінити

рівень сигналу в даній точці від передавачів різних БС та визначити, яка БС (конкретний сектор) обслуговуватиме МС в даній точці. Перейшовши у вкладку «Profile», можна оцінити профіль радіолінії між МС та сектором БС, що її обслуговує. У вкладці «Interference» показано рівень завад, що створюється сусідніми передавачами даному сектору БС. Узагальнені результати щодо завадової ситуації наведено у вкладці «Results».

Завдання на лабораторну роботу

Використовуючи проект з лабораторної роботи №3, дослідити особливості розподілення робочих частот базових станцій системи GSM в програмі Atoll.

Призначити область BSIC та обрати з неї значення ідентифікатора BSIC для кожного передавача БС у проекті.

Використовуючи початкові дані та результати розрахунків за кроками 1-2 лабораторної роботи №3, виконати розподілення частотних каналів для передавачів БС, дотримуючись рекомендацій, наведених на рис. 4.47. Врахувати, що одному сектору треба призначити таку кількість TRX, яка відповідає кількості частотних каналів в секторі $n_{\text{чк}_c}$. Врахувати також, що частотні канали розподіляють лише в межах кластера C , тобто у разі необхідності треба застосувати принцип *повторного використання частот* для передавачів інших кластерів.

Пересвідчитись, що частотні канали, виділені для кожного сектору, належать частотній області, яка відповідає проекту.

Експортувати частотний план у файл формату Excel.

Здійснити точковий аналіз, розташувавши МС на карті покриття посередині між 3-4 БС.

Порядок виконання роботи

1. Відкрити проект Atoll, створений у лабораторній роботі №3.
2. Призначити область BSIC та обрати з неї значення ідентифікатора BSIC для передавача Site0_1 (див. рис. 4.46).
3. Повторити п.2 для всіх передавачів у проекті.
4. Використовуючи початкові дані та результати розрахунків за кроками 1-2 лабораторної роботи №3, виконати розподілення частотних каналів для передавачів БС, дотримуючись рекомендацій, наведених на рис. 4.47. **Увага!** частотні канали розподіляють лише в межах кластеру С, тобто у разі необхідності треба застосувати принцип *повторного використання частот* для передавачів інших кластерів.
5. Пересвідчитись, що частотні канали, виділені для кожного сектору, належать частотній області, яка відповідає проекту (див. рис. 4.48).
6. Експортувати частотний план у файл формату Excel.
7. Здійснити точковий аналіз, розташувавши МС на карті покриття посередині між трьома-чотирма БС. Оцінити рівень сигналу в даній точці від передавачів різних БС та визначити, яка БС (конкретний сектор) обслуговуватиме МС в даній точці.
8. За результатами виконання точкового аналізу оцінити рівень завад, що створюється сусідніми передавачами даному сектору БС. Зробити висновки про характер завад, їх рівень та вплив на функціонування МС.

Зміст звіту

1. Номер та тема роботи на титульному аркуші.
2. Мета роботи та порядок виконання роботи на наступному аркуші.
3. Результати виконання роботи: за п.2-3 та 5 – **таблиця** значень BSIC, NCC, BCC та Frequency Domain для кожного передавача у проекті (див. табл. 4.4); за п.4 та 6 – частотний план у вигляді таблиці за формою, що відповідає рис. 4.47; за п.7 – скріншоти карти покриття з місцем розташування МС та вікном «Point Analysis Tool» з вкладкою «Reception» за формою, що відповідає

рис. 4.51; за п.8 – скріншоти карти покриття з місцем розташування МС та вікном «Point Analysis Tool» з вкладками «Interference» та «Results». Висновки про характер завад, їх рівень та вплив на функціонування МС.

Таблиця 4.4 – Значення BSIC, NCC, BCC та Frequency Domain

Передавач	BSIC	NCC	BCC	Frequency Domain
Site0_1				
Site0_2				
...				

Контрольні запитання

1. Що таке BSIC та яке його призначення?
2. З чого складається код BSIC?
3. В чому полягає процедура розподілення частотних каналів для всіх передавачів в програмі Atoll?
4. Як експортувати створений частотний план у файл?
5. Яке призначення точкового аналізу в програмі Atoll?
6. Яку інформацію можна отримати з вкладки «Reception» вікна «Point Analysis Tool»?
7. У чому відмінність між відношеннями C/I та $C/(I+N)$, які можна спостерігати у вкладках «Interference» та «Results» вікна «Point Analysis Tool»?

Лабораторна робота №7

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОПОКРИТТЯ СИСТЕМИ UMTS НА ЗАДАНІЙ ТЕРИТОРІЇ В ATOLL

Мета роботи: отримати навички моделювання радіопокриття системи UMTS в програмі Atoll.

Теоретичні відомості

Система UMTS є системою стільникового зв'язку третього покоління, яка використовує широкосмуговий доступ до ресурсів з кодовим розділенням каналів (WCDMA). На відміну від систем з частотно-часовим розділенням каналів (FDMA/TDMA), до яких належить система GSM, передавачі сусідніх БС системи UMTS можуть працювати на одних і тих же частотах. Кожен передавач системи ідентифікується *розширювальною послідовністю* (scrambling codes), а канали (або користувачі) розділяють за допомогою *ортогональних кодових послідовностей* зі змінним коефіцієнтом розширення (OVSF codes). В цілому проектування системи UMTS відрізняється від проектування системи GSM та складається з таких основних кроків:

1. Конфігурування мережі (розташування на БС на карті та налаштування їх параметрів).
2. Моделювання радіопокриття за рівнем сигналу.
3. Планування сусідніх стільників.
4. Моделювання радіопокриття за технологіями HSDPA і/або HSUPA.
5. Точковий аналіз рівнів сигналу від сусідніх БС та активного набору стільників, з якими працює МС в заданій точці.
6. Розподілення розширювальних послідовностей (scrambling codes) для передавачів БС.

Розглянемо деякі кроки докладніше. Налаштування параметрів БС здійснюють у вкладках «General», «Transmitter» та «WCDMA/UMTS» вікна

властивостей БС (як викликати вікно властивостей БС з панелі налаштування параметрів БС див. лабораторну роботу №2).

На вкладці «General» (рис. 4.52) наведені базові параметри БС, такі як кількість секторів (1) та радіус стільника (2), частотний діапазон (3), а також параметри антени (4) (тут також задають висоту підвісу антени БС(5)).

На вкладці «Transmitter» (рис. 4.53) задають параметри передавачів БС, зокрема, величину загальних втрат у передавальному та приймальному пристроях БС (1), які можна отримати, натиснувши на кнопку «Equipment» (2) та обравши відповідне обладнання (дуплексний фільтр ТМА, типи фідеру та БС) і вказавши довжину фідерного тракту (feeder length).

На вкладці «WCDMA/UMTS» (рис. 4.54) є можливість задати параметри, які будуть братися до уваги під час моделювання системи UMTS. Це кількість носійних частот для передавача БС (1) (носійні з номерами 0, 1, 2), рівень випромінюваної потужності (2) у пілотному каналі, каналі синхронізації та інших каналах (особливо треба звернути увагу на параметр AS Threshold (3), який описує максимальну різницю між якістю пілотного каналу БС, що обслуговує МС, та якістю пілотних каналів БС, що входять до так званого *активного набору* (active set), з якими також взаємодіє МС). В цій вкладці також можна накласти обмеження на максимальну потужність (4), що може випромінюватися у каналах, вказати максимальний коефіцієнт навантаження на лінії вгору (5), а також обмежити пікову швидкість на одного користувача на лінії вниз (6) та лінії вгору (7). Всі ці параметри будуть враховані програмою в процесі регулювання потужності, яке є невід'ємною частиною функціонування систем CDMA та визначає абонентську ємність таких систем.

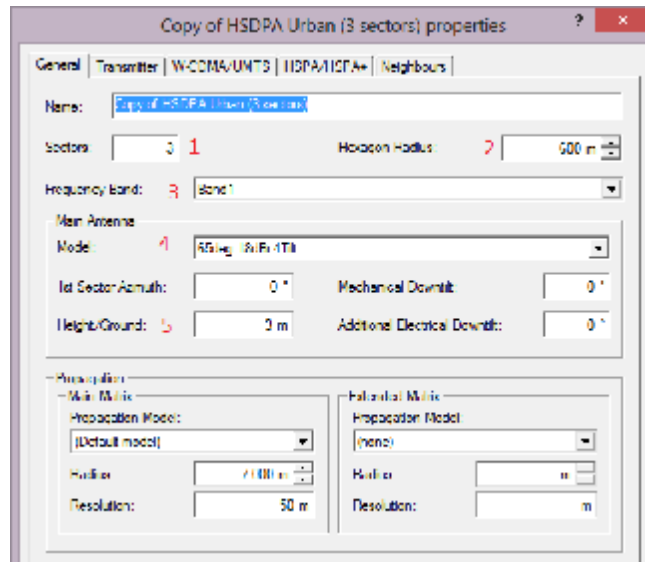


Рисунок 4.52 – Вкладка «General» вікна властивостей БС

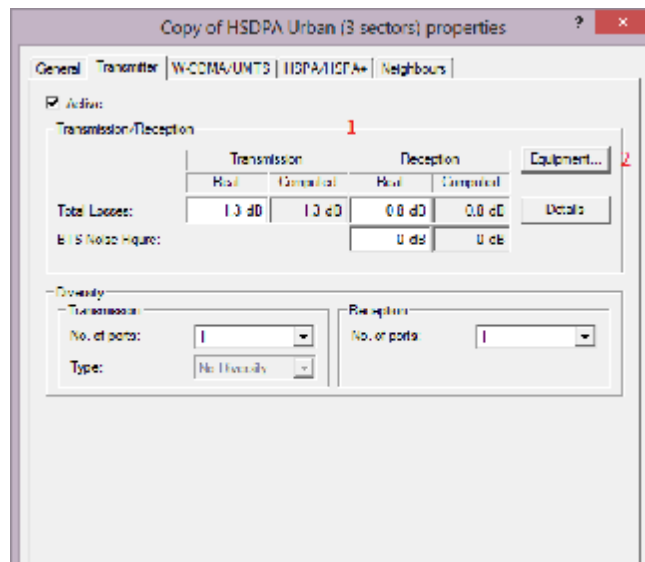


Рисунок 4.53 – Вкладка «Transmitter» вікна властивостей БС

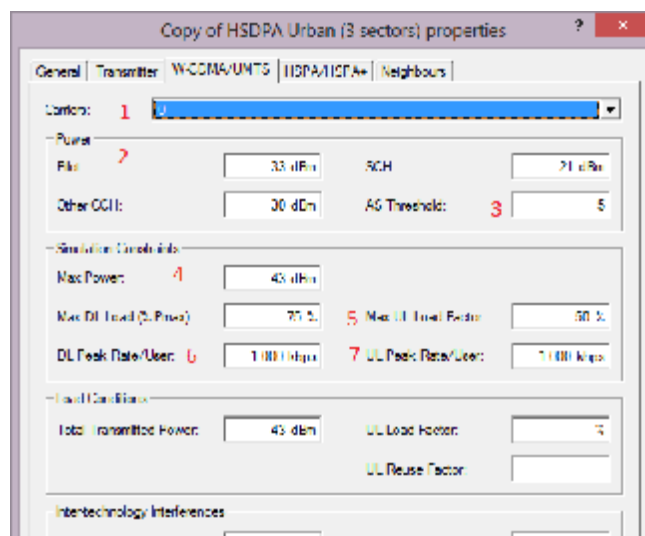


Рисунок 4.54 – Вкладка «WCDMA/UMTS» вікна властивостей БС

Моделювання радіопокриття за рівнем сигналу та вибір моделі поширення радіохвиль виконують в такий же спосіб, що й для системи GSM (див. лабораторні роботи №№ 3 та 5).

Програма Atoll підтримує такі типи стільників-сусідів:

- внутрішньосистемні стільники-сусіди – це стільники, які також використовують систему UMTS. Вони можуть бути двох типів: стільники-сусіди, в яких хендовер здійснюється на одних і тих же носійних частотах (*intra-carrier neighbours*) та стільники-сусіди, в яких хендовер здійснюється на різних носійних частотах (*inter-carrier neighbours*);
- міжсистемні стільники-сусіди – це стільники, які використовують систему, відмінну від UMTS.

В програмі Atoll є можливість *автоматичного планування* сусідніх стільників системи UMTS. Для цього треба натиснути правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та обрати «Cells» → «Neighbours» → «Automatic Allocation». З'явиться вікно «Automatic Neighbour Allocation», в якому є дві вкладки – «Intra-Carrier Neighbours» та «Inter-Carrier Neighbours». За необхідності задавши параметри планування внутрішньосистемних стільників-сусідів двох типів, по чергово треба виконати планування стільників-сусідів типу *intra-carrier neighbours* та типу *inter-carrier neighbours*, натиснувши кнопку «Run». Результати треба підтвердити натисненням кнопки «Commit» (рис. 4.55).

Моделювання радіопокриття за технологіями HSDPA і/або HSUPA можна здійснити у той же спосіб, що й моделювання за рівнем сигналу. Для цього треба натиснути правою кнопкою миші на папці «Predictions», обрати «New» та обрати «HSDPA Coverage» або «HSUPA Coverage». В результаті на карті місцевості буде показано розподіл швидкості передавання даних у напрямках вниз або вгору (рис. 4.56). При цьому слід зазначити, що зона покриття технологією HSDPA або HSUPA може не співпадати з зоною покриття системи UMTS.

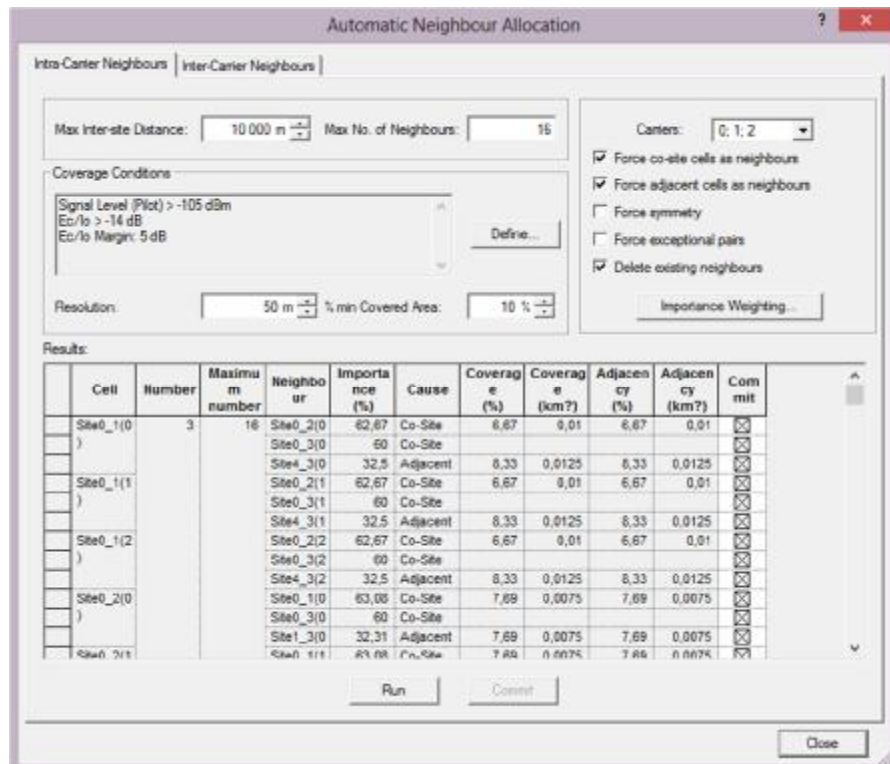


Рисунок 4.55 – Вікно результатів планування сусідніх стільників



Рисунок 4.56 – Результат моделювання покриття технологією HSDPA

Щоб перейти в режим точкового аналізу, треба на панелі інструментів натиснути кнопку «Point Analysis Tool». Клацнувши мишкою в довільній точці карти покриття, відкриється вікно «Point Analysis Tool» у вкладці «Reception».

Тут можна оцінити рівень сигналу в даній точці від передавачів різних БС та визначити, яка БС (конкретний сектор) обслуговуватиме МС в даній точці. Перейшовши у вкладку «Profile», можна оцінити профіль радіолінії між МС та сектором БС, що її обслуговує. У вкладці «AS Analysis» на основі інформації про рівень прийнятого пілот-сигналу від різних передавачів БС на заданій носійній частоті можна визначити, який тип сервісу (голос, відео конференції, мобільний доступ до Інтернету тощо) буде підтримуватись тим чи іншим типом мобільного терміналу в даній точці (рис. 4.57). Вкладка «SC Interference» дає можливість проаналізувати завади, що можуть створюватися передавачами БС з однаковими розширювальними кодами (scrambling codes), якщо такі передавачі розташовані поблизу один одного.

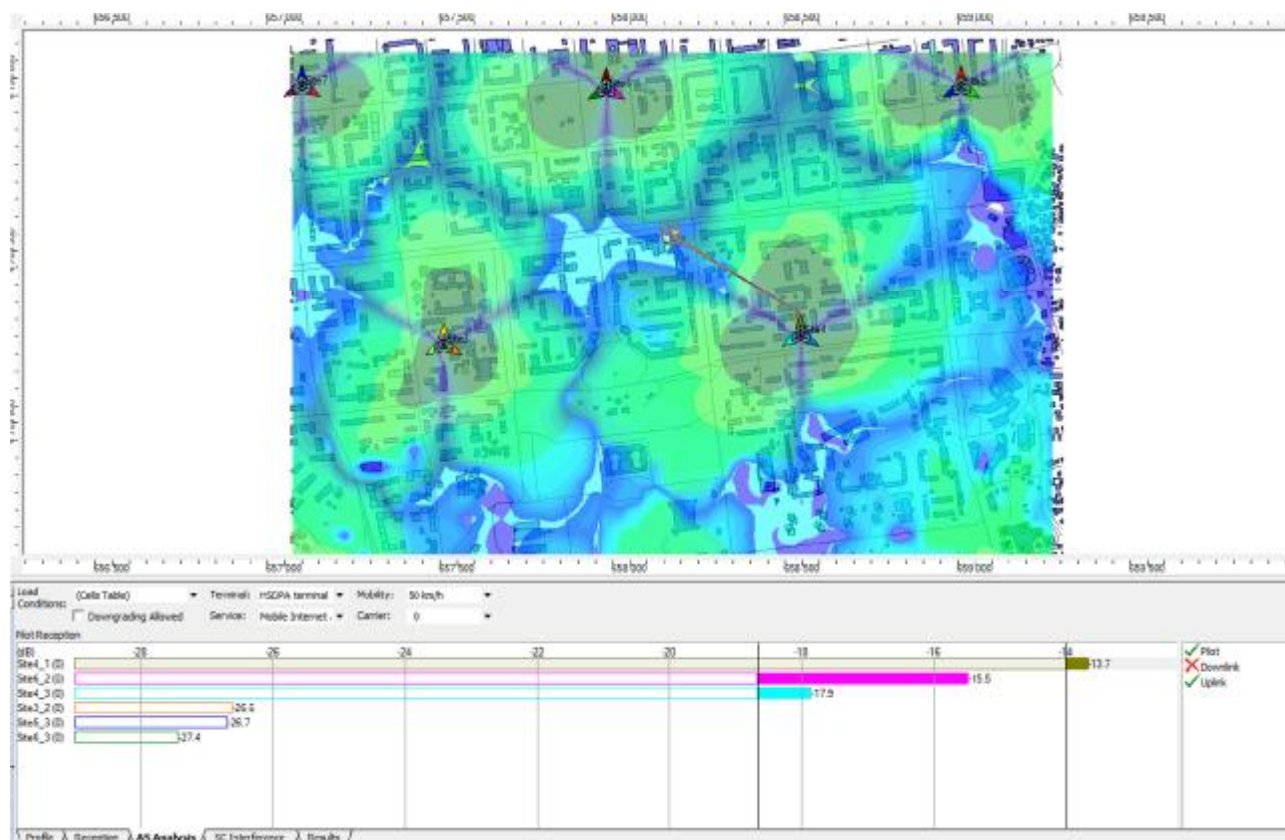


Рисунок 4.57 – Вікно «Point Analysis Tool» з вкладкою «AS Analysis»: видно, що для HSDPA терміналу послуга «Мобільний доступ до Інтернету» є недоступною на лінії вниз в даній точці покриття

В програмі Atoll є можливість *автоматичного розподілення* розширювальних послідовностей (scrambling codes), що ідентифікують

передавачі БС. Для цього треба натиснути правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та обрати «Cells» → «Primary Scrambling Codes» → «Automatic Allocation». З'явиться вікно «Primary Scrambling Codes». За необхідності задавши параметри розподілення розширювальних послідовностей та обравши стратегію розподілення, необхідно натиснути кнопку «Run». Результати треба підтвердити натисненням кнопки «Commit» (рис. 4.58).

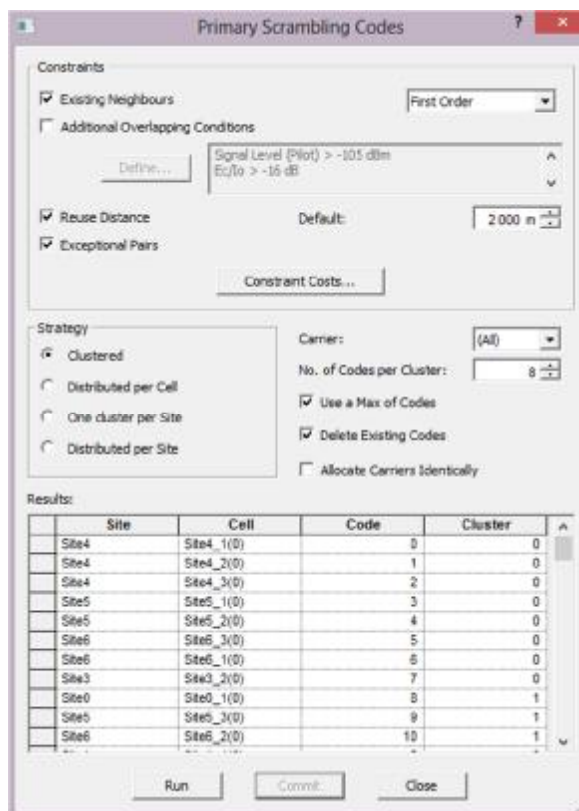


Рисунок 4.58 – Розподілення розширювальних послідовностей (scrambling codes)

Відобразити результати розподілення у вигляді легенди можна, натиснувши на папці «Transmitters» правою кнопкою миші та обравши «Properties» (рис. 4.59).

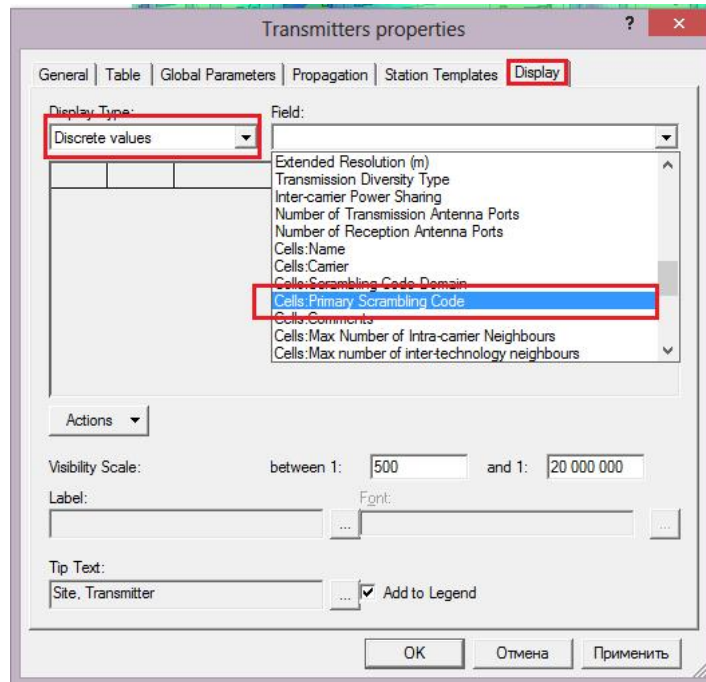


Рисунок 4.59 – Налаштування вигляду передавачів для відображення розширювальних послідовностей у вікні легенди

Завдання на лабораторну роботу

Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття UMTS HSPA. Завантажити в нього цифрові карти місцевості відповідно до варіанту завдання. Використовуючи початкові дані до лабораторної роботи (табл. 4.5), розташувати базові станції на цифровій карті місцевості, приблизно дотримуючись стільникової структури. Налаштувати параметри БС відповідно до варіанту завдання.

Виконати моделювання радіопокриття системи UMTS за рівнем сигналу на заданій території. Виконати планування стільників-сусідів та змоделювати радіопокриття за технологіями HSDPA і/або HSUPA (в залежності від варіанту завдання).

Виконати розподілення розширювальних послідовностей (scrambling codes) для передавачів БС.

Таблиця 4.5 – Початкові дані до лабораторної роботи №7

Бригада №	Місто	Радіус стільника, м	Технологія HSPA	Кількість носійних (їх номери)	Max UL load factor
1	Алмати	600	HSDPA	1 (№ 0)	50%
2	Будапешт	500	HSUPA	2 (№ 0; 1)	60%
3	Єреван	400	HSPA+	3 (№ 0; 1; 2)	70%
4	Софія	600	HSDPA	3 (№ 0; 1; 2)	50%
5	Таллінн	500	HSUPA	1 (№ 0)	60%
6	Тегеран	400	HSPA+	2 (№ 0; 1)	70%

Порядок виконання роботи

1. Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття UMTS HSPA.

2. Імпортувати в проект цифрові карти місцевості – карти висот рельєфу та забудови (height.grd та build(ings).grd), векторні карти місцевості (buildings.TAB, highway.TAB, inlandwater.TAB, majorroad.TAB, streets.TAB, freeway.TAB та ін.) і карту завод (clutter.grc).

3. Налаштувати параметри БС відповідно до варіанту завдання (див. рис. 4.52 – 4.53).

4. Розташувати базові станції на цифровій карті місцевості, приблизно дотримуючись стільникової структури та використовуючи інформацію про радіус стільника. Встановити значення висоти підвісу антени БС рівним (2...3) м.

5. Виконати моделювання радіопокриття системи UMTS за рівнем сигналу на заданій території (Coverage by signal level).

6. Проаналізувати радіопокриття за рівнем сигналу та визначити доцільність подальшої зміни розташування окремих БС чи значення висоти підвісу антени для певних БС.

7. Виконати автоматичне планування внутрішньосистемних стільників-сусідів (див. рис. 4.55).

8. Змоделювати радіопокриття за технологіями HSDPA і/або HSUPA (в залежності від варіанту завдання) (HSDPA Coverage – для варіантів 1 і 3, HSDPA Coverage + HSUPA Coverage – для інших варіантів).

9. Розташувавши МС на границі покриття HSDPA між 3-4 БС, здійснити точковий аналіз рівнів сигналу від сусідніх БС. Визначити, який тип сервісу (голос, відео конференції, мобільний доступ до Інтернету тощо) буде підтримуватись тим чи іншим типом мобільного терміналу в даній точці (див. рис. 4.52).

10. Виконати розподілення розширювальних послідовностей (scrambling codes) для передавачів БС (див. рис. 4.58).

Зміст звіту

1. Номер та тема роботи на титульному аркуші.
2. Мета роботи та порядок виконання роботи на наступному аркуші.
3. Результати виконання роботи: за п.5-6 – результати моделювання радіопокриття системи UMTS за рівнем сигналу на заданій території (Coverage by signal level); за п.7 – скріншоти, що ілюструють результати автоматичного планування внутрішньосистемних стільників-сусідів – Intra-Carrier Neighbours та Inter-Carrier Neighbours; за п.8 – результати моделювання радіопокриття системи UMTS за технологіями HSDPA і/або HSUPA, висновки про характер покриття; за п.9 – скріншоти карти покриття з місцем розташування МС та вікном «Point Analysis Tool» з вкладками «Reception» і «AS Analysis», висновки про умови функціонування МС та можливість отримання тих чи інших послуг (сервісів); за п.10 – вікно легенди з розподіленими розширювальними послідовностями для передавачів БС.

Контрольні запитання

1. У чому полягають відмінності систем зв'язку з кодовим розділенням каналів від систем з частотно-часовим розділенням каналів?
2. Розкрийте алгоритм проектування системи UMTS в програмі Atoll.
3. Поясніть призначення параметрів у вкладці «Transmitter» вікна властивостей БС.
4. Яке призначення параметрів у вкладці «WCDMA/UMTS» вікна властивостей БС?
5. Які типи стільників-сусідів реалізовано в програмі Atoll? В чому полягає відмінність між ними?
6. Які можливості дає використання технологій HSDPA і HSUPA?
7. Проаналізуйте результати виконання точкового аналізу у вкладці «AS Analysis» свого варіанту завдання.
8. Яке призначення розширювальних послідовностей (scrambling codes)?

Лабораторна робота №8

МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОПОКРИТТЯ СИСТЕМИ LTE НА ЗАДАНІЙ ТЕРИТОРІЇ В ATOLL

Мета роботи: отримати навички моделювання радіопокриття системи LTE в програмі Atoll.

Теоретичні відомості

Система LTE є системою безпроводового зв'язку четвертого покоління, яка використовує широкопasmовий доступ до ресурсів на основі технології OFDMA. На відміну від систем з частотно-часовим розділенням каналів (FDMA/TDMA), до яких належить система GSM, передавачі сусідніх БС системи можуть працювати на одних і тих же частотах. В цілому проектування системи LTE відрізняється від проектування системи GSM та UMTS і складається з таких основних кроків:

1. Конфігурування мережі (розташування на БС на карті та налаштування їх параметрів).
2. Моделювання радіопокриття за рівнем сигналу.
3. Планування сусідніх стільників.
4. Розподілення частот між передавачами БС.
5. Розподілення ідентифікаторів стільників (physical cell IDs).
6. Моделювання радіопокриття за параметрами, специфічними для системи LTE (наприклад, за ефективним рівнем сигналу на лінії вниз та вгору, за пропускнуою здатністю на лінії вниз та вгору тощо).
7. Точковий аналіз рівнів сигналу від сусідніх БС.
8. Коригування частотного плану у разі необхідності (тоді п. 6 та 7 мають бути змодельовані повторно).

Розглянемо деякі кроки докладніше. Налаштування параметрів БС здійснюють у вкладках «General», «Transmitter» та «LTE» вікна властивостей

БС (як викликати вікно властивостей БС з панелі налаштування параметрів БС див. лабораторну роботу №2).

На вкладці «General» (рис. 4.60) наведені базові параметри БС, такі як кількість секторів (1) та радіус стільника (2), а також параметри антени (тут задають висоту підвісу антени БС (3), модель антени та кількість портів антени (4)).

На вкладці «Transmitter» (рис. 4.61) задають параметри передавачів БС, зокрема, величину загальних втрат у передавальному та приймальному пристроях БС (1), які можна отримати, натиснувши на кнопку «Equipment» (2) та обравши відповідне обладнання (дуплексний фільтр ТМА, типи фідеру та БС) і вказавши довжину фідерного тракту (feeder length).

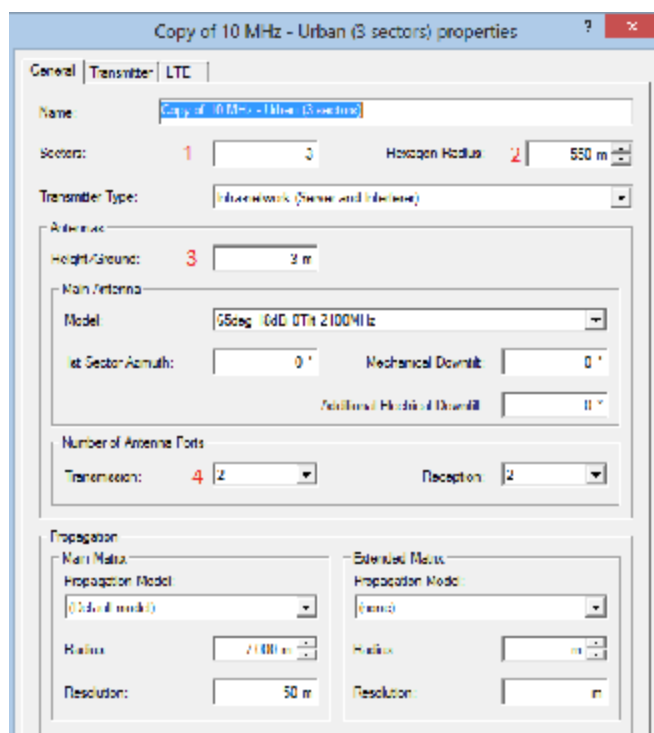


Рисунок 4.60 – Вкладка «General» вікна властивостей БС

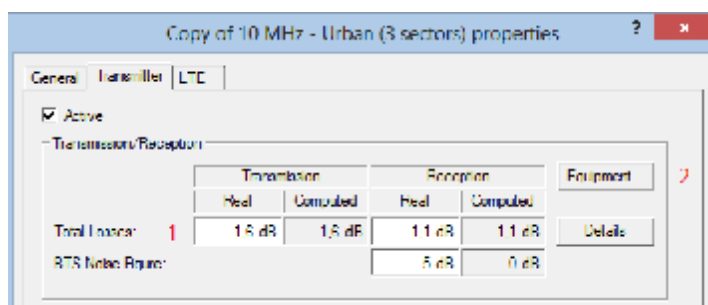


Рисунок 4.61 – Вкладка «Transmitter» вікна властивостей БС

На вкладці «LTE» (рис. 4.62) є можливість задати параметри, які будуть братися до уваги під час моделювання системи LTE. Це максимальна потужність передавача БС (1), частотний діапазон (2), в якому працює БС, номер частотного каналу, на якому працює передавач БС (3). Випадні списки «Channel Allocation Status» (4) та «Physical Cell ID Status» (5) дають можливість виконати розподілення частот передавачів БС та ідентифікаторів стільників уручну (allocated, locked) або автоматично (not allocated). В цій вкладці також можна задати тип схеми MIMO в передавачі та в приймачі (6), а також параметри навантаження на лінії вниз та лінії вгору (7).

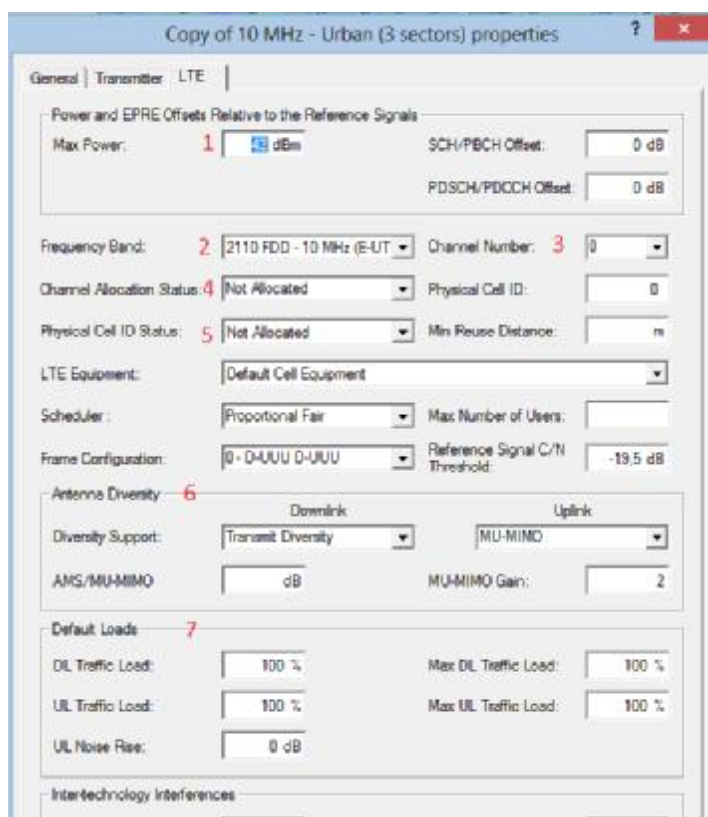


Рисунок 4.62 – Вкладка «LTE» вікна властивостей БС

Моделювання радіопокриття за рівнем сигналу та вибір моделі поширення радіохвиль виконують в такий же спосіб, що й для системи GSM (див. лабораторні роботи №№ 3 та 5).

В програмі Atoll є можливість *автоматичного планування* сусідніх стільників системи LTE. Для цього треба натиснути правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та обрати «Cells» → «Neighbours» → «Automatic

Allocation». З'явиться вікно «Automatic Neighbour Allocation». За необхідності задавши параметри планування стільників-сусідів (зокрема, відстані, на якій буде здійснено пошук сусідніх стільників, максимальної кількості сусідніх стільників та умов покриття із зазначенням діапазону виконання хендвера), треба здійснити планування стільників-сусідів, натиснувши кнопку «Run». Результати треба підтвердити натисненням кнопки «Commit» (рис. 4.63).

Розподілення частот між передавачами БС можна виконати вручну або автоматично. *Автоматичне розподілення частот* для передавачів БС виконують, натиснувши правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та обравши «Cells» → «Frequency Plan» → «Automatic Allocation». З'явиться вікно «Frequency Allocation». За необхідності задавши параметри розподілення частот (що саме треба розподіляти – частоти чи ідентифікатори (1), чи брати до уваги сусідні стільники та на якій мінімальній відстані дозволено повторювати частоти (2)), натиснути кнопку «Run». Результати (3) треба підтвердити натисненням кнопки «Commit» (рис. 4.64).

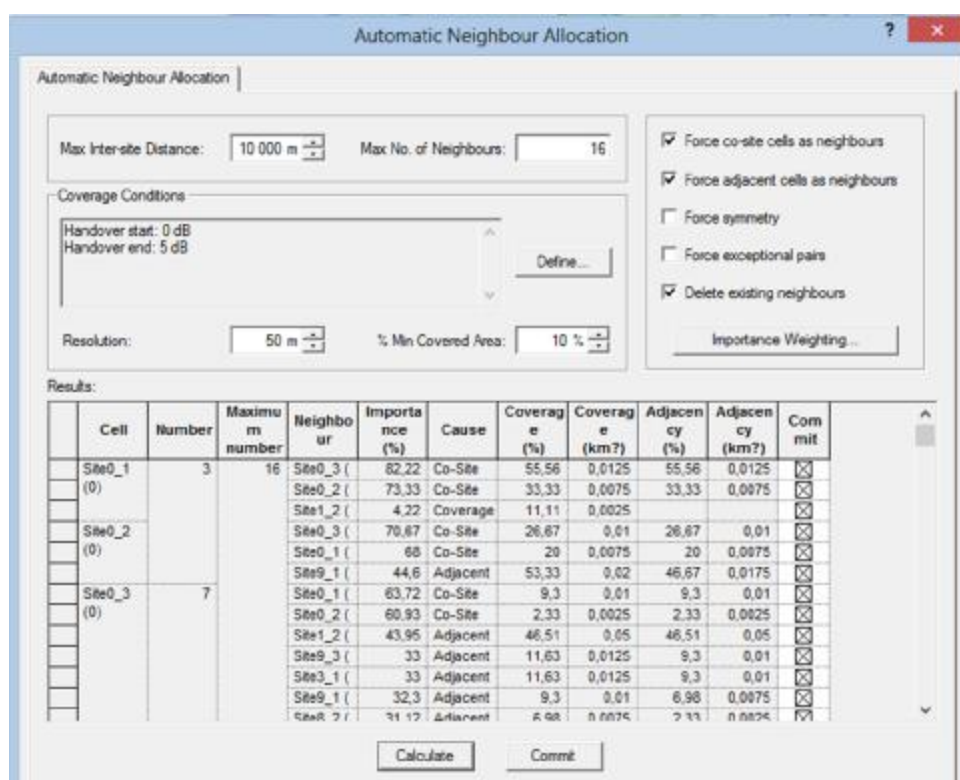


Рисунок 4.63 – Вікно результатів планування сусідніх стільників

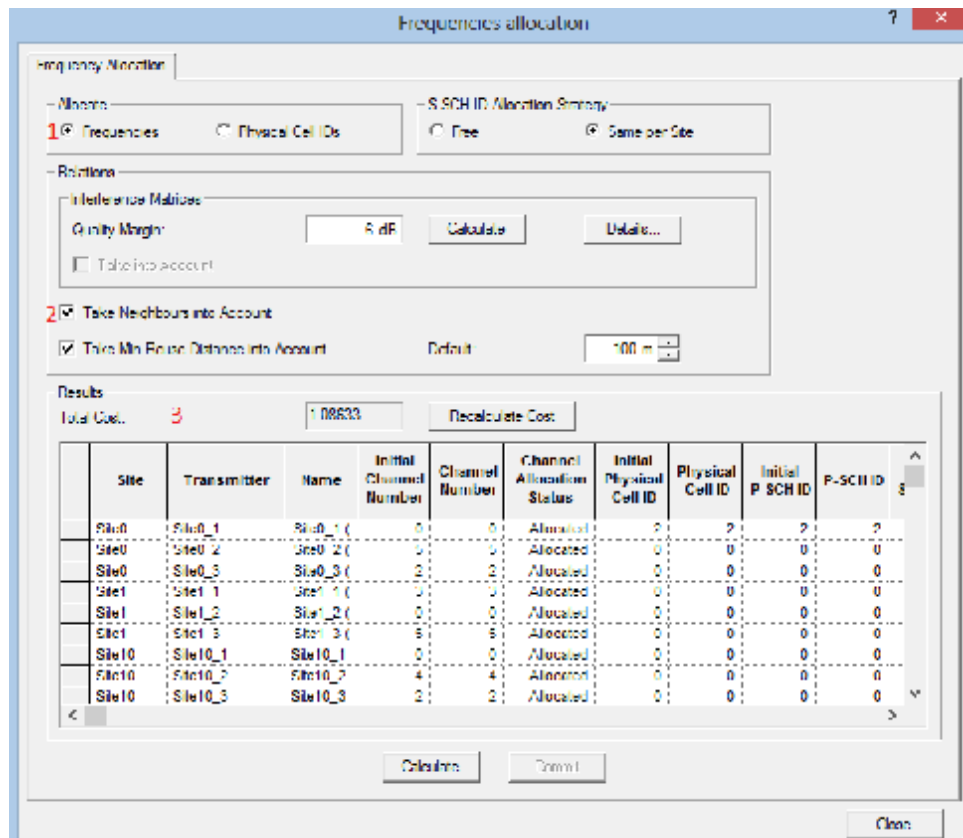


Рисунок 4.64 – Вікно результатів розподілення частот передавачів

Розподілення частот передавачів БС уручну можна здійснити для кожного передавача БС, обравши відповідний передавач в папці «Transmitters» та натиснувши правою кнопкою миші на опції «Properties». У вікні, що з'явиться, знайти параметри «Channel Number» та «Channel Allocation Status», вказавши відповідно номер частотного каналу навпроти першого та поставивши позначку «locked» навпроти іншого.

В системі LTE використовують широкосмуговий доступ на основі технології OFDMA. Сигнал OFDMA має складну структуру і містить окрім корисної інформації, яку передають за допомогою інформаційних підносійних, службові сигнали – так звані пілот-тони, які дозволяють вимірювати параметри каналу зв'язку та однозначно ідентифікувати стільник. Пілот-тони – це псевдовипадкові послідовності (ПВП), які передають на службових підносійних. Для розпізнавання стільника мобільна станція повинна мати інформацію про ПВП, що використовується, та ідентифікатор стільника (physical cell ID). Ідентифікатор стільника може примати значення від 0 до

503 та складається з 168 груп (які називаються ідентифікаторами S-SCH) по 3 унікальних значення в кожній (які називаються ідентифікаторами P-SCH). ПВП тісно пов'язані з ідентифікатором стільника. Таким чином, МС синхронізує передавання та приймання за частотою і часом, отримуючи спочатку ідентифікатор P-SCH, а потім - ідентифікатор S-SCH. Комбінація цих ідентифікаторів дає ідентифікатор стільника (physical cell ID) та поєднану з ним ПВП, що передається від БС.

Розподілення ідентифікаторів стільників (physical cell IDs) відбувається за схожим алгоритмом. Натиснувши правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та обравши «Cells» → «Physical Cell IDs» → «Automatic Allocation», з'явиться вікно «Physical Cell ID Allocation». За необхідності задавши параметри розподілення ідентифікаторів стільників, натиснути кнопку «Run». Результати треба підтвердити натисненням кнопки «Commit».

Моделювання радіопокриття за параметрами, специфічними для системи LTE, можна здійснити у той же спосіб, що й моделювання за рівнем сигналу. Для цього треба натиснути правою кнопкою миші на папці «Predictions», обрати «New» та обрати «Effective Signal Analysis DL (UL)» або «Coverage by Throughput DL (UL)». В результаті на карті місцевості буде показано, наприклад, розподіл швидкості передавання даних у напрямках вниз або вгору (рис. 4.65). При цьому слід зазначити, що зону покриття системи LTE слід оцінювати за ефективним рівнем сигналу (effective signal level), а моделювання радіопокриття за рівнем сигналу використовувати лише на початковому етапі проектування системи.



Рисунок 4.65 – Результат моделювання розподілу швидкості передавання даних у напрямку вниз

Щоб перейти в режим точкового аналізу, треба на панелі інструментів натиснути кнопку «Point Analysis Tool». Кладнувши мишкою в довільній точці карти покриття, відкриється вікно «Point Analysis Tool» у вкладці «Reception». Тут можна оцінити рівень сигналу в даній точці від передавачів різних БС та визначити, яка БС (конкретний сектор) обслуговуватиме МС в даній точці. Перейшовши у вкладку «Profile», можна оцінити профіль радіолінії між МС та сектором БС, що її обслуговує. У вкладці «Signal Analysis» на основі інформації про рівень прийнятих пілот-сигналів від різних передавачів БС на заданій носійній частоті можна визначити, який тип сервісу (VoIP, відеоконференції, перегляд веб-сторінок чи завантаження файлів через FTP) буде підтримуватись тим чи іншим типом мобільного терміналу в даній точці (рис. 4.66).

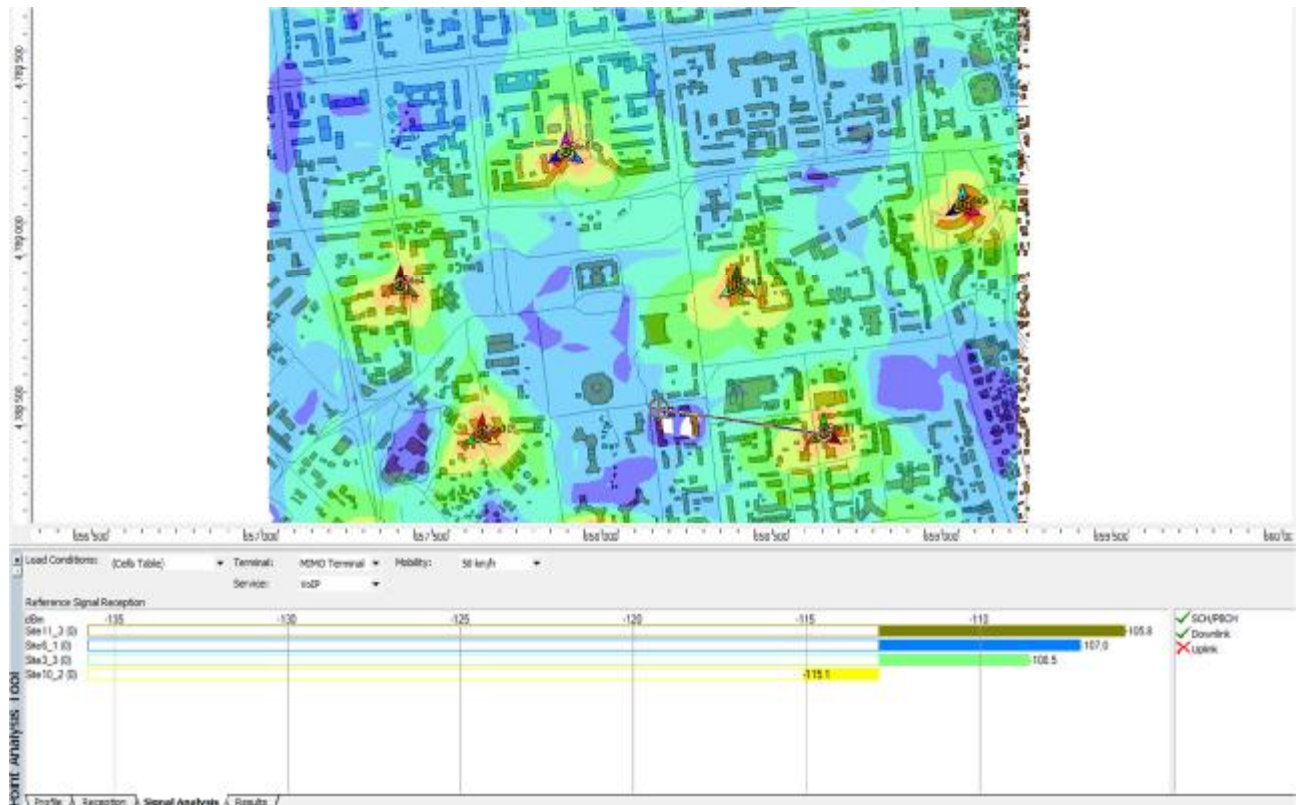


Рисунок 4.66 – Вікно «Point Analysis Tool» з вкладкою «Signal Analysis»: видно, що для MIMO терміналу послуга «VoIP» є недоступною на лінії вгору в даній точці покриття

Завдання на лабораторну роботу

Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття LTE. Завантажити в нього цифрові карти місцевості відповідно до варіанту завдання. Використовуючи початкові дані до лабораторної роботи (табл. 4.6), розташувати базові станції на цифровій карті місцевості, приблизно дотримуючись стільникової структури. Налаштувати параметри БС відповідно до варіанту завдання.

Виконати моделювання радіопокриття системи LTE за рівнем сигналу на заданій території. Виконати планування стільників-сусідів, розподілення частот між передавачами БС та розподілення ідентифікаторів стільників (physical cell IDs). Змоделювати радіопокриття за ефективним рівнем сигналу на лінії вниз та вгору, за пропускнуою здатністю на лінії вниз та вгору.

Виконати точковий аналіз рівнів сигналу від сусідніх БС.

Таблиця 4.6 – Початкові дані до лабораторної роботи №7

Бригада №	Місто	Радіус стільника, м	Технологія MIMO (вниз/вгору)	Розподілення частот БС (їх номери)
1	Алмати	750	Transmit Diversity/ Receive Diversity	Автоматичне
2	Будапешт	350	нема/нема	Уручну (0; 1; 2)
3	Єреван	550	SU-MIMO/MU-MIMO	Автоматичне
4	Софія	350	Transmit Diversity/ Receive Diversity	Уручну (0; 1; 2)
5	Таллінн	750	нема/нема	Автоматичне
6	Тегеран	550	SU-MIMO/MU-MIMO	Уручну (0; 1; 2)

Порядок виконання роботи

1. Створити проект в програмі Atoll, вибравши як технологію радіопокриття LTE.

2. Імпортувати в проект цифрові карти місцевості – карти висот рельєфу та забудови (height.grd та build(ings).grd), векторні карти місцевості (buildings.TAB, highway.TAB, inlandwater.TAB, majorroad.TAB, streets.TAB, freeway.TAB та ін.) і карту завод (clutter.grc).

3. Налаштувати параметри БС відповідно до варіанту завдання (див. рис. 4.60 – 8.3).

4. Розташувати базові станції на цифровій карті місцевості, приблизно дотримуючись стільникової структури та використовуючи інформацію про радіус стільника. Встановити значення висоти підвісу антени БС рівним (2...3) м.

5. Виконати моделювання радіопокриття системи LTE за рівнем сигналу на заданій території (Coverage by signal level).

6. Виконати автоматичне планування стільників-сусідів (див. рис. 4.63).
7. Здійснити розподілення частот у спосіб відповідно до варіанту завдання (див. табл. 8.1).
8. Виконати автоматичне розподілення ідентифікаторів стільника.
9. Змодельовати радіопокриття за ефективним рівнем сигналу на лінії вниз та вгору («Effective Signal Analysis DL (UL)»); за пропускнуою здатністю на лінії вниз та вгору («Coverage by Throughput DL (UL)»). Зробити висновки про зв'язок розподілу швидкості передавання даних на лініях вниз та вгору з розподілом ефективного рівня сигналу та заданій території.
10. Розташували МС на границі покриття між 3-4 БС, здійснити точковий аналіз рівнів сигналу від сусідніх БС. Визначити, який тип сервісу (VoIP, відеоконференції, перегляд веб-сторінок чи завантаження файлів через FTP) буде підтримуватись тим чи іншим типом мобільного терміналу в даній точці (див. рис. 4.66).

Зміст звіту

1. Номер та тема роботи на титульному аркуші.
2. Мета роботи та порядок виконання роботи на наступному аркуші.
3. Результати виконання роботи: за п.5 – результати моделювання радіопокриття системи LTE за рівнем сигналу на заданій території (Coverage by signal level); за п.6 – скріншоти, що ілюструють результати автоматичного планування стільників-сусідів; за п.7-8 – результати розподілення частот та ідентифікаторів стільника у вигляді таблиці («Transmitters» → «Cells» → «Open Table», навести перші 8 стовпчиків); за п.9 – результати моделювання радіопокриття за ефективним рівнем сигналу на лінії вниз та вгору («Effective Signal Analysis DL (UL)»); за пропускнуою здатністю на лінії вниз та вгору («Coverage by Throughput DL (UL)») (всього 4 зображення), висновки про характер покриття; за п.10 – скріншоти карти покриття з місцем розташування МС та вікном «Point Analysis Tool» з вкладками «Reception» і «Signal Analysis»,

висновки про умови функціонування МС та можливість отримання тих чи інших послуг (сервісів).

Контрольні запитання

1. Розкрийте алгоритм проектування системи LTE в програмі Atoll.
2. Поясніть призначення параметрів у вкладці «Transmitter» вікна властивостей БС.
3. Яке призначення параметрів у вкладці «LTE» вікна властивостей БС?
4. Як здійснити автоматичне планування сусідніх стільників в програмі Atoll?
5. Як здійснити розподілення частот передавачів БС для системи LTE уручну?
6. З чого складається та яке призначення ідентифікатора стільника (physical cell ID)?
7. Проаналізуйте результати виконання точкового аналізу у вкладці «Signal Analysis» свого варіанту завдання.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ТА ВКАЗІВКИ ПРО ПОРЯДОК ЗАХИСТУ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Критерії оцінювання лабораторних робіт з кредитного модуля “Безпроводові телекомунікаційні системи – 2. Системи та засоби зв’язку з рухомими об’єктами“:

2 бали – під час захисту виконаної роботи студент відповідає правильно, у повному обсязі;

1,5 бали – під час захисту виконаної роботи студент допускає незначні неточності у відповідях;

1 бал – під час захисту виконаної роботи студент погано орієнтується в матеріалі;

0,5 бали – лабораторна робота виконана студентом у відведений розкладом час;

0 балів – лабораторна робота не виконана.

Під час захисту лабораторної роботи студент надає звіт, оформлений відповідно до вимог ДСТУ 3008-95, який обов’язково повинен містити:

- титульний аркуш з номером та назвою лабораторної роботи;
- мету роботи;
- завдання на роботу;
- порядок виконання та результати роботи відповідно до завдання (індивідуально для кожної роботи ця частина звіту складається згідно з пунктом «Зміст звіту»);
- висновки.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Весоловский Кшиштоф. Системы подвижной радиосвязи / Весоловский Кшиштоф. Пер. с польск. И. Д. Рудинского; под ред. А.И. Ледовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. - 536 с.
2. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Бернард. – М.: Вильямс, 2004. – 1104 с.
3. T. Rappaport. Wireless Communications. Principles and Practice, 2nd Edition, Prentice Hall, 2002. - 763 p.
4. А.П. Бондарев та ін. Пристрої цифрових систем стільникового зв'язку. Навчальний посібник / Бондарев А.П., Мандзій Б.А., Давіденко С.В. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 222 с.
5. М.М. Климаш та ін. Технології мереж мобільного зв'язку / Климаш М.М., Пелішок В.О., Михайленіч П.М. – К.: "Освіта України", 2010. – 624 с.