

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень: другий (магістерський)

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня-професійна програма: Телекомунікації та радіотехніка

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Дослідження ефективності застосування мережі VSAT в
стілєникових системах радіозв'язку

ДРТР. 2020 067.02.21 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-20-1

підпис

М.О.Канюка

Ініціали, прізвище

Керівник: канд. військ. наук, доцент

підпис

В.І.Лужанський

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, професор

підпис

В.В. Мартинюк

Ініціали, прізвище

5 12 2021 р.

Хмельницький, 2021

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 172 – Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

Мерзогін В. В.
« 2 » вересня 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Канюка Максим Олександрович

1 Тема роботи: Дослідження ефективності застосування мережі VSAT в стільникових системах радіозв'язку

керівник роботи Лужанський Віктор Ігорович, к.в.н. доцент

Затверджено наказом по університету від «1» вересня 2021р. № 118.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 01.12.2021р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: дослідження енергетичної ефективності цифрового супутникового каналу зв'язку в мережах VSAT.

Об'єкт дослідження: процес прийому цифрового сигналу в супутникових каналах зв'язку мережі VSAT.

Предмет дослідження: оцінка якості енергетичної ефективності цифрових сигналів супутникової лінії зв'язку в мережі VSAT.

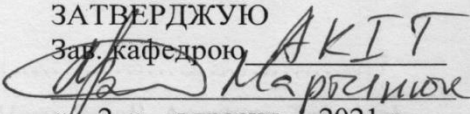
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)
Особливості технологій супутникових мереж VSAT. Дослідження послаблення сигналу в супутниковому зв'язку на базі мережі VSAT для 4 наземних станцій. Теоретичний розрахунок супутникової лінії наземна станція-космічна станція-наземна станція. Вплив швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на ймовірність бітової помилки при заданій потужності сигналу на вході приймача.

Завдання отримав *Мерзогін В. В.*

Науковий керівник *Мерзогін В. В.*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

 АКИТ
« 2 » вересня 2021 р.

ПЛАН ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вибір тематики	до 01.09.21	виконано
2	Аналіз початкових даних	08.09.20-14.09.21	виконано
3	Вступ, I розділ	18.09.20-30.09.21	виконано
4	II розділ	09.10.20-14.10.21	виконано
5	Оформлення публікації	15.10.20-20.10.21	виконано
6	III розділ	20.10.20-30.10.21	виконано
7	IV розділ	15.11.20-25.11.21	виконано
8	Рецензування	26.11.20-30.11.21	виконано
9	Подання готової роботи	01.12.21	виконано

Студент


Підпис

М.О. Канюка

Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

В.І. Лужанський

Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Особливості технологій мереж VSAT (Very Small Aperture Terminal мала супутникова наземна станція).....	10
1.1 Технології принципів роботи супутникової системи зв'язку VSAT.....	10
1.2 Топологія мереж VSAT.....	12
1.3 Переваги мережі VSAT.....	25
1.4 Глобальні мобільні системи супутникового зв'язку.....	26
Висновки до першого розділу.....	31
2 Дослідження послаблення сигналу в супутниковому зв'язку на базі мережі VSA.....	31
2.1 послаблення іоносфері.....	32
2.2 Ослаблення супутникового сигналу на території України (с.Суслівка,с.Дібровськ,м.Київ,м.Волочиськ).....	32
2.3 Підбір обладнання, передавачів і приймачів наземних супутникових станцій VSAT.....	32
2.3.1 Вибір обладнання, розрахунок потужності передавача и приймача ЗС1 (с. Суслівка- VSAT).....	45
Висновки до другого розділу.....	45
3.Розрахунок супутникової лінії зв'язку земна станція-космічна станція-земна станція	49
3.1 Характеристики приймачів та передавачів для супутникової ліній зв'язку.....	49
3.2 Енергетичний розрахунок ділянки "вгору" супутникової лінії земна-станція-космічна станція	51
3.2.1 Енергетичний розрахунок ділянки "вгору" супутникової лінії наземна-станція-космічна станція для с. Суслівка.....	51

3.2.2	Розрахунок відстані від наземної стації до космічної стації	51
3.2.3	Розрахунок ослаблення сигналу на лінії ЗС-КС	51
3.2.4	Розрахунок сумарної шумової температури приймального тракту космічної стації.....	54
3.2.5	Розрахунок сумарної потужності шумів на вході приймача ЗС	54
3.2.6	Визначення потужності сигналу на вході приймача космічної стації.....	55
3.2.7	Визначення потужності передавача ЗС.....	55
3.3	Енергетичний розрахунок ділянки "вниз" супутникової лінії земна-стація-космічна стація.....	65
3.3.1	Розрахунок відстані від космічної до стації наземної стації.....	65
3.3.2	Розрахунок відстані від космічної стації до наземної стації.....	65
3.3.3	Розрахунок ослаблення сигналу на лінії ЗС-КС.....	65
3.3.4	Розрахунок коефіцієнта підсилення антени центральної земної стації м.Київ.....	65
3.3.5	Розрахунок сумарної шумової температури приймального тракту центральної земної стації м.Київ.....	68
3.3.6	Визначення потужності сигналу на вході приймача центральної земної стації м.Київ.....	68
3.3.7	Визначення потужності передавача центральної земної стації м.Київ.....	70
	Висновки до третього розділу.....	70
4	Вплив швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на ймовірність бітової помилки	72

4.1 Дослідження впливу швидкості цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку VSAT.....	72
4.2 Залежність ймовірності бітової помилки від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношення сигнал/шум при заданій потужності сигналу на вході приймача населених пунктів Сулівка;Дібровськ;Волочиськ;Київ.....	82
Висновки до четвертого розділу.....	88
Висновки.....	90
Перелік джерел посилання.....	93
Додаток А. Презентація.....	99
Додаток Б. Апробація робот.....	116
Додаток В. Q-ФУНКЦІЯ.....	126

Вступ

Актуальність теми. У процесі обміну цифровою інформацією між наземними станціями мережі VSAT та штучним супутником Землі, який знаходиться на геостаціонарній орбіті, заводська обстановка може постійно змінюватися.

Від оперативної енергетичної оцінки, величини відношення сигнал/шум, рівня потужності сигналу на вході приймача наземної станції, ймовірності бітових помилок в залежності від швидкості передачі цифрової інформації, температури навколишнього середовища, рівня опадів та інших факторів залежать якісні показники супутникової мережі VSAT.

У результаті вирішення зазначених наукових задач з'являється можливість оптимізувати елементи супутникової мережі VSAT вже на етапі її проектування, модернізації та розгортання.

Таким чином, тема дипломної роботи, у якій вирішуються такі науково-технічні задачі, є актуальною.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є дослідження енергетичної ефективності цифрового супутникового каналу зв'язку в мережах VSAT. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

1. Особливості технологій супутникових мереж VSAT;
2. Дослідження послаблення сигналу в супутниковому зв'язку на базі мережі VSAT для 4 наземних станцій;
3. Теоретичний розрахунок супутникової лінії наземна станція-космічна станція-наземна станція;
4. Вплив швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на ймовірність бітової помилки при заданій потужності сигналу на вході приймача.

Об'єкт дослідження – процес прийому цифрового сигналу в супутникових каналах зв'язку мережі VSAT.

Предмет дослідження – оцінка якості енергетичної ефективності цифрових сигналів супутникової лінії зв'язку в мережі VSAT.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених наукових завдань використовується математичний апарат теорії цифрової обробки сигналів, передачі та приймання сигналів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше проведена оцінка енергетичної ефективності цифрових сигналів супутникової лінії зв'язку мережі VSAT для 4-х наземних станцій, які знаходяться на території України

2. Набув подальшого розвитку метод оцінки енергетичної якості сигналу супутникової лінії зв'язку мережі VSAT.

Практичне значення одержаних результатів:

1.Проведено аналіз енергетичної ефективності супутникового каналу зв'язку мережі VSAT для 4-х наземних станцій, які знаходяться на території України.

2.Використана методика дозволяє оцінити енергетичну ефективність якості супутникового зв'язку мережі VSAT в заданих районах розміщення наземних станцій. Це дозволить оперативно вирішувати питання щодо удосконалення супутникової мережі VSAT.

3.Сформульовані науково-обґрунтовані практичні рекомендації,щодо раціонального використання 3-х наземних станцій та центральної наземної станції мережі VSAT в різних умовах заводової обстановки.

Публікації. Результати дипломної роботи магістра опубліковані в науковій статті у науковому журналі «Вісник хмельницького національного університету»,№6.2021.

Структура та обсяг магістерської атестаційної роботи. Дипломна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та додатків. Дипломна робота магістра має загальний

обсяг сторінок, з яких основний зміст викладений на 90т сторінках друкованого тексту, містить 20 рисунків та 40 таблиць. Перелік джерел посилення складається з 50 джерел.

1 ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ МЕРЕЖ VSAT

1.1 Технології принципів роботи супутникової системи зв'язку VSAT

VSAT (Very Small Aperture Terminal) – це пристрій – наземна станція, яка через супутник виконує отримання і передачу даних через супутник. В системі VSAT використовуються антени малого діаметра, зазвичай 0,55-1,2 м. Така антена встановлюється на різні поверхні, або ставиться на землю. Антена відповідає діапазону передачі Ku, який використовується, в основному, для діючих супутникових систем. Щоб передавати дані в діапазоні «C» необхідна антена розміром біля 1,8 м.

Мережею VSAT є будь-яка мережа супутникового зв'язку, що включає в себе задіяні земні станції з невеликими антенами. Особливості мережі VSAT на відміну від стандартних систем супутникового зв'язку:

- мережі VSAT є мережами з фіксованою супутниковою службою;
- космічний сегмент VSAT базується на ресурсах геостанційних супутників-ретрансляторів з безпосередньою ретрансляцією і приймально-передавальними антенами з глобальним або національним променями;
- мережа VSAT є в основному відомчою мережею;
- діаметр антен терміналів мереж VSAT не перевищує 4-х метрів.

Супутникові системи зв'язку взаємно з мережею земних станцій VSAT забезпечують як цифровий телефонний зв'язок, так і цифрову передачу даних. При передачі мови супутникові системи утворюють групові тракти, які являють собою сукупність технічних засобів, що забезпечують проходження групового сигналу, тобто кілька телефонних підканалів об'єднуються в один супутниковий канал і канали передачі, що представляють сукупність засобів та забезпечують передачу сигналів від однієї точки в іншу.

Канали та групові тракти супутникових систем зв'язку досить широко використовуються як на магістральних, так і внутрішньозонових телефонних мережах зв'язку. Іноді і на місцевих лініях зв'язку такі системи дозволяють організувати прямі закріплені канали і тракти між будь-якими пунктами зв'язку в зоні обслуговування ШСЗ. У такому випадку вони можуть працювати в режимі незакріплених каналів, при якому супутникові канали і тракти можуть оперативнo перемикатися з одних напрямків на інші при зміні потреб трафіку на мережі, а також використовуватися найбільш ефективно – повно доступними пучками.

На сьогоднішній день створено кілька супутникових систем зв'язку, які використовують систему VSAT. Однією з типових систем є система, організована на базі геостационарних супутників VSAT, що працюють у складі даної системи, встановлені в ряді країн, в тому числі і в Україні.

Особливістю станцій VSAT є можливість їх розміщення в безпосередній близькості від користувачів, які завдяки цьому можуть обходитися без наземних ліній зв'язку.

Так само ефективними системами із закріпленим каналом, як працюють на швидкостях від 10 кбіт/с і більше, є такі, які використовують тимчасове, частотне, кодове або комбіноване поділ каналу між багатьма абонентськими земними станціями.

Один з параметрів, що характеризує супутникові системи, є протокол. Перші супутникові системи були безпротокольними, а канал користувача був прозорий. Можна визначити головний недолік-передача інформації користувача без підтвердження її доставки приймаючою стороною. У подібних системах не обумовлені правила діалогу між учасниками обміну інформацією. Таким чином, якість супутникових систем визначається тільки якістю супутникового каналу. При типових значеннях ймовірності помилки на символ в межах 10^{-6} .. 10^{-7} передача великих файлів через супутникові системи, навіть з використанням різних завадостійких кодів ускладнена, а іноді і просто неможлива.

Головна перевага земної станції VSAT перед звичайним наземним з'єднанням-це відсутність обмежень досяжності кабелю, що проходить під землею. Земна станція VSAT може бути встановлена в будь - якому місці-за умови, що вона знаходиться в радіусі зони вільної видимості супутника. Станції VSAT можуть як передавати, так і отримувати будь-які типи трафіку, будь то відео, аудіо або інші дані на постійній високій швидкості незалежно від їх віддаленості від наземних комунікаційних станцій та інфраструктури.

Мережі VSAT вирішують питання інформаційного забезпечення як федеральних і муніципальних органів, так і всіляких компаній і корпорацій, а так само і приватних осіб.

1.2 Топологія мереж VSAT

До складу мережі VSAT входять:

- центральна земна станція (ЦЗС);
- геостационарний супутник-ретранслятор (ГСР);
- центр управління мережею (зазвичай суміщений з ЦЗС);
- фіксовані станції VSAT, розташовані безпосередньо у користувачів.

Початком всієї мережі, звичайно ж, є центральна земна станція, в якій зосереджено основне комутаційне обладнання, а також програмне забезпечення, необхідні програмні засоби, які будуть використані для контролю і управління супутниковою системою зв'язку. Центральна земна станція, як правило, повинна мати зв'язок з комунікаційною мережею, як загального користування, так і глобальною мережею Інтернет, в деяких випадках ЦЗС має зв'язок з корпоративними мережами підприємствами.

Центральна земна станція виконує функції центрального вузла і забезпечує управління за роботою всієї мережі, перерозподіляючи її ресурси, виявляючи несправності, здійснює тарифікацію послуг мережі і сполучення з наземними лініями зв'язку. ЦЗС встановлюється у вузлі мережі, на який припадає найбільший трафік.

Каналоутворююча апаратура виконує функцію формування супутникових радіоканалів і стикування їх з наземними лініями зв'язку. Кожен з постачальників систем супутникового зв'язку розробляє свої індивідуальні рішення в цій частині ЦЗС, що часто виключає можливість використання для побудови мережі апаратуру і абонентські станції інших фірм. Дана підсистема найчастіше будується за модульним принципом, що дозволяє зі збільшенням зростання трафіку і кількості абонентських станцій в мережі легко нарощувати нові блоки для збільшення її пропускнуої здатності. Центр управління мережею забезпечує управління і стеження за роботою всієї мережі, виявляючи несправності, перерозподіляючи її ресурси між абонентами, а так само здійснює тарифікацію послуг, що надаються і т. п.

Абонентський VSAT термінал складається з: антенно-фідерного пристрою, зовнішнього радіочастотного блоку і внутрішнього блоку, так званого модему. Зовнішній блок являє собою приймально-передавач або приймач і забезпечує сполучення супутникового каналу з термінальним обладнанням користувача, чи то комп'ютер, сервер, телефон, вузлова автоматична телефонна станція (ВАТС) і т. д.

Мережі VSAT будуються на базі геостаціонарних супутників-ретрансляторів, що дозволяє максимально спростувати конструкцію абонентських терміналів і постачати їх простими фіксованими антенами без системи стеження за супутником. Робота такої мережі йде за таким принципом. Що супутник приймає сигнал від земної станції, підсилює його і направляє назад на Землю. Важливими характеристиками супутника при такій роботі є потужність бортових передавачів і кількість радіочастотних каналів (стовбурів або транспондерів) на ньому. Стандартний ствол має смугу пропускання 36 МГц, що відповідає максимальній пропускнуої здатності близько 40 Мбіт/с. Потужність передавачів змінюється від 20 до 100 і більше ват. Для організації роботи через малогабаритні абонентські станції типу VSAT необхідні передавачі з вихідною потужністю близько 40 Вт.

Мережа управляється на основі апаратно-програмних засобів, що забезпечує доступ операторів до мережевих ресурсів, а так само дозволяє здійснювати контроль, фіксацію і відображення загального поточного стану даної мережі для передачі групового потоку, у який входять мова, дані, факс та ін., використовуються мультиплексори, які здійснюють тимчасове ущільнення сигналів.

Вихідна інформація з ЦЗС на VSAT відправляється спочатку на транспондер супутника, який приймаючи її, підсилює і передає на землю для прийому віддаленою станцією VSAT. Віддалена станція VSAT, посиляє інформацію від станцій в ЦЗС за допомогою цього ж транспондера супутника.

Щоб забезпечити одночасне використання супутникового ретранслятора декількома користувачами застосовують системи множинного доступу:

- з частотним поділом, при якому кожен користувач має окремий діапазон частот;

- з тимчасовим поділом, коли кожен користувач має певний часовий інтервал, так званий таймслот, протягом якого може проводити передачу і прийом даних;

- з кодовим поділом, коли кожен користувач має кодову послідовність, ортогональну кодовим послідовностям інших користувачів. В такому випадку, дані користувача накладаються на кодову послідовність так, що передаються сигнали різних користувачів не заважають один одному, хоча і передаються на одних і тих же частотах.

При частотному поділі всі активні земні станції працюють безперервно і одночасно, тому їх енергетичний ресурс використовується на 100%. Передавач ретранслятора в даному випадку працює в багатосигнальному режимі і забезпечує прийнятний рівень спотворень і використовується на 20-50%. Частотний розподіл каналів застосовують при числі терміналів VSAT більш 100 штук. Основний недолік частотного поділу полягає в тому, що

досить складно перерозподілити пропускну здатність між ГСР і земною станцією. Для такого перерозподілу необхідно змінювати тактові і робочі частоти. Якщо земна станція буде багатоканальною, то їх передавачі будуть працювати в багатосигнальному режимі, що призведе до зниження ефективності використання їх вихідної потужності.

При тимчасовому поділі станції працюють в імпульсному режимі по черзі, таким чином, їх пікова потужність в n разів більше, ніж при частотному поділі, що є основним недоліком для тимчасового поділу.

В цьому випадку, кожній групі повинна бути присвоєна своя частота, а в групах має бути здійснено ущільнення за тимчасовим принципом. В такому випадку можна обійтися зниженням вимог до пікової потужності передавачів земної станції. Але може зменшитися пропускну здатність ретранслятора між каналами зв'язку. Це невелика плата за використання більшого числа ЗС.

У ЦЗС знаходяться обладнання та програмні засоби, що використовуються для контролю супутникової мережі зв'язку. ЦЗС зв'язується з комунікаційною мережею, такою як, наприклад, телефонна мережа загального користування, комп'ютерна мережа компанії або глобальна мережа Інтернет.

Таким чином, частиною ЦЗС є одна з найбільших розміром антен, близько 4,5 - 11 м. Її внутрішні елементи включають безліч пристроїв, які можуть контролювати двосторонню передачу через дану антену, перетворення між супутником і наземними протоколами та інші технічні питання. Контроль за функціонуванням всіх пристроїв здійснює сервер системи управління мережею, а також здійснює розподіл черговості передачі повідомлень тим додаткам, які придбали покупці з урахуванням вимог до якості обслуговування. Отже, VSAT-це пристрої, що використовуються в важкодоступних місцях для забезпечення комунікації з центральним пунктом зв'язку через центральну земну станцію. При такій конструкції, що виходить з ЦЗС на VSAT інформація відправляється на транспондер супутникової системи, який приймає, підсилює і передає її на Землю для прийому

віддаленою станцією VSAT. Віддалена станція VSAT посилає від станцій ЦЗС інформацію шляхом того ж самого транспондера супутника. Такий принцип передачі інформації, в якому всі мережеві комунікації проходять через процесор ЦЗС, називається «зірка», з ЦЗС в центрі цієї зірки. Перевагою "зірки" є необмежена кількість станцій VSAT, які можуть бути приєднані до ЦЗС.

Залежно від розподілу трафіку між абонентами, архітектура мереж супутникового зв'язку відрізняється за деякими ознаками, такими як конфігурація трафіку та структура його управління.

Топологія мережі VSAT складається з:

- топологія по типу «зірка»;
- топологія по типу «кожний з кожним».

У топології «зірка» передача з віддалених терміналів комутується на ЦЗС (рисунок 1.1) . ЦЗС в такій топології знаходиться в центрі, тобто всі вхідні сигнали приходять спочатку на земну станцію потім, після обробки відправляються абонентам.

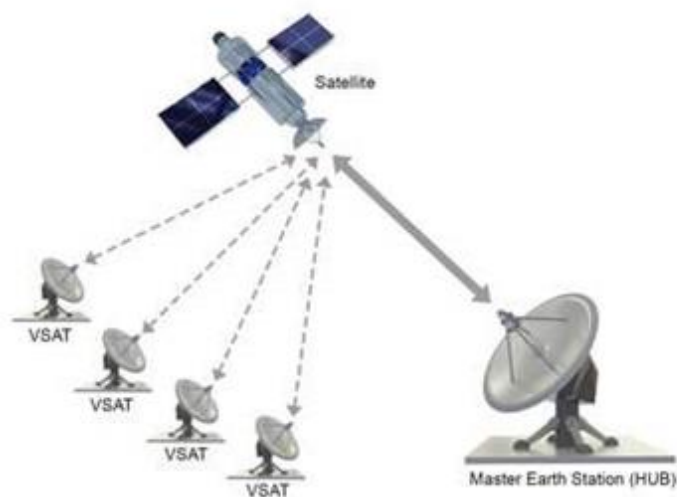


Рисунок 1.1 – Топологія «зірка»

Архітектура за типом «зірка» використовується:

- при великій кількості периферійних терміналів;
- за відсутності необхідності телефонних та інших пристроїв;

- при використанні спрямованої передачі даних (наприклад, в мережах збору інформації).

Якщо вважати, що супутник на геостаціонарній орбіті знаходиться на висоті 35 786 км від поверхні Землі, то передача повідомлень буде займати певний час. Із збільшенням відстані, передача 1 біта інформації з одного місця в інше (одиничний "стрибок") займає близько 0,25 секунди. Якщо ж передача здійснюється від однієї станції VSAT на подібну станцію, то топологія «зірка» має на увазі під собою цілих два таких стрибка, що призводить збільшення затримки в два рази і складе 0,5 секунди.

Така затримка в часі не значна, якщо передача даних здійснюється між двома комп'ютерами. До того ж, топологія «зірка» дозволяє станціям VSAT використовувати менші розміром антени і передавачі, що мають малу потужність, так як вони працюють з використанням однієї великої антени на ЦЗС.

Але затримка при використанні топології "зірка" може стати помітною тільки при голосовій передачі. Тому дану топологію краще використовувати при передачі повідомлень, яка відбувається між центральною системою і віддаленими станціями і становитиме один стрибок або коли передача від однієї станції VSAT до іншої не вимагає миттєвої відповіді.

Топологія за типом "кожен з кожним". У даній топології, її ще називають топологія Mesh обмін інформації відбувається між периферійними терміналами (рисунок 1.2). В такому випадку, немає необхідності у використанні великої ЦЗС, а управління і розподіл ресурсів виконує координуюча станція, в якості якої може виступати будь-яка земна станція, якщо у неї є відповідний апаратно-програмний комплекс засобів.

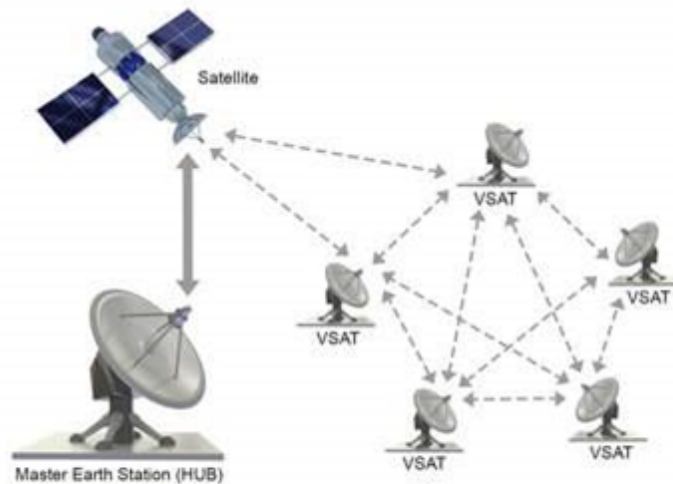


Рисунок 1.2 – Топологія «кожен з кожним»

У мережі типу "кожен з кожним" забезпечуються прямі з'єднання між будь-якими абонентськими станціями (так званий "односкачковий" режим зв'язку). Кількість, в такому випадку, необхідних дуплексних радіоканалів одно $N \times (N - 1)$, де показник N - це число абонентських станцій в даній мережі. Таким чином, кожна абонентська станція повинна мати як мінімум $N - 1$ каналів для прийому і передачі одночасно. Дана архітектура оптимальна для таких мереж як телефонна, які створюються у важкодоступних або віддалених районах, а також для мереж передачі даних з малим числом віддалених терміналів.

Для роботи між двома невеликими терміналами від мережі VSAT потрібні великі енергетичні ресурси в даній топології на відміну від топології «зірка», так як в мережах по типу «кожен з кожним» на абонентських станціях використовуються потужні передавачі і антени більшого діаметру.

Топологія мережі за типом "mesh" забезпечує таку можливість VSAT, як спілкування безпосередньо з іншими станціями VSAT, причому зводячи до мінімуму затримку при передачі групових потоків повідомлень. Це означає, що здійснити телефонну розмову між людьми, які говорять по телефонах, з'єднаним через мережу VSAT, можна лише одиничний стрибок, непомітний для більшості людей.

Технологія Mesh IP підтримує передачу таких даних в один єдиний стрибок для комп'ютерних додатків, таких як програмне забезпечення клієнт / сервер, яке вимагає миттєвого з'єднання між комп'ютерами у віддалених точках.

Обладнання для мереж за типом «Mesh» схоже з обладнанням для «двонаправленого супутникового інтернету». Це пояснюється тим, всі абонентські станції за типом «Mesh» працюють зі станціями мережі типу «Зірка» в одній площині, під управлінням єдиної центральної станції «(хаба)». Але є дві істотні відмінності цих топологій і обладнання.

Перша відмінність-кількісна. Станції за типом "зірка «працюють» в парі" з центральною станцією, що має велику антену великого діаметру і досить потужний передавач, тому вони самі можуть мати досить невеликі антени і досить слабкі передавачі.

Станції за типом "Mesh" працюють один з одним, тому вони має антени дещо більшого розміру, ніж станції по типу «зірка» і більш потужні передавачі. Друга відмінність-якісна. Станції за типом "зірка" приймають тільки один сигнал типу TDM від своєї центральної станції. Він являє собою безперервний цифровий потік на одній несучій частоті, в якому передаються як корисні дані, так і службові команди з управління даної мережі. За структурою цей сигнал схожий на сигнал супутникового цифрового телебачення типу DVB. Станції за типом "Mesh" те ж отримують тимчасову синхронізацію від своєї центральної станції мережі і повністю управляються нею: пристрій «хаб» аналізує потреби своїх станцій на передачу і динамічно розподіляє між ними пропускну здатність загального супутникового каналу зв'язку. Тому станція П типу «Mesh» повинна приймати сигнал типу TDM від своєї центральної станції. У той час як вона повинна так само приймати передачі інших таких же своїх станцій. Виконувати це досить складно по тому як вони передають інформацію пакетами, або "спалахами" (burst mode), тільки в тимчасових віконцях (тайм-слотах), призначених їм своєю центральною станцією. Крім того, вони передають на тій частоті, відмінній

від частоти несучої сигналу типу TDM. Тому такі термінали абонентських станцій за типом "Mesh" мають два незалежних демодулятора: один служить для прийому TDM-несучої від пристрою "хаб", другий - для прийому «беретів» від інших абонентських станцій мережі типу «Mesh».

Різні виробники реалізують цю особливість по-своєму. Абонентський термінал з назвою SkyEdge-Pro від фірми Gilat має своє базове шасі з одним лише демодулятором типу TDM, яке забезпечує роботу тільки в одному режимі і це по типу «зірка». Для роботи ж в режимі за типом "Mesh" це шасі комплектується додатковою платою для другого демодулятора. У такого терміналу вже буде два окремих входи з різними F-роз'ємами, для підключення яких до LNB буде використовуватися вже зовнішній пристрій - спліттер.

Обладнання Фірми IDirect побудовано вже за наступним принципом: для роботи з одним і тим же пристроєм « хаб» вже використовуються термінали типу Infinity-3100, які підтримують тільки топологію «Зірка» і термінали типу Infinity-5300, які підтримують і топологію «Зірка» , «Mesh».

Одночасно з роботою в мережі за типом «Mesh» «абонентські станції можуть працювати в мережі з топологією за типом «зірка», забезпечуючи доступ в інтернет .

Мережі за типом "Mesh" підходять як для відеоконференцій, так і телефонії, але краще для відеоконференцій. Тимчасова затримка в такому випадку мінімальна і становить від 0,25 секунд і не залежить від напрямку передачі трафіку. Можливі швидкості передачі до 3 Мбіт в сек-це при сучасних технологіях стиснення відео, таких як MPEG-4 AVC, H.264, Windows Media, що відповідає якості мовного телебачення. Канал може так само бути наданий з гарантованою мінімальною швидкістю або гарантованою постійною швидкістю.

При цьому клієнтам будуть виділятися не фізичні канали, як в режимі SCPC, а будуть виділятися віртуальні канали, які після закінчення конференції автоматично переходять іншим користувачам мережі.

Абонентська ж станція буде обладнана антеною малих розмірів, близько 1,8...2,4 м. і одним терміналом, вартість буде вище вартості станції "двонаправленого супутникового інтернету", але не значно відрізняться. Частотного ж присвоєння не потрібно, достатньо буде тільки свідоцтва про реєстрацію РЕМ. Все це дозволяє організувати ВКС з великою кількістю віддалених користувачів, що знаходяться в будь-якій точці земної кулі. У їх числі можуть бути «мобільні» учасники з пересувними або переносними VSAT. Центральний офіс і його сервер відеоконференцій можуть перебувати в будь-якому місці за і в межах великих міст. Наявність власної супутникової станції в центральному офісі робить систему повністю автономною і незалежною від інших операторів зв'язку

Існують мережі VSAT-станцій, що працюють на принципі SCPC. Стандартний варіант зв'язку SCPC де використовується зв'язок за принципом "point - to-point" ("точка-точка") - це дві VSAT-станції, з'єднані супутниковим каналом і розташовані у користувачів (рис.1.3). При наявності такого каналу користувачі можуть встановлювати зв'язок один з одним в будь-який момент.

Найчастіше доводиться мати справу з конфігурацією мережі типу "зірка" (принцип "центр з кожним"), коли є одна станція в головному офісі (відділенні, представництві і т.п.) і кілька станцій у віддалених відділеннях, філіях. При використанні даної схеми можлива організація потоків цифрової інформації зі швидкістю від 32 кбіт/с до 8 Мбіт/с і забезпечення телефонного, телефаксного зв'язку між центром і периферією. Дана система відкриває можливість виходу через супутникові станції на міжнародний телепорт в Берліні і далі в будь-яку країну світу. Крім цього можливе отримання прямого Московського номера і через телепорт в Москві можливе ведення телефонних переговорів по країнах колишнього СРСР. В цілому слід зазначити, що SCPC-система є дуже потужною альтернативою орендованих некомутованих каналів, відомчих ліній і т.п. вельми приваблива вона як засіб передачі великих обсягів інформації з високою швидкістю.

Внаслідок використання супутникових цифрових каналів, вона є некритичною по дальності і завадозахищеною .

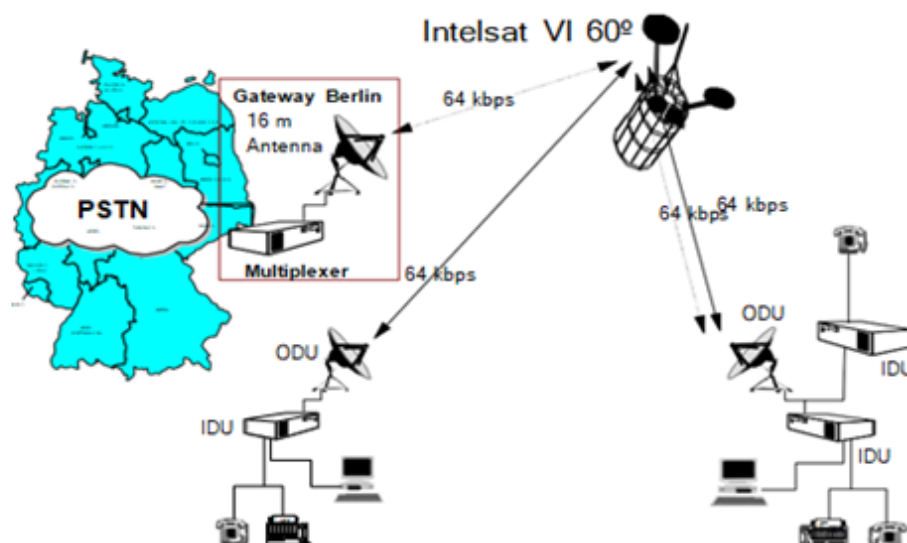


Рисунок 1.3 – Схема роботи SCPC-системи

TES-система призначена для обміну телефонною та цифровою інформацією в мережах, що побудовані за принципом "mesh" ("кожен з кожним") або, іншими словами, в мережах з повним доступом. Це означає, що можливий телефонний зв'язок між будь-якими двома абонентами мережі, крім цього абонентам забезпечується вихід в міжнародну мережу загального користування через телепорт (Gateway) в Берліні(Рисунок 1.4)

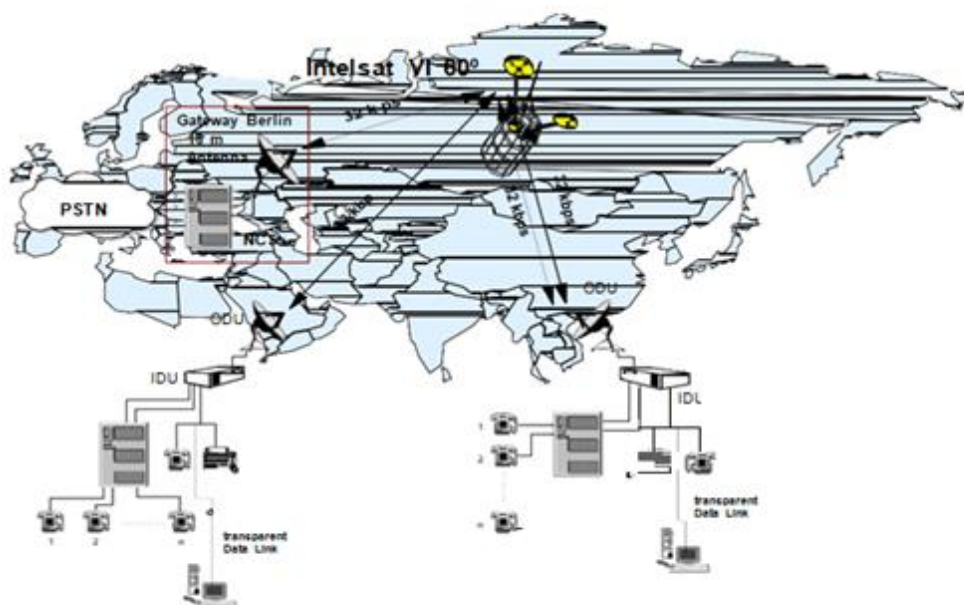


Рисунок 1.5 – Схема роботи TES-системи

У найпростішій конфігурації забезпечується зв'язок по одному телефонному або факсимільному каналу. Абоненту надається додаткова можливість організації передачі цифрової інформації між двома станціями, що входять в мережу. Мережа працює за принципом DAMA - коли абонент не має жорстко закріпленого за ним супутникового каналу, а цей канал надається йому на першу вимогу, причому з високою (більше 99%) ймовірністю. Цей спосіб дозволяє зменшити число орендованих супутникових каналів і забезпечити прийнятні ціни для абонентів. В цілому, використання саме TES-системи є найбільш оперативним і дієвим способом доступу в міжнародну телефонну мережу, а також хорошим засобом зв'язку з тими областями, які володіють або нерозвинутою інфраструктурою зв'язку, або взагалі не мають такої [7].

Система персональних земних станцій (Personal Earth Station) PES супутникова діалогова пакетно-комутована мережа, призначена для обміну телефонною і цифровою інформацією в рамках ССС з топологією типу «зірка», з можливістю повного дуплексу.

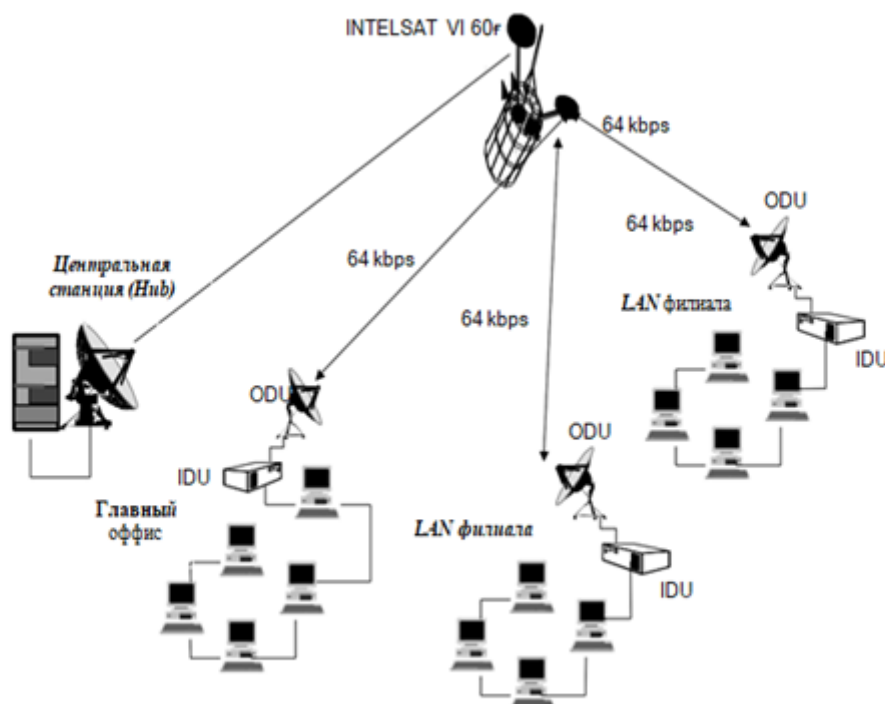


Рисунок 1.6 – Структура PES-системи

1.3 Переваги мережі VSAT

Велику популярність використання мереж VSAT пояснюється великою кількістю переваг, що складаються з:

- широти охоплення території та її гнучкості конфігурації. Один такий ГСР з глобальним приймальним променем може обслужити близько третини всієї Земної куліб що дозволяє використовувати його для створення великомасштабних мереж зв'язку з такими вузлами, які будуть розподіленими по великій території. Діючі супутникові мережі VSAT дуже легко і дешево розширити, а так само реконфігурувати відповідно до вимог абонентів;

- можливості використовувати цифрові канали систем зв'язку широкого діапазону і великої пропускної здатності, що дає можливість користувачам побудувати мережу, з високими необхідними інформаційними послугами і до їх якості при мінімальних на них витратах;

- високої якості переданих даних. Мережі VSAT , забезпечують ймовірність помилкового прийому двійкового символу не більше 10^{-6} ;

- терміналів мережі VSAT, які встановлюються поблизу робочих місць абонентів і легко з'єднуються з їх кінцевим обладнанням та інформаційними системами;

- можливості інтегрального обслуговування. В одній такій мережі VSAT можна розмістити передачу всіх типів трафіку, таких як дані, мова і відео. Засоби мережі VSAT підтримують велику кількість інтерфейсів і сумісні з різними протоколами різних мереж;

- керованість. До складу Центральної земної станції мережі VSAT входить підсистема управління мережею, яка реалізована на базі керуючого додатка і надійного його сервера. Ця система може гарантувати ефективне управління функціонуванням, та й не тільки самої центральної ЗС, але і всіх її периферійних терміналів. За допомогою неї здійснюється як управління

інформаційними потоками, так і технічна діагностика можливих несправностей;

- можливості дистанційного керування, а так само діагностики мережі VSAT і його терміналів з Єдиного віддаленого центру системи;

- інформаційної безпеки, що забезпечує використання таких ефективних алгоритмів криптозахисту переданих даних. Потайне підключення апаратури прослуховування до обладнання терміналів мережі VSAT, безпосередньо контролюваному користувачем, справа складна;

- вартість станції мережі VSAT відносно невелика і поступово знижується;

- як правило, термінали VSAT не вимагають постійного технічного обслуговування.

1.4 Глобальні мобільні системи супутникового зв'язку

За принципом побудови дані системи не відрізняються від наземних мобільних систем зв'язку. Відмінність лише полягає в тому, що якість BS використовують бортові багатоканальні радіостанції (Bs) штучних супутників Землі (рисунок 1.7)

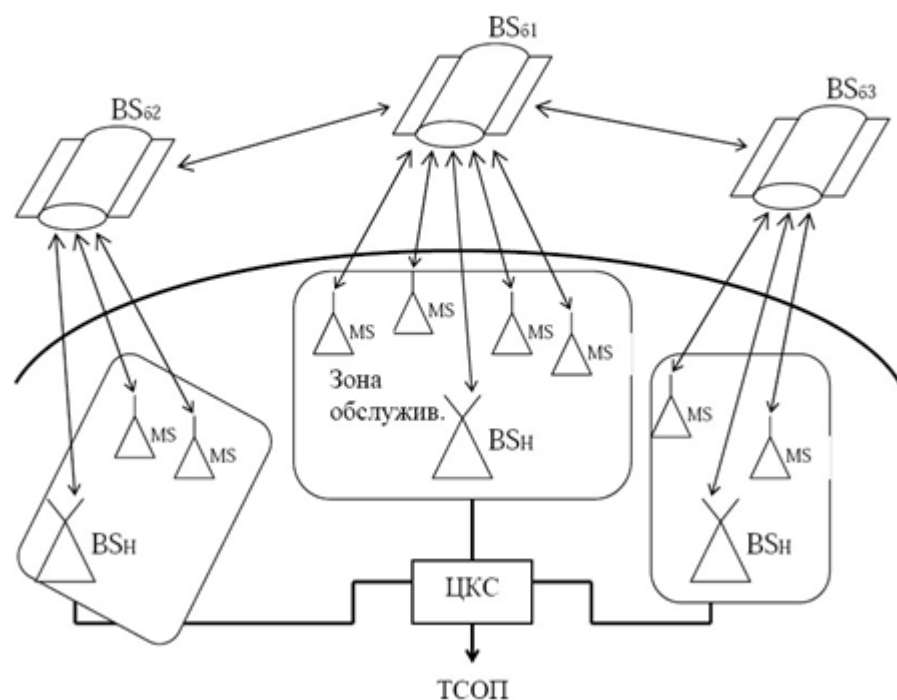


Рисунок 1.7 – Супутникові мобільні системи зв'язку

Для організації зв'язку мобільного абонента з будь-яким іншим мобільним абонентом однієї і тієї ж зони обслуговування використовується дуплексний радіоканал з ретрансляцією через бортову базову станцію BSб мережі. Для організації зв'язку будь-якого мобільного абонента з будь-яким іншим абонентом системи ТСОП використовується вже спеціальний радіоканал між BSб і неземною базовою станцією BSh. BSh, зазвичай, за допомогою магістральної сполучної лінії (МСЛ) з'єднується з АТС даної зони обслуговування.

Для організації зв'язку будь-якого мобільного абонента з будь-яким іншим мобільним або стаціонарним абонентом будь-яких інших 3,0 ретрансляція повідомлень, зазвичай, здійснюється двома способами. Перший спосіб забезпечує ретрансляцію повідомлень по спеціалізованих радіоканалах, створюючи між BSб сусідніх ШСЗ (ретрансляція в космосі) з'єднання.

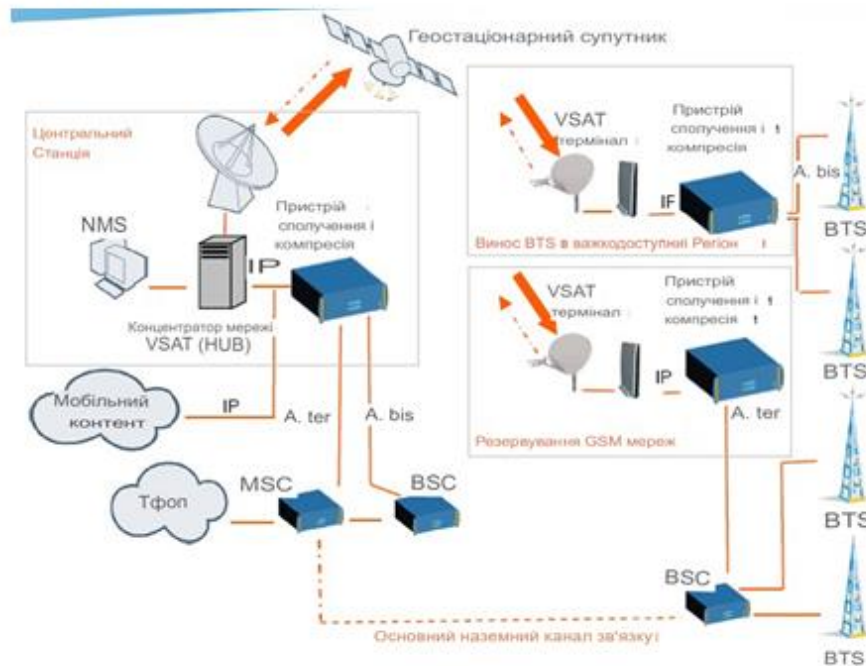
Другий спосіб дозволяє організувати ретрансляцію повідомлень по таких каналах наземних магістральних ліній зв'язку через центр комутації зв'язку.

Використання супутникових технологій разом з сучасними методами обробки трафіку мобільних мереж GSM дозволяє швидко розгорнути мережу мобільного зв'язку в таких важкодоступних регіонах, при цьому експлуатаційні витрати на організацію каналів зв'язку будуть відповідати реальному мережевому трафіку в даних мережах, забезпечуючи максимальну рентабельність.

Перевагою супутникових технологій зв'язку є можливість динамічного перерозподілу мережевого ресурсу між такими різними напрямками і видами служб. Так, наприклад, канали зв'язку у важкодоступних регіонах, резервування існуючих наземних ліній зв'язку, а також широкосмугова мережа зв'язку для мобільних мереж GSM можуть ефективно

використовувати єдину мережеву інфраструктуру.

Термінали можуть працювати в такому режимі виділеного каналу або доступу на вимогу до Єдиного мережевого ресурсу мережі. Земні станції так само дозволяють надавати додаткові види послуг: цифрове ТБ мовлення, широкосмуговий IP доступ для додатків з використанням GPRS, EDGE, WiMAX / WiFi (рисуюнок 1.7)



Рисуюнок 1.7 – Супутниковий зв'язок для мереж GSM

Супутникові ж термінали на виході своєї системи мають такий інтерфейс типу G. 703 з підтримкою протоколів таких протоколів як A, E, A. ter і A. bis (спеціалізовані протоколи для передачі GSM трафіку) і можуть бути використані як на будь-якому фрагменті мобільної мережі GSM, так і забезпечуючи трафік між Регіональним Центром Комутації мобільного GSM трафіку (MSC) і так ж контролери базових станцій BSC, так само як і підключення віддалених базових станцій BTS до контролера BSC мережі.

У всіх цих випадках може забезпечуватися максимальна ефективність використання мережевого ресурсу мережі, завдяки інтелектуальній обробці трафіку GSM-мереж. Наприклад, дані типу TDM конвертуються в пакетні, а так само здійснюється компресія цих даних сигналізації і придушення

резервних даних в каналі типу TCH, ну і динамічний перерозподіл такого ресурсу між активними телефонними з'єднаннями та іншими службами мережі, імітація протоколу SS7 і так далі. Забезпечується сумісність з таким обладнанням GSM основних виробників. Дане рішення може бути застосовано для побудови мереж 3G.

Пропоновані супутникові термінали так само підтримують технологію типу Drop & Insert, що дозволяє істотно зменшити потребу в супутниковому сегменті.

Антенна система супутникового терміналу повинна бути встановлена на даху, стіні будівлі або на щоглі, на якій кріпляться самі антени мобільного GSM. Супутниковий модем-маршрутизатор розташовується в самому апаратному залі в безпосередній близькості до обладнання мережі GSM, до якого він підключається по протоколу типу A.E, A. ter і A. bis. Додаткові ж інтерфейси мережі LAN можуть бути використані для підключення як широкосмугових послуг в мережу GSM, так і для конкретних з'єднань мобільного оператора.

Супутниковий термінал же забезпечує обробку, а так само компресію голосового типу трафіку і сигналізацію, формуючи їх в пакети IP, які передаються по супутниковій мережі зв'язку на центральну станцію, де в свою чергу, маршрутизуються в точку приєднання до існуючого контролера базових станцій або до центру комутації рухомого зв'язку.

Станції мережі типу «Mesh» використовують для роботи за схемою типу «точка - точка» зі швидкостями близько 3 Мбіт/с і більше. Це дає можливість використовувати станції типу «Mesh» для підключення таких віддалених базових станцій стільникового зв'язку до таких же контролерів базових станцій. Переваги «Mesh» такого типу підключення перед «класичним» SCPC очевидні. По-перше, обладнання такої земної станції мережі за типом «Mesh» коштує дешевше, ніж обладнання станції типу SCPC з такою ж комплектацією. По-друге, для станцій мережі типу «Mesh» не потрібно отримувати частотне присвоєння. Так само, якщо необхідно

підключити не одну, а відразу кілька базових станцій до одного контролера за схемою «зірка», для типу SCPC в центрі такої «зірки» доведеться використовувати кілька таких модемів

- за кількістю напрямків зв'язку, А тип "Mesh" дозволяє використовувати один термінал в усіх напрямках. Але є і проблеми в такому підключенні. На вході такої стільникової базової станції повинен існувати безперервний цифровий потік званий E1, хоча в супутниковому ж каналі зв'язку такі дані передаються не суцільним потоком, а час від часу, «спалахами» (такий режим називається «burst mode» або «VSAT mode»). Однак, потік E1-дуже неефективний переносник інформації. Він містить близько 30 каналів відцифрованого нестисненого трафіку типу «голос» (по 64кбіт/с), які можуть використовуватися не всі, а так само і ще 128 кбіт/с відводиться під сигналізацію (трансляція телефонного номера, підйом опускання трубки і т.п.). Для існуючих сучасних оптичних мереж це не є проблемою, а ось завантажувати таким типом трафіку супутникові канали зв'язку – не доцільно.

Тому між супутниковою станцією типу «Mesh» і стільникової ЄС включається "розумний" маршрутизатор, який по максимуму стискає передається E1 (рисунок 1.8)

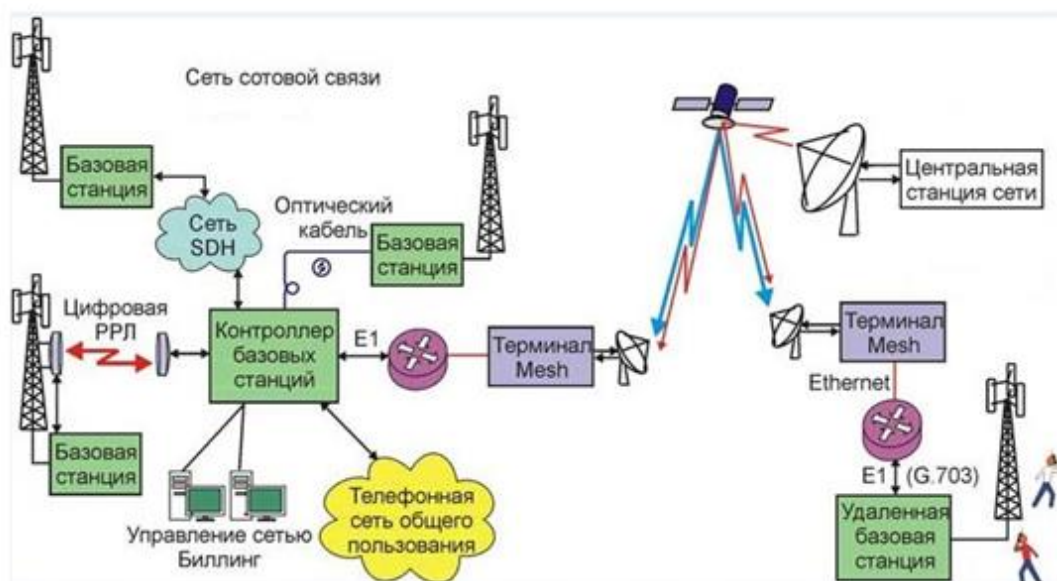


Рисунок 1.8– Підключення віддаленої базової станції стільникового зв'язку.

"Робочі" канали передачі голосу обробляються голосовим типом кодеком, «порожні» ж голосові канали викидаються, з каналу сигналізації видаляються тільки надлишкові дані. Отриманий же потік, вже зі змінною своєю бітовою швидкістю, фрагментується, а далі упаковується в пакети по протоколу IP і передається в супутниковому каналі в «burst mode».

З такими прийнятими даними проводиться зворотна процедура: з «спалахів» приймаються Пакети по протоколу IP, а з них витягуються ті дані, як голос декомпресується, надлишкові біти ж вставляються назад, так і відновлюється безперервний цифровий потік з постійною своєю бітовою швидкістю в 2048 кбіт/с.

Пакетна передача дозволяє використовувати «зкономлену» смугу пропускання супутникового каналу зв'язку іншим станціям мережі. У разі, коли жоден абонент мережі віддаленої ЄС не розмовляє із зовнішнім абонентом, тобто коли в E1 не зайнятий жоден голосовий канал, станція відправляє через супутник мінімум IP-пакетів. У неї не виникає необхідність використовувати чергове тимчасове своє вікно для передачі, і цим вікном може скористатися інша станція мережі зв'язку.

Маршрутизатори, що дозволяють ефективно стискати і передавати потік E1 за принципом IP - це дуже складне і дороге обладнання. Смуга на супутнику, відведена на дану клієнтську мережу по типу «Mesh», обмежена, завантаження голосових же каналів непередбачувана, а протокол IP не має таких механізмів, надійно забезпечують своєчасну доставку даних в таких умовах передачі. Тому рішення виходить не таке дешеве і не надійне. Але, останнім часом воно все частіше використовується стільниковими операторами, особливо в регіонах де утруднений доступ і прокладка кабельних мереж зв'язку.

Висновки до 1 розділу

1. Один штучний супутник Землі на геостаціонарній орбіті з глобальним приймальним променем може обслужити близько третини всієї земної кулі. Діючі супутникові мережі VSAT дуже легко і дешево розширити, а так само реконфігурувати відповідно до вимог абонентів.

2. Супутникові цифрові канали систем зв'язку VSAT мають широкий діапазон і велику пропускну здатність, що дає можливість мати мережу з високими необхідними інформаційними послугами високої якості з ймовірністю помилкового прийому двійкового символу в межах не більше 10^6 при мінімальних витратах.

3. Мережі VSAT мають низьку вартість, прості в технічному обслуговуванні і як правило, термінали VSAT не вимагають постійного технічного обслуговування.

4. Мережі VSAT забезпечують інтегральне обслуговування. В одній такій мережі VSAT можна розмістити передачу всіх типів трафіку: дані, мова і відео. Системи мережі VSAT підтримують велику кількість інтерфейсів і сумісні з різними протоколами різних мереж.

5. Центральна земна станція гарантує ефективне управління функціонуванням не тільки самої центральної ЗС, але і всіх її периферійних терміналів. За допомогою неї здійснюється як управління інформаційними потоками так і технічна діагностика можливих несправностей.

6. Системи VSAT забезпечують високу інформаційну безпеку з використанням ефективних алгоритмів криптозахисту переданих даних.

7. Оператори мобільного зв'язку застосовують мережі VSAT для приєднання віддалених базових станцій з малим трафіком телефонних розмов через інтерфейс E1(2.048 Мбіт/с).

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛАБЛЕННЯ СИГНАЛУ В СУПУТНИКОВОМУ ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ VSAT

2.1 Послаблення сигналу в іоносфері

Щоб визначити затухання на високих частотах в іоносфері використовується формула:

$$L_I = \frac{2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-3}}{f^2} \quad (2.1)$$

в якій f -частота в ГГц.

Затухання для двох робочих частот 11ГГц і 13ГГц в іоносфері ,з розрахунком відповідно ,будуть виглядати так:

$$L_I = \frac{2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-3}}{11^2} = \frac{0.002}{11^2} = 1.65 \cdot 10^{-5} \text{ дБ}$$

$$L_I = \frac{2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-3}}{13^2} = \frac{0.002}{13^2} = 1,18 \cdot 10^{-5} \text{ дБ}$$

Дослідження втрат сигналу при частоті 11 та 13ГГц при зміні пір року і часу доби.

2.2 Ослаблення супутникового сигналу на території України (с. Суслівка, с. Дібровськ, м. Київ, м. Волочиськ)

Затухання в атмосфері сигналу в с.Суслівка, Ріпкинського району, Чернігівської області в таблиці 2.1

Таблиця 2.1- Погодні дані с. Суслівка

Погодні дані	зима		весна		літо		осінь	
	день	ніч	день	ніч	день	ніч	день	ніч
Т, температура, К	275	273	284	281	297	295	287	282
Р, тиск, кПа	99	100	96	98	98	98	100	100

Вологість повітря, г/м ³	1,53	0,57	3,5	3	7,94	7,53	3,47	2,73
----------------------------------------	------	------	-----	---	------	------	------	------

Оптимальним варіантом був вибраний супутник ABS2, який являється геостационарним і повністю покриває територію України. Супутник знаходиться на геостационарній орбіті 75⁰ сх.д, який діє до 2032 року.

Ослаблення в спокійній атмосфері відбувається через поглинання киснем(2.2) і водяною парою(2.3) тропосферного шару:

$$L_k = 0.321 \frac{P \cdot f^2}{T^2} \cdot \left[\frac{\Delta_1 \cdot P}{\frac{f^2}{900} + (\Delta \cdot P)^2} + \frac{\Delta_2 \cdot P}{2 + \frac{f^2}{30} + (\Delta_2 \cdot P)^2} + \frac{\Delta_2 \cdot P}{2 - \frac{f^2}{30} + (\Delta_2 \cdot P)^2} \right]. \quad (2.2)$$

$$L_B = 5,72 \frac{P \cdot f^2}{T^{2,5}} \cdot e^{\frac{664}{T}} \cdot \left[\frac{\Delta_3 \cdot P}{\left(\frac{f}{30} - 0,741\right)^2 + (\Delta_3 \cdot P)^2} + \frac{\Delta_3 \cdot P}{\left(\frac{f}{30} + 0,741\right)^2 + (\Delta_3 \cdot P)^2} + \frac{0,0163 \cdot \rho \cdot f^2 \cdot \Delta_3 \cdot P}{T} \right]. \quad (2.3)$$

$$\Delta_1 = \frac{1,26 \cdot 10^{-2}}{T^{0,75}},$$

$$\Delta_2 = \frac{3,5 \cdot 10^{-2}}{T^{0,75}},$$

$$\Delta_3 = \frac{1,53 \cdot 10^{-2}}{T^{0,5}},$$

f - частота радіосигналу (ГГц),

P - тиск (кПа),

T - температура (К),

ρ - середня абсолютна вологість повітря (г/м³),

Δ_1, Δ_2 и Δ_3 - коефіцієнти.

Розрахунок на частоті 11 ГГц, взимку при світлому дні,

Розрахунок коефіцієнтів:

$$\Delta_1 = \frac{1,26 \cdot 10^{-2}}{275^{0,75}} = 1,826 \cdot 10^{-4}.$$

$$\Delta_2 = \frac{3.5 \cdot 10^{-2}}{T^{0.75}} = 5.073 \cdot 10^{-4}.$$

$$\Delta_3 = \frac{1.53 \cdot 10^{-2}}{T^{0.5}} = 9.325 \cdot 10^{-4}.$$

Розрахунок поглинання в кисні:

$$L_k = 0.321 \frac{99 \cdot 11^2}{275^2} \cdot \left[\frac{1.826 \cdot 10^{-4} \cdot 99}{\frac{11^2}{900} + (1.826 \cdot 10^{-4} \cdot 275)^2} + \frac{5.073 \cdot 10^{-4} \cdot 99}{2 + \frac{11^2}{30} + (5.073 \cdot 10^{-4} \cdot 99)^2} + \frac{5.073 \cdot 10^{-4} \cdot 99}{2 - \frac{11^2}{30} + (5.073 \cdot 10^{-4} \cdot 99)^2} \right] = 0.00841. \quad (2.3)$$

Розрахунок поглинання у водяній парі:

$$L_v = 5.72 \cdot \frac{101 \cdot 13^2}{275^{2.5}} \cdot e^{\frac{644}{275}} \cdot \left[\frac{9.325 \cdot 10^{-4} \cdot 99}{\left(\frac{13}{30} - 0.741\right) + (9.325 \cdot 10^{-4} \cdot 99)^2} + \frac{9.325 \cdot 10^{-4} \cdot 99}{\left(\frac{13}{30} + 0.741\right) + (9.325 \cdot 10^{-4} \cdot 99)^2} + \frac{0.0163 \cdot \rho \cdot 13^2 \cdot 9.325 \cdot 10^{-4} \cdot 99}{T} \right] = 0.083. \quad (1.3)$$

Таблиця 2.2 – Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 11ГГц с.Суслівка

Пора року	Час доби	L'k	L'v
Зима	День	0,00841	0,083
	Ніч	0,00875	0,032
Весна	День	0,00723	0,041
	Ніч	0,00776	0,014
Літо	День	0,0066	0,022
	Ніч	0,0067	0,021
Осінь	День	0,0092	0,042
	Ніч	0,008	0,0096

Таблиця 2.3- Поглинання киснем і водяною парою при 13ГГц

Пора року	Час доби	L'k	L'v
Зима	день	0,009	0,012

	Ніч	0,00944	0,0045
Весна	день	0,0078	0,022
	Ніч	0,00837	0,037
Літо	день	0,00719	0,042
	Ніч	0,00732	0,041
Осінь	день	0,00823	0,022
	Ніч	0,0088	0.019

Через залежність висоти поглинаючого шару кисню і товщини шару водяного пару проведено розрахунки по затуханню сигналу за формулою:

$$L_c = \frac{h_k \cdot L_k + h_v \cdot L_v}{\sin \gamma}, \quad (2.4)$$

де: L_k -поглинання киснем,

L_v - поглинання водяною парою,

γ ,- кут місця,

h_k ,- товщина водяної пари,

h_v - висота кисневого шару.

Для розрахунку затухання кисневого шару за стандарт висоти кисневого шару береться 6 км. Тоді як формула товщини водяної пари буде мати наступний вигляд:

$$h_k = \left[2.2 + \frac{3}{(11-22.3)^2} + \frac{1}{(11-183.3)^2} + \frac{3}{(11-328.8)^2} \right]. \quad (2.5)$$

Розрахунок товщини водяної при частоті 11ГГц розраховується наступним чином:

$$h_k = \left[2.2 + \frac{3}{(11-22.3)^2} + \frac{1}{(11-183.3)^2} + \frac{3}{(11-328.8)^2} \right] = 2.231 \text{ км}.$$

Розрахунок товщини водяної пари при частоті 13ГГц:

$$h_k = \left[2.2 + \frac{3}{(13-22.3)^2} + \frac{1}{(13-183.3)^2} + \frac{3}{(13-328.8)^2} \right] = 2.246 \text{ км}$$

Приклад розрахунку в день у спокійній атмосфері при частоті 11ГГц:

$$\frac{6 \cdot 0,00841 \cdot 2,231}{18,5} = 0.743 \text{ дБ.}$$

Решта результатів які взяті із таблиці 2.2 і 2.3 і розраховані за формулою 2.5 записані в таблиці 2.4

Таблиця 2.4 - Поглинання сигналу в спокійній атмосфері у с.Суслівка, дБ

Пора року	Час доби	11ГГц	13ГГц
Зима	день	0.743	0.255
	Ніч	0.39	0.21
Весна	день	0.425	0.303
	Ніч	0.245	0.42
Літо	день	0.279	0.433
	Ніч	0.274	0.429
Осінь	день	0.469	0.311
	Ніч	0.826	0.301

Затухання в опадах вираховується за формулою:

$$L_d = a \cdot I^b \cdot l, \quad (2.6)$$

$$a = 4.21 \cdot 10^{-5} f a^{2.49}, \quad (2.7)$$

$$b = 1.41 \cdot f^{-0.272}, \quad (2.8)$$

При $I < 10$ мм/год,

$$h_d = \left\{ \begin{array}{c} h_i \\ \square \\ h_i + \log\left(\frac{I}{10}\right) \end{array} \right\}, \quad (2.9)$$

При $I > 10$ мм/год

$$h_i = 7.5 - 0.1 \cdot |\varphi_c| \quad (2.10)$$

$$l = \frac{h_d - h_{zc}}{\sin \gamma} \quad (2.11)$$

де a , - коефіцієнти; l - довжина шляху сигналу, км; I - інтенсивність опадів, мм/год; L_d -затухання сигналу в опадах, дБ; h_d -ефективний коефіцієнт дощового шару, h_{zc} - висота ЗС над рівнем моря, м; γ - кут місця антени ЗС ,град; h_i - висота нульової ізотерми, φ_c -широта точки розміщення ЗС на земній поверхні,град; f - частота,ГГц

Таблиця 2.5- Залежність інтенсивності опадів від пори року у с.Суслівка

Пора року	Інтенсивність опадів, мм/год
Зима	10
Весна	8
Літо	16
Осінь	14

Затухання сигналу зимою розрахунок при частоті 11 ГГц:

$$a = 4,21 \cdot 10^{-5} \cdot 11^{2,49} = 0.016.$$

$$b = 1,41 \cdot 11^{-0,272} = 0.734.$$

$$h_i = 7.5 - 0.1 \cdot |51.93| = 2.3$$

$$l = \frac{2.3 - 0.112}{18.5} = 6.896, \text{ км}$$

$$L_d = 0.016 \cdot 10^{0.734} \cdot 6.898 = 0.617 \text{ дБ}$$

Повністю сформована таблиця 2.6 розрахунками на основі результатів з таблиці 2.5

Таблиця 2.6 - Поглинання сигналу в опадах при частотах 11 і 13ГГц у с. Суслівка, дБ

Пора року	11 ГГц	13 ГГц
Зима, дБ	0.617	0.868
Весна, дБ	0.524	0.742
Літо, дБ	0.953	1.319
Осінь, дБ	0.843	1.172

Ослаблення сигналу в с. Дібровськ, Зарічненський район, Рівненська область

Таблиця 2.7 – Погодні дані с. Дібровськ, Зарічненський район, Рівненська область

Погодні дані	зима		Весна		Літо		осінь	
	день	ніч	День	ніч	день	Ніч	день	ніч

Т, температура, К	276	245	285	283	297	295	288	284
Р, тиск, кПа	99	99	99	99	99	99	100	100
Вологість повітря, г/м ³	1,83	0,87	5,5	5	9,94	8,73	5,47	4,73

Таблиця 2.8 – Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 11 ГГц у с. Дібровськ

Пора року	Час доби	L'к	L'в
Зима	день	0,00832	0,007
	ніч	0,012	0,006
Весна	день	0,00762	0,014
	ніч	0,00777	0,017
Літо	день	0,0068	0,028
	ніч	0,00693	0,025
Осінь	день	0,0075	0,018
	ніч	0,0078	0,016

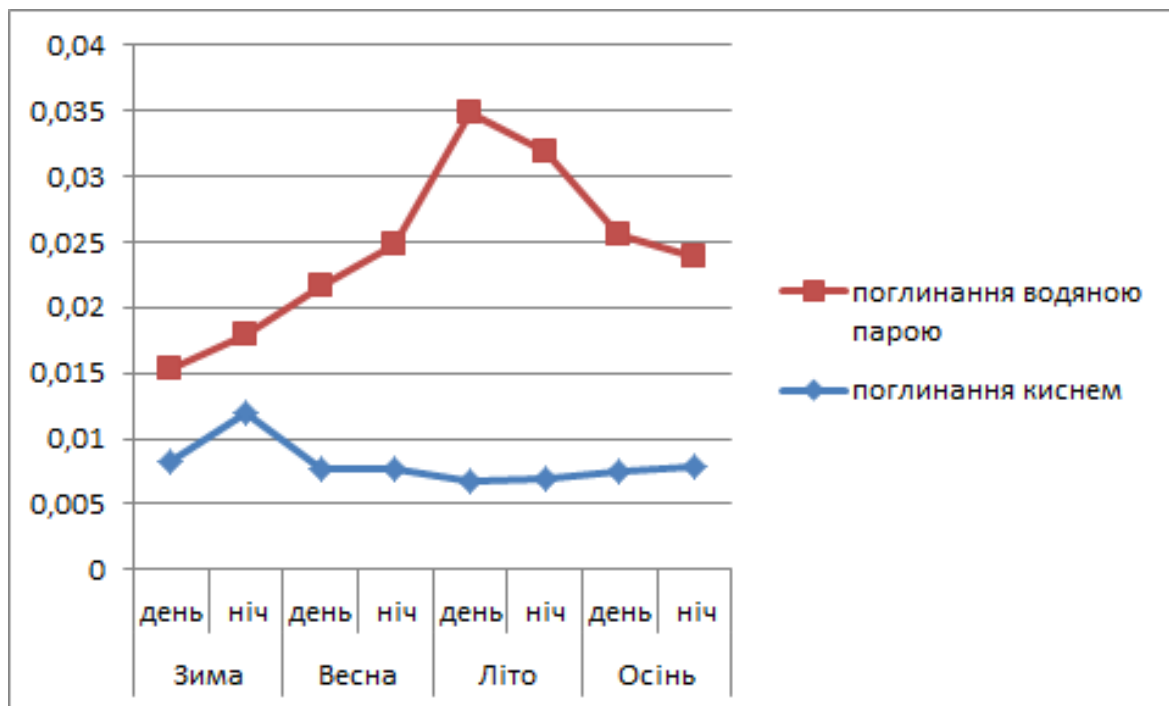


Рисунок 2.1 – Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 11 ГГц у с. Дібровськ

Таблиця 2.9 – Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 13ГГц с.Дібровськ

Пора року	Час доби	L'к	L'в
Зима	день	0,00898	0,12
	Ніч	0,00822	0,0055
Весна	день	0,0083	0,037
	Ніч	0,0083	0,034
Літо	день	0,0074	0,053
	Ніч	0,00693	0,048
Осінь	день	0,0081	0,034
	Ніч	0,0084	0,031

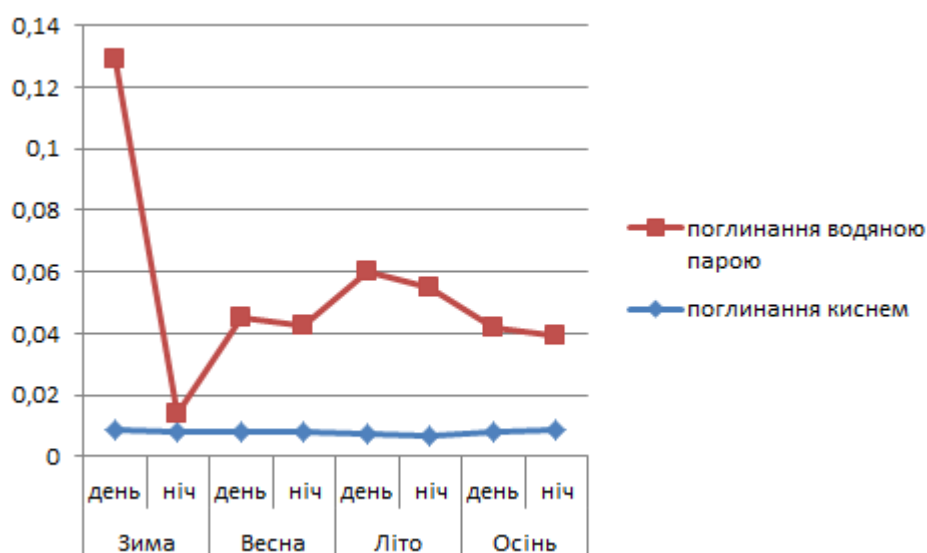


Рис 2.2 - Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 13ГГц с.Дібровськ

Таблиця 2.10 – Поглинання сигналу при спокійній атмосфері у с.Дібровськ, дБ

Пора року	Час доби	11ГГц	13ГГц
Зима	день	0.242	0.299
	Ніч	0.316	0.228
Весна	день	0.284	0.491
	Ніч	0.312	0.466
Літо	день	0.382	0.604
	Ніч	0.36	0.552
Осінь	день	0.315	0.462
	Ніч	0.305	0.444

Таблиця 2.11 – Залежність інтенсивності опадів від пори року с. Дібровськ

Пора року	Інтенсивність опадів мм/год
Зима	7
Весна	9
Літо	19
Осінь	14

Таблиця 2.12– поглинання сигналу при опадах на частотах 11 і 13 ГГц с Дібровськ,дБ

Пора року	11 ГГц	13 ГГц
Зима, дБ	0.548	0.779
Весна, дБ	0.659	0.929
Літо, дБ	1.288	1.773
Осінь, дБ	0.973	1.353

2.2.3 Дані про послаблення сигналу в атмосфері м. Київ знаходиться в таблиці 2.13

Таблиця 2.13– погодні данні м.Київ

Погодні дані	Зима		Весна		Літо		осінь	
	день	ніч	День	ніч	день	Ніч	день	ніч
Т, температура, К	275	274	285	282	298	294	287	283
Р, тиск, кПа	99	98	99	99	99	99	98	99
Вологість повітря, г/м ³	1,65	0,64	4,2	3.7	8,56	7,5	4,27	3,5

Таблиця 2.14 – Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 11ГГц, м.Київ

Пора року	Час доби	L'k	L'в
Зима	День	0,00841	0,006
	Ніч	0,0832	0,002
Весна	День	0,00762	0.019
	Ніч	0,00731	0,012
Літо	День	0,0067	0,023
	Ніч	0,00684	0,021
Осінь	День	0,0073	0,014
	Ніч	0,0077	0,012

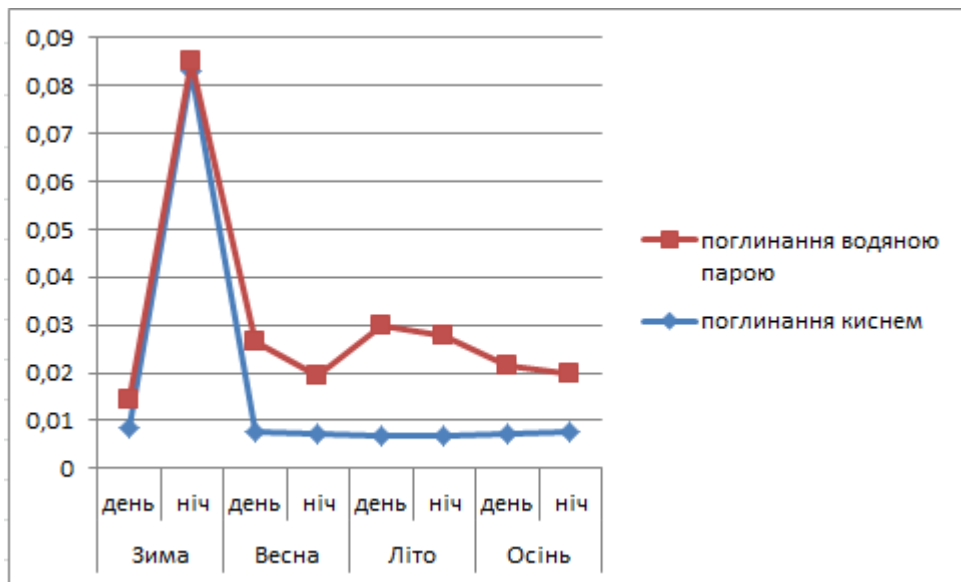


Рисунок 2.3 – Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 11 ГГц, м. Київ

Таблиця 2.15 – поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 13 ГГц, м. Київ.

Пора року	Час доби	L'k	L'v
Зима	День	0,0090	0,013
	Ніч	0,0832	0,002
Весна	День	0,00762	0.019
	Ніч	0,00731	0,012
Літо	День	0,0067	0,023
	Ніч	0,00684	0,021
Осінь	День	0,0079	0.026
	Ніч	0,0083	0,023

Таблиця 2.16 – Поглинання сигналу при спокійній атмосфері м.Київ, дБ

Пора року	Час доби	11ГГц	13ГГц
Зима ,дБ	День	0.198	0.258
	Ніч	0.169	0.169
Весна, дБ	День	0.273	0.274
	Ніч	0.219	0.22
Літо, дБ	День	0.284	0.285
	Ніч	0.273	0.274
Осінь, дБ	День	0.233	0.328
	Ніч	0.226	0.315

Таблиця 2.17 – Залежність інтенсивності опадів від пори року м. Київ

Пора року	Інтенсивність опадів мм/год
Зима	10
Весна	13
Літо	20
Осінь	17

Таблиця 2.18 – Поглинання сигналу при опадах на частотах 11 і 13 ГГц, м Київ, дБ

Пора року	11 ГГц	13 ГГц
Зима	0.506	0.711
Весна	0.613	0.855
Літо	0.894	1.228
Осінь	0.953	1.317

Поглинання сигналу в атмосфері м. Волочиськ, Хмельницька область

Таблиця 2.19-Погодні дані м.Волочиськ

Погодні дані	Зима		Весна		літо		Осінь	
	день	ніч	день	ніч	день	ніч	день	ніч
Т, температура, К	275	273	285	283	296	292	287	282
Р, тиск, кПа	98	97	97	96	97	97	98	98
Вологість повітря, г/м ³	1,42	0,37	3.9	3.5	8,4	7,3	4,1	3,3

Таблиця 2.20– Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 11ГГц, м. Волочиськ

Пора року	Час доби	L'к	L'в
Зима	День	0,00823	0,005
	Ніч	0,0823	0,0014
Весна	День	0,00732	0.013
	Ніч	0,00785	0,013
Літо	День	0,00659	0,023
	Ніч	0,00684	0,021
Осінь	День	0,00733	0,013
	Ніч	0,00769	0,012

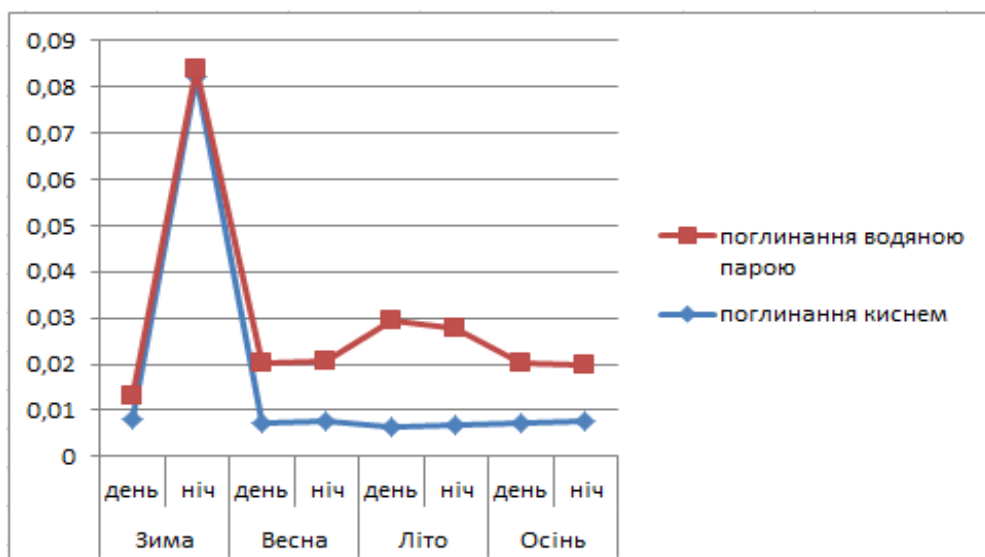


Рисунок 2.4-Поглинання киснем і водяною парою при 11ГГц, м.Волочиськ

Таблиця 2.21– поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 13ГГц, м. Волочиськ

Пора року	Час доби	L'k	L'v
Зима	День	0,00889	0.011
	Ночь	0,00888	0,0028
Весна	День	0,00789	0.025
	Ночь	0,00788	0,023
Літо	День	0,00711	0.045
	Ночь	0,00738	0.042
сінь	День	0,0079	0.025
	Ночь	0,00829	0.022

Таблиця 2.22 – Поглинання сигналу в спокійній атмосфері м.Волочиськ ,дБ

Пора року	Час доби	11ГГц	13ГГц
Зима	День	0.207	0.267
	Ніч	0.18	0.204
Весна	День	0.16	0.354
	Ніч	0.171	0.338
Літо	День	0.153	0.492
	Ніч	0.156	0.474
Осінь	День	0.16	0.354
	Ніч	0.167	0.339

Таблиця 2.23 – Залежність інтенсивності опадів від пори року,
м. Волочиськ

Пора року	Інтенсивність опадів мм/год
Зима	09
Весна	11
Літо	18
Осінь	15

Таблиця 2.24 – Поглинання сигналу в опадах при частотах 11 і 13ГГц
м. Волочиськ, дБ

Пора року	11 ГГц	13 ГГц
Зима	0.516	0.728
Весна	0.611	0.857
Літо	0.979	1.35
Осінь	0.823	1.142

2.3 Підбір обладнання, передавачів і приймачів наземних супутникових станцій VSAT

2.3.1 Вибір обладнання, передавача и приймача ЗС₁ (с. Суслівка-VSAT)

Таблиця 2.25 – Характеристики штучного супутника Землі ABS2

Назва	Характеристики
Позиція на ГО, сх.д.	750
Розрахунковий період існування, років	15
Діапазон, ГГц	13/11
Коефіцієнт шуму приймача антени	8
Число стволів KU-band	51
Коефіцієнт підсилення на передачу, дБ	35
Коефіцієнт підсилення на передачу, дБ	30
ККД хвильового тракту η	0,7
Еквівалентна шумова температура приймача, обумовлена его внутрішніми шумами	25

Таблиця 2.26- Характеристики наземної станції с.Суслівка

Назва	Характеристики
Широта (північ)	51,560
Довгота (схід)	30,510
Висота над рівнем моря, м	112
Розмір антени (діаметр)	1,8 м
Тип антени	параболічна
Коефіцієнт підсилення на передачу, дБ	37
Коефіцієнт підсилення на передачу, дБ	40
Система стеження	Відсутня
Кут місця	18,50
поляризація на передачу	Вертикальна
поляризація на прийом	Горизонтальна
Еквівалентна шумова температура приймача, обумовлена його внутрішніми шумами к	55

Розрахункова похила дальність між ЗС і ШСЗ за формулою :

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot \cos \xi \cdot \cos \beta}, \quad (2.12)$$

де d - дальність місця між ЗС1 і ШСЗ,

ξ - широта ЗС;

β - різниця по довготі між ЗС і ШСЗ.

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot \cos 51.56 \cdot \cos 47.45} = 44240 \text{ км}$$

Розрахунок сумарної шумової температури ШСЗ і ЗС визначаються за формулою:

$$T_{\Sigma \text{ ШСЗ}} = T_{\text{А.ШСЗ}} + T_0 \cdot \left(\frac{1 - \eta_{\text{ШСЗ}}}{\eta_{\text{ШСЗ}}} \right) + \frac{T_{\text{пр.ШСЗ}}}{\eta_{\text{ШСЗ}}},$$

$$T_{\Sigma \text{ ЗС}} = T_{\text{А.ЗС}} + T_0 \cdot \left(\frac{1 - \eta_{\text{ЗС}}}{\eta_{\text{ЗС}}} \right) + \frac{T_{\text{пр.ЗС}}}{\eta_{\text{ЗС}}},$$

(2.7)

(2.8)

де А. ШСЗ - шумова температура антени ШСЗ,

$T_{A.ЗС}$ -шумова температура антени ЗС, $T_0=290$ К, $\eta_{ШЗС}$ -ККД АТФ ШЗС, $\eta_{ЗС}$ -ККД АТФ ЗС, $T_{пр.ШЗС}$ -шумова температура передавача ШЗС, $T_{пр.ЗС}$ -шумова температура передавача ЗС.

Розрахункова формула для шумової температури має наступний вигляд

$$T_{пр.ШЗС} = T_0 \cdot (K_{ш.ШЗС} - 1) \quad (2.8)$$

$$T_{пр.ЗС} = T_0 \cdot (K_{ш.ЗС} - 1) \quad (2.9)$$

де $T_0 = 290$ К,

$T_{пр.ШЗС}$ -коefficient шуму приймача ШЗС,

$T_{пр.ЗС}$ - coefficient шуму приймача ЗС.

$$T_{пр.ШЗС} = 290 \cdot (8-1) = 2030 \text{ К}.$$

$$T_{пр.ЗС} = 290 \cdot (5.5-1) = 1305 \text{ К}.$$

$$T_{\Sigma ШЗ} = 55 + 290 \cdot \left(\frac{1 - 0.95}{0.95} \right) + \frac{1305}{0.95} = 2464 \text{ К}$$

Коефіцієнт підсилення земною станцією визначається формулою:

$$G_{ЗС} = \frac{10 \cdot g \cdot D_A^2}{\lambda_{\uparrow}^2}, \quad (2.10)$$

$$G_{ЗС} = \frac{10 \cdot g \cdot D_A^2}{\lambda_{\downarrow}^2}, \quad (2.11)$$

$$\lambda_{\uparrow} = \frac{c}{f_{\uparrow}} \quad (2.12)$$

$$\lambda_{\downarrow} = \frac{c}{f_{\downarrow}} \quad (2.13)$$

де g - coefficient використання поверхні антени, D_A - діаметр антени ЗС,

D_A - діаметр антени ЗС,

λ_{\uparrow} - довжина хвилі в для ділянки «вгору»,

λ_{\downarrow} - довжина хвилі в для ділянки «вниз»,

c - швидкість світла,

f_{\uparrow} - частота сигналу «вгору»,

f_{\downarrow} - частота сигналу «вниз».

$$\lambda_{\uparrow} = \frac{3 \cdot 10^8}{13 \cdot 10^9} = 0,023 \text{ м.}$$

$$\lambda_{\downarrow} = \frac{3 \cdot 10^8}{13 \cdot 10^9} = 0,027 \text{ м.}$$

$$G_{3С} = \frac{10 \cdot 0.6 \cdot 1.8^2}{13^2} = 36500 \text{ (рази).}$$

$$G_{3С} = \frac{10 \cdot 0.6 \cdot 1.8^2}{11^2} = 26140 \text{ (рази).}$$

Висновки до 2 розділу

1. Розглянуто аналіз існуючих систем супутникового зв'язку, класифікація, основні показники, особливості технології VSAT (*Very Small Aperture Terminal*), принципи роботи, топології мережі.

2. Розраховані ослаблення сигналу в іоносфері, в спокійній атмосфері і опадах на території України в чотирьох населених пунктах (с.Суслівка; с.Дібровськ; м.Київ; м.Волочиськ) в залежно від пори року і часу доби, для виявлення найгіршого ослаблення сигналу з урахуванням отриманих даних. Ослаблення сигналу протягом року на ділянках ЗС - ШСЗ і ШСЗ – ЗС найбільше у с.Дібровськ (випадання опадів 19 мм/год, загасання сигналу 1.8дБ) а найменше у с.Суслівка (випадання опадів 16 мм/год загасання сигналу 1.3дБ).

3. Затухання для двох робочих частот 11ГГц і 13ГГц в іоносфері складає: $1.65 \cdot 10^{-5}$ дБ та $1.18 \cdot 10^{-5}$ дБ відповідно.

4. Ослаблення сигналу в спокійній атмосфері найбільше у с. Дібровськ (поглинання сигналу складає 0.6 дБ) і найменше у м.Київ (поглинання складає 0.3).

3 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СУПУТНИКОВОЇ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ НАЗЕМНА СТАНЦІЯ–КОСМІЧНА СТАНЦІЯ–НАЗЕМНА СТАНЦІЯ

3.1 Характеристики приймачів та передавачів для супутникової лінії зв'язку

В таблицях 3.1-3.3 надано характеристики наземної станції, що організовують дану супутникову лінію зв'язку наземних станцій. Зв'язок налаштований на супутник ABS2 , що знаходиться на 75 градусах східної довготи.

Таблиця 3.1 – Параметри наземної станції для с. Суслівка, Репкинський район, Чернігівська область

Координати	51°56'' пн.ш. 30°51'' сх.д.
Діапазон f, ГГц	13/11
Діаметр антени DA, м	1,8
Ефективна смуга частот fш, МГц	36
Спектральна густина потужності S, дБВт/Гц	-34
Співвідношення сигнал/шум Pс/Pш, дБ	12,88
ККДАФТ	0,9

Т а б л и ц я 3.2 – Параметри наземної станції для с. Дібровськ, Вараський район ,Рівненської області

Координати	51°41'' пн.ш.. 26°08'' сх.д.
Діапазон f, ГГц	13/11
Діаметр антени DA, м	1,85
Ефективна смуга частот fш, МГц	36
Спектральна густина потужності S, дБВт/Гц	-34

Співвідношення сигнал/шум $P_c/P_{ш}$, дБ	12,88
ККДАФТ	0,9

Таблиця 3.3 – Параметри наземної станції для м.Волочиськ, Хмельницька область

Координати	49°32" пн.ш. 26°12" сх.д.
Діапазон f , ГГц	13/11
Діаметр антени D_A , м	1,83
Ефективна смуга частот $f_{ш}$, МГц	36
Спектральна густина потужності S , дБВт/Гц	-34
Співвідношення сигнал/шум $P_c/P_{ш}$, дБ	12,88
ККДАФТ	0,9

Таблиця 3.4 – Параметри наземної станції для м.Київ

Координати	50°27" пн.ш. 30°31" сх.д.
Діапазон f , ГГц	13/11
Діаметр антени D_A , м	3.8
Ефективна смуга частот $f_{ш}$, МГц	54
Спектральна густина потужності S , дБВт/Гц	8
Співвідношення сигнал/шум $P_c/P_{ш}$, дБ	80
ККДАФТ	0,9

Таблиця 3.5 – Параметри бортового ретранслятора космічної станції

Діапазон частот		Ku
Координати		75°сх.д., 0° пн.ш(пдн.ш)
Діапазон f , ГГц		13/11
Коефіцієнт підсилення антени G , дБ	Прийом	39
	Передача	30
Спектральна густина потужності S , дБВт/Гц		-51
Коефіцієнт шуму приймача, КШ		2
Шумова температура антени T_A , К		60
ККДАФТ		0,85
Шумова температура супутникової лінії ТΣЛ, К		100

3.2 Енергетичний розрахунок ділянки "вгору" супутникової лінії наземна-станція-космічна станція

3.2.1 Енергетичний розрахунок ділянки "вгору" супутникової лінії наземна-станція-космічна станція для с.Суслівка

Кут місця $\varphi = 18,5^\circ$ Координати супутника 75° сх.д.

Земна станція $51^\circ 56'$ пн.ш. $30^\circ 51'$ сх.д.

Знаходимо різницю по довготі для наземної станції і супутника.

$$\Delta\lambda = 75^\circ - 30,5^\circ = 44,5^\circ$$

3.2.2 Розрахунок відстані від наземної стації до космічної станції

$$d = 42644\sqrt{1 - 0.2954 \cdot \cos\Psi}. \quad (3.1)$$

β – різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 30,5 = 44,5^\circ$

ξ - широта земної станції $\xi_{ЗС} = 51^\circ, 56$

$$\cos\Psi = \cos\xi \cdot \cos\beta = \cos(51^\circ, 56) \cdot \cos(44^\circ, 5) = 0,4434.$$

$$d = 42644\sqrt{1 - 0.2954 \cdot 0,4434} = 39757 \text{ км.}$$

3.2.3 Розрахунок ослаблення сигналу на лінії ЗС-КС

Загасання енергії у вільному просторі, що визначається зменшенням щільності потоку потужності при віддаленні від випромінювача визначається за формулою:

$$L_\Sigma = L_0 + L_{\text{дод}}, \quad (3.2)$$

де L_0 –затухання сигналу на лінії наземна станція- штучний супутник

землі через сферичне розсіювання хвиль; $L_{\partial o \partial}$ – додаткові витрати.

Окрім основних втрат, на шляху сигналу є додаткові втрати $L_{\text{дод}}$, які визначаємо формулою:

$$L_{\text{дод}} = L_a + L_g + L_n + L_{\pi}, \quad (3.3)$$

де L_a – поглинання в спокійній атмосфері.

Для $f = 13 \text{ ГГц}$ і $\varphi = 18,5^\circ$

$$L_a = 0,35 \text{ дБ.}$$

L_{π} – втрати через неузгодженість поляризації антени.

l_1 і l_2 - коефіцієнти еліптичності (відношення малої напіввісі еліпса до великої).

$$l_1 = \frac{5}{5} = 1, l_2 = \frac{5}{5} = 1.$$

$$L_{\pi} = 0,38 \text{ дБ.}$$

L_n – втрати через наведення антени.

$$L_n = 1 + (2 \cdot \theta / \theta_{0,5}), \quad (3.4)$$

де $\theta_{0,5}$ - ширина діаграми направленості за рівнем половинної потужності; θ – вимірний кут відносно максимального випромінювання.

$$\theta_{0,5} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot g / G_0} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot 0,6 / 1102} = 1,63.$$

$g = 0,6 \div 0,8$ - коефіцієнт використання поверхні антени $\theta = 0,10$.

$$L_n = 1 + (2 \cdot \frac{\theta}{\theta_{0,5}}) = 1,015, \text{ дБ.}$$

L_g – втрати в гідрометеорах.

Інтенсивність дощу на ділянці ЗС - КА складає $\varepsilon = 12 \text{ мм/год.}$

$$L_g = L'g \cdot l_e, \quad (3.5)$$

де l_e - еквівалентна довжина шляху.

При куті місця $\beta = 18,5^\circ$ та інтенсивності опадів для с.Суслівки

$\varepsilon = 12$ мм/год; $l_e = 6$ км, L'_g , для $f = 13$ ГГц $L'_g = 0,2$ дБ.

$$L_g = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ дБ} .$$

$$L_{\text{дод}} = 0,35 + 1,2 + 1,015 + 0,38 = 2,94 \text{ дБ (1.97 раз)}.$$

Значення L_0 для ділянок наземна станція – космічна станція розраховуються за формулою:

$$L_0 = 20(\lg f + \lg d) + 32,45, \quad (3.6)$$

де d – похила дальність, км; f - частота на ділянці «вгору», МГц

$$L_0 = 20(\lg 13000 + \lg 39757) + 32,45 = 206,7 \text{ дБ} .$$

Затухання сигналу на ділянці ЗС-КС складає:

$$L_{\Sigma} = 206,7 + 2,94 = 209,74, \text{ дБ}.$$

Розрахунок коефіцієнта підсилення антени ЗС:

$$G_{\text{ЗС}} = \frac{10 \cdot g \cdot D_A^2}{\lambda^2}, \quad (3.7)$$

де $g = 0,6 \dots 0,8$ – коефіцієнт використання поверхні антени; $D_A = 1,8$ м - діаметр антени ЗС; λ – довжина хвилі, м

$$\lambda = \frac{c}{f_{\uparrow}}. \quad (3.8)$$

$$\lambda_{\uparrow} = \frac{3 \cdot 10^8}{13 \cdot 10^9} = 0,023 \text{ м}.$$

$$G_{\text{ЗС}} = \frac{10 \cdot 0,6 \cdot 1,8^2}{\lambda_{\uparrow}^2} = 36500 \text{ (раз)}.$$

Отримане значення тепер переведемо в дБ:

$$G_{\text{ЗС}} = 10 \lg(0,367 \cdot 10^5) = 47,69, \text{ дБ}.$$

3.2.4 Розрахунок сумарної шумової температури приймального тракту космічної станції

Еквівалентна шумова температура приймача, що складається з антени, хвилеводного тракту та приймача:

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0 \cdot \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) + \frac{T_{\text{пр}}}{\eta}, \quad (3.9)$$

де T_A - шумова температура антени ШСЗ - 60К; $T_0 = 290$; $\eta = 0,9$ (ККД АФТКС).

$$T_{\text{пр}} = T_0 \cdot (K_{\text{ш}} - 1), \quad (3.10)$$

де $K_{\text{ш}} = 2$ - коефіцієнт шуму приймача КС.

$$T_{\text{пр}} = 290 \cdot (2-1) = 290 \text{ К.}$$
$$T_{\Sigma} = \frac{1-0,9}{0,9} + \frac{290}{0,9} = 414,4 \text{ К.}$$

3.2.5 Розрахунок сумарної потужності шумів на вході приймача ЗС

При розрахунку енергетики супутникових радіоліній важливо визначити повну потужність шумів, створюваних на вході приймального пристрою супутника і наземної станції.

Оскільки в діапазонах частот, де працюють супутникові системи, шуми мають адитивний характер то сумарна потужність визначається наступною формулою:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f,$$

де Δf – ефективна смуга частот ЗС (36 МГц), $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К · Гц – стала Больцмана, T_{Σ} - сумарна шумова температура, К.

$$P_{\text{ш}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 414,4 \cdot 36 \cdot 10^6 = 2,35 \cdot 10^{-13} \text{ ,Вт.} \quad (3.11)$$

Для врахування завад від інших систем зв'язку збільшимо $P_{\text{ш}}$ на 20% $2,68 \cdot 10^{-13}$ Вт (-126,3 дБ).

3.2.6 Визначення потужності сигналу на вході приймача космічної станції

При розрахунку лінії часто виявляються задані не потужністю сигналу на вході приймача, а відношенням сигнал/шум на вході приймача ($P_c/P_{\text{ш}}$). Для супутникових систем зв'язку зазвичай це співвідношення береться в межах від 10 до 12 дБ:

$$\text{Прийmemo} \quad \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = 12.88.$$

В такому випадку потужність сигналу буде:

$$P_c = P_{\text{ш}} + 12.88 \text{ дБ} = -126.3 + 12.88 = -113,3 \text{ дБ}.$$

3.2.7 Визначення потужності передавача ЗС

Визначити необхідну потужність передавача за заданим значенням потужності сигналу на вході приймача можна за такою формулою:

$$P_{\text{ПРД(ЗС)}} = \frac{L_{\text{от}} \cdot L_{\text{дод}} \cdot k \cdot T_{\text{ш}} \cdot \Delta f_{\text{шЗС}} \cdot a \cdot \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}}}, \quad (3.12)$$

де $a = 6$ дБ (3,98 раз) - коефіцієнт запасу для лінії «вгору»;

$\Delta f_{\text{ш}} = 36$ МГц. - ефективная смуга частот ЗС;

$L_{\text{дод}} = 6,61$ дБ (4,58 раз);

$G_{\text{ПРМ}} = 39$ дБ ($1039/10 = 7,943 \cdot 10^3$ раз);

$G_{\text{ПРД}} = 47,69$ дБ ($0,367 \cdot 10^5$ раз);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К · Гц - стала Больцмана;

$$\frac{P_c}{P_{ш}} = 12.88 (11.1 \text{ раз});$$

$$P_{\text{ПРД(ЗС)}} = \frac{4,667 \cdot 10^{20} \cdot 1,97 \cdot 10^{-23} \cdot 414,4 \cdot 36 \cdot 10^6 \cdot 3,98 \cdot 12,88}{0,367 \cdot 10^5 \cdot 7,943 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = \frac{0,907 \cdot 10^{10}}{2,361 \cdot 10^8} \\ = 41,1, \text{ Вт}$$

Переведемо отримане значення в дБВт:

$$P_{\text{ПРД}} = 10 \log(41,1) = 16,13 \text{ дБВт}$$

Енергетичний розрахунок ділянки "вгору" супутникової лінії земна-станція-космічна станція для с.Дібровськ

Кут місця $\varphi = 15,7^\circ$ Координати супутника 75° сх.д.

Земна станція $51^\circ 41'$ пн.ш. $26^\circ 08'$ сх.д.

Знаходимо різницю по довготі для земної станції і супутника.

$$\Delta\lambda = 75^\circ - 26,08 = 48,9^\circ.$$

Розрахунок відстані наземної стації до космічної стації

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot \cos \Psi}.$$

ξ - широта передавальної стації $\xi_{\text{ЗС}} = 51^\circ 41'$.

β - різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 26,08^\circ = 48,9^\circ$.

Розрахунок відстані від наземної стації с.Дібровськ до космічної стації

ξ - широта передавальної стації $\xi_{\text{ЗС}} = 51,41^\circ$ пн.ш.

β - різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 26,8^\circ = 48,9^\circ$.

$$\cos \Psi = \cos \xi \cdot \cos \beta = \cos(51,41^\circ) \cdot \cos(48,9^\circ) = 0,4098.$$

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot 0,4098} = 39979 \text{ км}$$

Розрахунок ослаблення сигналу на лінії ЗС-КС.

Загасання енергії у вільному просторі, що визначається зменшенням щільності потоку потужності при віддаленні від випромінювача визначається за формулою:

$$L_{\Sigma} = L_0 + L_{\text{дод}} ,$$

де L_0 – затухання сигналу на лінії наземна станція- штучний супутник Землі через сферичне розсіювання хвиль;

$L_{\text{дод}}$ – додаткові витрати.

Окрім основних втрат, на шляху сигналу є додаткові втрати $L_{\text{дод}}$, як визначаємо формулою:

$$L_{\text{дод}} = L_a + L_g + L_n + L_p ,$$

де L_a – поглинання в спокійній атмосфері.

Для $f = 13 \text{ ГГц}$ і $\varphi = 15,7^\circ$.

$$L_a = 0,44 \text{ дБ.}$$

L_p – втрати через неузгодженість поляризації антени.

l_1 і l_2 - коефіцієнти еліптичності (відношення малої напіввісі еліпса до великої).

$$l_1 = \frac{5}{5} = 1, l_2 = \frac{5}{5} = 1.$$

$$L_p = 0,38 \text{ дБ.}$$

L_n – втрати через наведення антени.

$$L_n = 1 + \left(2 \cdot \frac{\theta}{\theta_{0,5}}\right),$$

де $\theta_{0,5}$ – ширина діаграми направленості за рівнем половинної потужності;

θ – вимірний кут відносно максимального випромінювання.

$$\theta_{0,5} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot g / G_0} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot 0,6 / 1102} = 1,63.$$

$g = 0,6 \div 0,8$ - коефіцієнт використання поверхні антени.

$\theta = 0,10$.

$$L_n = 1 + \left(2 \cdot \frac{\theta}{\theta_{0,5}}\right) = 1,015, \text{дБ.}$$

L_g – втрати в гідрометеорах.

Інтенсивність дощу на ділянці ЗС - КА складає $\varepsilon = 12$ мм/год.

$$L_g = L'_g \cdot l_e,$$

де l_e - еквівалентна довжина шляху .

При куті місця $\beta = 18,5^0$ та інтенсивності опадів для с. Дібровськ $\varepsilon = 12$ мм/год; $l_e=6$ км, L'_g для $f=13$ ГГц $L'_g=0,2$ дБ.

$$L_g = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ дБ .}$$

$$L_{\text{дод}} = 0,44 + 1,2 + 1,015 + 0,38 = 3 \text{ дБ (2.24раз).}$$

Значення L_0 для ділянок наземна станція – космічна станція розраховуються за формулою:

$$L_0 = 20(\lg f + \lg d) + 32,45 ,$$

де d – похила дальність, км

f - частота на ділянці «вгору», МГц

$$L_0 = 20(\lg 13000 + \lg 39979) + 32,45 = 206,6 \text{ дБ .}$$

Затухання сигналу на ділянці ЗС-КС складає:

$$L_{\Sigma} = 206,6 + 3 = 209,6, \text{дБ.}$$

Розрахунок коефіцієнта підсилення антени ЗС

$$G_{\text{ЗС}} = \frac{10 \cdot g \cdot D_A^2}{\lambda^2} ,$$

де $g = 0,6 \dots 0,8$ – коефіцієнт використання поверхні антени;

$D_A = 1,83$ м - діаметр антени ЗС;

λ – довжина хвилі , м

$g = 0,6$.

$$\lambda = \frac{c}{f_{\uparrow}} .$$

$$\lambda_{\uparrow} = \frac{3 \cdot 10^8}{13 \cdot 10^9} = 0,023 \text{ м.}$$

$$G_{3C} = \frac{10 \cdot 0,6 \cdot 1,85^2}{\lambda_{\uparrow}^2} = 38818 (\text{раз}).$$

Отримане значення тепер переведемо в дБ:

$$G_{3C} = 10 \lg(0,367 \cdot 10^5) = 45,89, \text{ дБ.}$$

Розрахунок сумарної шумової температури приймального тракту космічної станції

Еквівалентна шумова температура приймача, що складається з антени, хвилеводного тракту та приймача:

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0 \cdot \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) + \frac{T_{\text{пр}}}{\eta},$$

де T_A - шумова температура антени ШСЗ - 60К;

$$T_0 = 290\text{К};$$

$$\eta = 0,9 \text{ (ККД АФТ КС).}$$

$$T_{\text{пр}} = T_0 \cdot (K_{\text{ш}} - 1),$$

де $K_{\text{ш}} = 2$ - коефіцієнт шуму приймача КС.

$$T_{\text{пр}} = 290\text{К} \cdot (2-1) = 290 \text{ К.}$$

$$T_{\Sigma} = \frac{1-0,9}{0,9} + \frac{290}{0,9} = 414,4\text{К.}$$

Розрахунок сумарної потужності шумів на вході приймача наземної станції с. Дібровськ.

При розрахунку енергетики супутникових радіоліній важливо визначити повну потужність шумів, створюваних на вході приймального пристрою супутника і наземної станції.

Оскільки в діапазонах частот, де працюють супутникові системи, шуми мають адитивний характер то сумарна потужність визначається наступною формулою:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f,$$

де Δf – ефективна смуга частот ЗС (36 МГц),

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К · Гц – стала Больцмана,

T_{Σ} – сумарна шумова температура, К.

$$P_{\text{ш}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 414,4 \cdot 36 \cdot 10^6 = 2,35 \cdot 10^{-13} \text{ Вт.}$$

Для врахування завад від інших систем зв'язку збільшимо $P_{\text{ш}}$ на 20% $2,68 \cdot 10^{-13}$ Вт (-126,3 дБ)

Визначення потужності сигналу на вході приймача космічної станції

При розрахунку лінії часто виявляється заданою не потужність сигналу на вході приймача, а відношення сигнал-шум на вході приймача ($P_c/P_{\text{ш}}$). Для супутникових систем зв'язку зазвичай це співвідношення береться в межах від 10 до 12 дБ:

$$\text{Прийmemo } \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = 12,88.$$

В такому випадку потужність сигналу буде:

$$P_c = P_{\text{ш}} + 12,88 \text{ дБ} = -126,3 + 12,88 = -113,3 \text{ дБ.}$$

Визначення потужності передавача ЗС с.Дібровськ

Визначити необхідну потужність передавача за заданим значенням потужності сигналу на вході приймача можна за такою формулою:

$$P_{\text{ПРД}}(\text{ЗС}) = \frac{L_{0\uparrow} \cdot L_{\text{ДОД}} \cdot k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{шЗС}} \cdot a \cdot \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}}},$$

де $a = 6$ дБ (3,98 раз) – коефіцієнт запасу для лінії «вгору»;

$\Delta f_{\text{ш}} = 36$ МГц. – ефективна смуга частот ЗС;

$L_{\text{ДОД}} = 3$ дБ (2 раз);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К · Гц – стала Больцмана;

$G_{\text{ПРМ}} = 39$ дБ ($1039/10 = 7,943 \cdot 10^3$ раз);

$G_{\text{ПРД}} = 47,69$ дБ ($0,388 \cdot 10^5$ раз);

$$\frac{P_c}{P_{ш}} = 12.88 (11.1 \text{ раз});$$

$$P_{\text{ПРД}}(\text{ЗС}) = \frac{4,57 \cdot 10^{20} \cdot 2 \cdot 10^{-23} \cdot 414,4 \cdot 36 \cdot 10^6 \cdot 3,98 \cdot 12,88}{0,388 \cdot 10^5 \cdot 7,943 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = \frac{0,683 \cdot 10^{10}}{2,496 \cdot 10^8} 27,36 \text{ Вт.}$$

Переведемо отримане значення в дБВт:

$$P_{\text{ПРД}} = 10 \log(27,36) = 14,37 \text{ дБВт}$$

Енергетичний розрахунок ділянки "вгору" супутникової лінії наземна станція-космічна станція для м.Волочиськ

Кут місця $\varphi = 17^\circ$ Координати супутника 75° сх.д.

Земна станція $49^\circ 32' \text{ пн.ш. } 26^\circ 12' \text{ сх.д.}$

Знаходимо різницю по довготі для земної станції і супутника.

$$\Delta\lambda = 75^\circ - 26,12^\circ = 48,8^\circ.$$

Розрахунок відстані від наземної стації до космічної стації

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot \cos \Psi}.$$

β – різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 26,12^\circ = 48,8^\circ$.

Розрахунок відстані від наземної стації до космічної стації

ξ - широта передавальної стації $\xi_{\text{ЗС}} = 49^\circ 32' \text{ пн.ш}$

β - різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 26^\circ 8' = 48^\circ 9'$

$$\cos \Psi = \cos \xi \cdot \cos \beta = \cos(49^\circ 32') \cdot \cos(48^\circ 8') = 0,4286$$

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot 0,4286} = 39853 \text{ км}$$

Розрахунок ослаблення сигналу на лінії ЗС-КС

Загасання енергії у вільному просторі, що визначається зменшенням щільності потоку потужності при віддаленні від випромінювача визначається за формулою:

$$L_{\Sigma} = L_0 + L_{\text{дод}}.$$

де L_0 – затухання сигналу на лінії наземна станція- штучний супутник землі через сферичне розсіювання хвиль;

$L_{\partial 0 \partial}$ – додаткові витрати.

Окрім основних втрат, на шляху сигналу є додаткові втрати $L_{\text{дод}}$, як визначаємо формулою:

$$L_{\text{дод}} = L_a + L_g + L_n + L_p,$$

де L_a – поглинання в спокійній атмосфері.

$f = 13 \text{ ГГц}$ и $\varphi = 17^\circ$.

$$L_a = 0,26 \text{ дБ.}$$

L_p – втрати через неузгодженість поляризації антени.

l_1 и l_2 - коефіцієнти еліптичності (відношення малої напіввісі еліпса до великої).

$$l_1 = \frac{5}{5} = 1, l_2 = \frac{5}{5} = 1.$$

$$L_p = 0,38 \text{ дБ.}$$

L_n – втрати через наведення антени.

$$L_n = 1 + (2 \cdot \theta / \theta_{0,5}),$$

де $\theta_{0,5}$ - ширина діаграми направленності за рівнем половинної потужності;

θ – вимірний кут відносно максимального випромінювання.

$$\theta_{0,5} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot g / G_0} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot 0,6 / 1102} = 1,63.$$

$g = 0,6 \div 0,8$ - коефіцієнт використання поверхні антени.

$$\theta = 0,10.$$

$$L_n = 1 + (2 \cdot \frac{\theta}{\theta_{0,5}}) = 1,015, \text{ дБ.}$$

L_g – втрати в гідрометеорах.

Інтенсивність дощу на ділянці ЗС - КА складає $\epsilon = 13 \text{ мм/год.}$

$$L_g = L'g \cdot l_e,$$

де l_e - еквівалентна довжина шляху.

При куті місця $\beta = 17^\circ$ та інтенсивності опадів для $\epsilon = 13$ мм/год;
 $l_e=6$ км, L'_g , для $f = 13$ ГГц $L'_g=0,2$ дБ.

$$L_g = 0,3 \cdot 6 = 1,8 \text{ дБ.}$$

$$L_{\text{дод}} = 0,26 + 1,8 + 1,015 + 0,38 = 3,5 \text{ дБ (2.24раз).}$$

Значення L_0 для ділянок наземна станція – космічна станція розраховуються за формулою:

$$L_0 = 20(\lg 13000 + \lg 39853) + 32,45,$$

де d – похила дальність, км

f - частота на ділянці «вгору», МГц

$$L_0 = 20(\lg 13000 + \lg 39853) + 32,45 = 206,6 \text{ дБ}$$

Затухання сигналу на ділянці ЗС-КС складає:

$$L_{\Sigma} = 206,6 + 3,5 = 210,1, \text{ дБ}$$

Розрахунок коефіцієнта підсилення антени ЗС

$$G_{\text{ЗС}} = \frac{10 \cdot g \cdot D_A^2}{\lambda^2},$$

де $g = 0,6 \dots 0,8$ – коефіцієнт використання поверхні антени;

$D_A = 1,83$ м - діаметр антени ЗС;

λ – довжина хвилі, м

$$g = 0,6.$$

$$\lambda = \frac{c}{f_{\uparrow}}.$$

$$\lambda_{\uparrow} = \frac{3 \cdot 10^8}{13 \cdot 10^9} = 0,023, \text{ м}$$

$$G_{\text{ЗС}} = \frac{10 \cdot 0,6 \cdot 1,83^2}{\lambda_{\uparrow}^2} = 37983 \text{ (раз).}$$

Отримане значення тепер переведемо в дБ:

$$G_{\text{ЗС}} = 10 \lg(0,379 \cdot 10^5) = 45,79, \text{ дБ.}$$

Розрахунок сумарної потужності шумів на вході приймача

При розрахунку енергетики супутникових радіоліній важливо визначити повну потужність шумів, створюваних на вході приймального пристрою супутника і наземної станції.

Оскільки в діапазонах частот, де працюють супутникові системи, шуми мають адитивний характер то сумарна потужність визначається наступною формулою:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f,$$

де Δf – ефективна смуга частот ЗС (36 МГц),

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт/К} \cdot \text{Гц} - \text{стала Больцмана};$$

T_{Σ} - сумарна шумова температура, К.

$$P_{\text{ш}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 414,4 \cdot 36 \cdot 10^6 = 2,35 \cdot 10^{-13} \text{ ,Вт}$$

Для врахування завад від інших систем зв'язку збільшимо $P_{\text{ш}}$ на 20% $2,68 \cdot 10^{-13}$ (Вт) (-126,3 дБ).

Визначення потужності передавача ЗС

Визначити необхідну потужність передавача за заданим значенням потужності сигналу на вході приймача можна за такою формулою:

$$P_{\text{ПРД(ЗС)}} = \frac{L_{01} \cdot L_{\text{ДОД}} \cdot k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{шЗС}} \cdot a \cdot \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}\right)}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}}},$$

де $a = 6$ дБ (3,98 раз) - коефіцієнт запасу для лінії «вгору»;

$\Delta f_{\text{ш}} = 36$ МГц. - ефективна смуга частот ЗС;

$L_{\text{ДОД}} = 3.5$ дБ (2,24 раз);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К · Гц - стала Больцмана;

$G_{\text{ПРМ}} = 39$ дБ ($1039/10 = 7,943 \cdot 10^3$ раз);

$G_{\text{ПРД}} = 47,69$ дБ ($0,379 \cdot 10^5$ раз);

$\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} = 12.88$ (11.1 раз).

$$P_{\text{ПРД}}(\text{ЗС}) = \frac{4,57 \cdot 10^{20} \cdot 2,24 \cdot 10^{-23} \cdot 414,4 \cdot 36 \cdot 10^6 \cdot 3,98 \cdot 12,88}{0,379 \cdot 10^5 \cdot 7,943 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = \frac{1,667 \cdot 10^{10}}{2,567 \cdot 10^8}$$

$$= 30,49 \text{ Вт.}$$

Переведемо отримане значення в дБВт:

$$P_{\text{ПРД}} = 10 \log(30,49) = 14,84 \text{ дБВт}$$

3.3 Енергетичний розрахунок ділянки "вниз" супутникової лінії космічна станція-наземна станція для м.Київ

Кут місця $\varphi = 18,8^\circ$ Координати супутника 75° сх.д.

Земна станція $50^\circ 27' \text{ пн.ш. } 30^\circ 31' \text{ сх.д.}$

Знаходимо різницю по довготі для земної станції і супутника. $\Delta\lambda = 75^\circ - 30^\circ 31' = 44^\circ 69'$.

3.3.1 Розрахунок відстані від космічної до станції наземної станції

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot \cos \Psi} ,$$

β – різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 30^\circ 31' = 44^\circ 69'$

3.3.2 Розрахунок відстані від космічної станції до наземної станції

ξ - широта станції $\xi_{\text{ЗС}} = 50^\circ 27' \text{ пн.ш}$

β - різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 30^\circ 31' = 44^\circ 69'$

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot 0,4286} = 39683 \text{ км.}$$

3.3.3 Розрахунок ослаблення сигналу на лінії ЗС-КС

Загасання енергії у вільному просторі, що визначається зменшенням щільності потоку потужності при віддаленні від випромінювача визначається за формулою за формулою:

$$L_{\Sigma} = L_0 + L_{\text{дод}} ,$$

де L_0 = затухання сигналу на лінії наземна станція- штучний супутник
землі через сферичне розсіювання хвиль;

$L_{\partial\partial}$ – додаткові витрати.

які визначаємо формулою:

$$L_{\text{дод}} = L_a + L_g + L_n + L_p,$$

де L_a - поглинання в спокійній атмосфері

Для $f = 11 \text{ ГГц}$ и $\varphi = 18,8^\circ$.

$$L_a = 2,3 \text{ дБ.}$$

L_p - втрати через неузгодженість поляризації антени.

l_1 и l_2 - коефіцієнти еліптичності (відношення малої напіввісі еліпса до великої).

$$l_1 = \frac{5}{5} = 1, l_2 = \frac{5}{5} = 1.$$

$$L_p = 0,38 \text{ дБ.}$$

L_n - втрати через наведення антени.

$$L_n = 1 + (2 \cdot \theta / \theta_{0,5}).$$

де $\theta_{0,5}$ - ширина діаграми направленності за рівнем половинної потужності;

θ - вимірний кут відносно максимального випромінювання.

$$\theta_{0,5} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot g / G_6} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot 0,6 / 1102} = 1,63.$$

$g = 0,6 \div 0,8$ - коефіцієнт використання поверхні антени.

$$\theta = 0,10.$$

$$L_n = 1 + \left(2 \cdot \frac{\theta}{\theta_{0,5}} \right) = 1,015, \text{ дБ.}$$

L_g - втрати в гідрометеорах.

Інтенсивність дощу на ділянці ЗС - КА складає $\varepsilon = 16 \text{ мм/год.}$

$$L_g = L'_g \cdot l_e,$$

де l_e - еквівалентна довжина шляху.

При куті місця $\beta = 18,8^\circ$ та інтенсивності опадів для м.Київ

$\varepsilon = 16 \text{ мм/год; } l_s = 6 \text{ км, } L'_g$ для $f = 13 \text{ ГГц } L'_g = 0,29 \text{ дБ.}$

$$L_g = 0,29 \cdot 6 = 1,74 \text{ дБ.}$$

$L_{\text{дод}} = 2,3 + 1,74 + 1,015 + 0,38 = 5,4 \text{ дБ (3,47 раз).}$

Окрім основних втрат, на шляху сигналу є додаткові втрати $L_{\text{дод}}$,

$g = 0,6 \div 0,8$ - коефіцієнт використання поверхні антени.

$\theta = 0,10$.

$$L_n = 1 + \left(2 \cdot \frac{\theta}{\theta_{0.5}} \right) = 1,015, \text{дБ.}$$

L_g – втрати в гідрометеорах.

Інтенсивність дощу на ділянці ЗС - КА складає $\varepsilon = 16$ мм/год.

$$L_g = L'_g \cdot l_e,$$

де l_e - еквівалентна довжина шляху .

При куті місця $\beta = 18,8^\circ$ та інтенсивності опадів для м.Київ

$\varepsilon = 16$ мм/год; $l_s = 6$ км, L'_g для $f = 13$ ГГц $L'_g = 0,29$ дБ.

$$L_g = 0,29 \cdot 6 = 1,74 \text{ дБ .}$$

$L_{\text{дод}} = 2,3 + 1,74 + 1,015 + 0,38 = 5,4$ дБ (3,47раз).

Значення L_0 для ділянок станція – космічна станція розраховуються за формулою:

$$L_0 = 20(\lg f + \lg d) + 32,45,$$

де d – похила дальність, км

f - частота на ділянці «вниз», МГц

$$L_0 = 20(\lg 11000 + \lg 39853) + 32,45 = 205,25 \text{ дБ.}$$

Затухання сигналу на ділянці ЗС-КС складає:

$$L_\Sigma = 205,2 + 5,4 = 210,5, \text{дБ}$$

Розрахунок коефіцієнта підсилення антени ЗС

$$G_{\text{ЗС}} = \frac{10 \cdot g \cdot D_A^2}{\lambda^2},$$

де $g = 0,6 \dots 0,8$ – коефіцієнт використання поверхні антени;

$D_A = 1,83$ м - діаметр антени ЗС;

λ – довжина хвилі , м

$g = 0,6$.

$$\lambda = \frac{c}{f_{\uparrow}} .$$

$$\lambda_{\uparrow} = \frac{3 \cdot 10^8}{13 \cdot 10^9} = 0,023, \text{ м}$$

$$G_{\text{ЗС}} = \frac{10 \cdot 0,6 \cdot 1,83^2}{\lambda_{\uparrow}^2} = 37983 (\text{раз}).$$

Отримане значення тепер переведемо в дБ:

$$G_{\text{ЗС}} = 10 \lg(0,379 \cdot 10^5) = 45,79, \text{ дБ}.$$

Розрахунок сумарної потужності шумів на вході приймача

При розрахунку енергетики супутникових радіоліній важливо визначити повну потужність шумів, створюваних на вході приймального пристрою супутника і наземної станції.

Оскільки в діапазонах частот, де працюють супутникові системи, шуми мають адитивний характер то сумарна потужність визначається наступною формулою:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f,$$

де Δf – ефективна смуга частот ЗС (36 МГц),

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт/К} \cdot \text{Гц} - \text{стала Больцмана};$$

T_{Σ} - сумарна шумова температура, К.

$$P_{\text{ш}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 414,4 \cdot 36 \cdot 10^6 = 2,35 \cdot 10^{-13} \text{ ,Вт}$$

Для врахування завад від інших систем зв'язку збільшимо $P_{\text{ш}}$ на 20% $2,68 \cdot 10^{-13} \text{ (Вт) (-126,3 дБ)}$.

Визначення потужності передавача ЗС

Визначити необхідну потужність передавача за заданим значенням потужності сигналу на вході приймача можна за такою формулою:

$$P_{\text{ПРД}}(\text{ЗС}) = \frac{L_{0\uparrow} \cdot L_{\text{ДОД}} \cdot k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{шЗС}} \cdot a \cdot \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}\right)}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}}},$$

де $a = 6$ дБ (3,98 раз) - коефіцієнт запасу для лінії «вгору»;

$\Delta f_{\text{ш}} = 36$ МГц. - ефективна смуга частот ЗС;

$L_{\text{дод}} = 3.5$ дБ (2,24 раз);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К · Гц - стала Больцмана;

$G_{\text{ПРМ}} = 39$ дБ ($1039/10 = 7,943 \cdot 10^3$ раз);

$G_{\text{ПРД}} = 47,69$ дБ ($0,379 \cdot 10^5$ раз);

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = 12,88.$$

$$P_{\text{ПРД}}(\text{ЗС}) = \frac{4,57 \cdot 10^{-4} \cdot 2,24 \cdot 10^{-4} \cdot 414,4 \cdot 36 \cdot 10^6 \cdot 3,98 \cdot 12,88}{0,379 \cdot 10^5 \cdot 7,943 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = \frac{1,667 \cdot 10^{-4}}{2,567 \cdot 10^8}$$

$$= 30,49 \text{ Вт.}$$

Переведемо отримане значення в дБВт:

$$P_{\text{ПРД}} = 10 \log(30,49) = 14,84 \text{ дБВт.}$$

3.3 Енергетичний розрахунок ділянки "вниз" супутникової лінії космічна станція-наземна станція для м.Київ

Кут місця $\varphi = 18,8^\circ$ Координати супутника 75° сх.д.

Земна станція $50^\circ 27'$ пн.ш. $30^\circ 31'$ сх.д.

Знаходимо різницю по довготі для земної станції і супутника. $\Delta\lambda = 75^\circ - 30^\circ 31' = 44^\circ 69'$.

3.3.1 Розрахунок відстані від космічної до станції наземної стації

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot \cos \Psi} ,$$

β – різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 30^\circ 31' = 44^\circ 69'$

3.3.2 Розрахунок відстані від космічної станції до наземної стації

ξ - широта станції $\xi_{ЗС} = 50^\circ 27'$ пн.ш

β - різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 30^\circ 31' = 44^\circ 69'$

$\cos \Psi = \cos \xi \cdot \cos \beta = \cos(50^\circ 27') \cdot \cos(44,69^\circ) = 0,4544$.

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0.2954 \cdot 0,4286} = 39683 \text{ км} .$$

3.3.3 Розрахунок ослаблення сигналу на лінії ЗС-КС

Загасання енергії у вільному просторі, що визначається зменшенням щільності потоку потужності при віддаленні від випромінювача визначається за формулою за формулою:

$$L_{\Sigma} = L_0 + L_{\text{дод}} ,$$

де L_0 = затухання сигналу на лінії наземна станція- штучний супутник землі через сферичне розсіювання хвиль;

$L_{\text{дод}}$ – додаткові витрати.

Окрім основних втрат, на шляху сигналу є додаткові втрати $L_{\text{дод}}$,

які визначаємо формулою:

$$L_{\text{дод}} = L_a + L_g + L_n + L_{\text{п}},$$

де L_a - поглинання в спокійній атмосфері

Для $f = 11 \text{ ГГц}$ и $\varphi = 18,8^\circ$.

$$L_a = 2,3 \text{ дБ.}$$

$L_{\text{п}}$ - втрати через неузгодженість поляризації антени.

l_1 и l_2 - коефіцієнти еліптичності (відношення малої напіввісі еліпса до великої).

$$l_1 = \frac{5}{5} = 1, l_2 = \frac{5}{5} = 1.$$

$$L_{\text{п}} = 0,38 \text{ дБ.}$$

L_n - втрати через наведення антени.

$$L_n = 1 + (2 \cdot \theta / \theta_{0,5}).$$

де $\theta_{0,5}$ - ширина діаграми направленності за рівнем половинної потужності;

θ - вимірний кут відносно максимального випромінювання.

$$\theta_{0,5} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot g / G_0} = \sqrt{4,9 \cdot 10^3 \cdot 0,6 / 1102} = 1,63.$$

$g = 0,6 \div 0,8$ - коефіцієнт використання поверхні антени.

$$\theta = 0,10.$$

$$L_n = 1 + \left(2 \cdot \frac{\theta}{\theta_{0,5}} \right) = 1,015, \text{ дБ.}$$

L_g - втрати в гідрометеорах.

Інтенсивність дощу на ділянці ЗС - КА складає $\varepsilon = 16 \text{ мм/год.}$

$$L_g = L'_g \cdot l_e,$$

де l_e - еквівалентна довжина шляху .

При куті місця $\beta = 18,8^\circ$ та інтенсивності опадів для м.Київ

$\varepsilon = 16 \text{ мм/год; } l_3 = 6 \text{ км, } L'_g \text{ для } f = 13 \text{ ГГц } L'_g = 0,29 \text{ дБ.}$

$$L_g = 0,29 \cdot 6 = 1,74 \text{ дБ .}$$

$$L_{\text{дод}} = 2,3 + 1,74 + 1,015 + 0,38 = 5,4 \text{ дБ (3,47раз).}$$

Значення L_0 для ділянок станція – космічна станція розраховуються за формулою:

$$L_0 = 20(\lg f + \lg d) + 32,45 ,$$

де d – похила дальність, км

f - частота на ділянці «вниз», МГц

$$L_0 = 20(\lg 11000 + \lg 39853) + 32,45 = 205,25 \text{ дБ.}$$

Затухання сигналу на ділянці ЗС-КС складає:

$$L_{\Sigma} = 205,2 + 5,4 = 210,5, \text{ дБ.}$$

3.3.4 Розрахунок коефіцієнта підсилення антени центральної земної станції м.Київ

$$G_{ЗС} = \frac{10 \cdot g \cdot D_A^2}{\lambda^2} ,$$

де $g = 0,6 \dots 0,8$ – коефіцієнт використання поверхні антени;

$D_A = 3,8 \text{ м}$ - діаметр антени ЗС;

λ – довжина хвилі , м

$g = 0,6$.

$$\lambda = \frac{c}{f_1} .$$

$$\lambda_1 = \frac{3 \cdot 10^8}{11 \cdot 10^9} = 0,027 \text{ м.}$$

$$G_{ЗС} = \frac{10 \cdot 0,6 \cdot 3,5^2}{\lambda_1^2} = 118857 \text{ (раз).}$$

Отримане значення тепер переведемо в дБ:

$$G_{ЗС} = 10 \lg(1,118 \cdot 10^5) = 50,7 \text{ дБ.}$$

3.3.5 Розрахунок сумарної шумової температури приймального тракту центральної земної станції м.Київ

Еквівалентна шумова температура приймача, що складається з антени, хвилеводного тракту та приймача:

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0 \cdot \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) + \frac{T_{\text{пр}}}{\eta},$$

де T_A - шумова температура антени ЗС - 80К;

$T_0 = 290\text{К}$;

$\eta = 0,9$ (ККД АФТ ЗС)

$$T_{\text{пр}} = T_0 \cdot (K_{\text{ш}} - 1),$$

де $K_{\text{ш}} = 8$ - коефіцієнт шуму приймача ЗС

$$T_{\text{пр}} = 290 \cdot (8-1) = 2030 \text{ К}.$$

$$T_{\Sigma} = 80 + 290 \frac{1-0,9}{0,9} + \frac{290}{0,9} = 2368 \text{ К}.$$

Розрахунок сумарної потужності шумів на вході приймача

При розрахунку енергетики супутникових радіоліній важливо визначити повну потужність шумів, створюваних на вході приймального пристрою супутника і земної станції.

Оскільки в діапазонах частот, де працюють супутникові системи, шуми мають адитивний характер то сумарна потужність визначається наступною формулою:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f,$$

де Δf – ефективна смуга частот ЗС (54 МГц),

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К · Гц – стала Больцмана,

T_{Σ} – сумарна шумова температура, К.

$$P_{\text{ш}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2,37 \cdot 10^3 \cdot 54 \cdot 10^6 = 1,7645 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$$

Для врахування завад від інших систем зв'язку збільшимо $P_{\text{ш}}$ на 20% $2,12 \cdot 10^{-12}$ (Вт) (-116,3247 дБ).

3.3.6 Визначення потужності сигналу на вході приймача центральної земної станції м.Київ

При розрахунку лінії часто виявляється заданою не потужність сигналу на вході приймача, а відношення сигнал-шум на вході приймача ($P_c/P_{\text{ш}}$). Для супутникових систем зв'язку зазвичай це співвідношення береться в межах

від 10 до 12 дБ:

$$\text{Прийmemo } \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = 10$$

В такому випадку потужність сигналу буде:

$$P_c = P_{\text{ш}} + 10 \text{ дБ} = -116,3247 + 10 = -106,3247 \text{ дБ.}$$

3.3.7 Визначення потужності передавача центральної земної станції м.Київ

Визначити необхідну потужність передавача за заданим значенням потужності сигналу на вході приймача можна за такою формулою:

$$P_{\text{ПРД(ЗС)}} = \frac{L_{01} \cdot L_{\text{ДОД}} \cdot k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{шзЗС}} \cdot a \cdot \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}}},$$

де $b = 1,2 \text{ дБ}$ (1,32раз) - коефіцієнт запасу для лінії «вниз»;

$\Delta f_{\text{ш}} = 54 \text{ МГц}$ - шумова смуга приймача ;

$L_{\text{ДОД}} = 5,4 \text{ дБ}$ (3,47раз);

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт/К} \cdot \text{Гц}$ - стала Больцмана;

$G_{\text{ПРМ}} = 30 \text{ дБ}$ (1030/10 = 1000 раз);

$G_{\text{ПРД}} = 47,69 \text{ дБ}$ (1,118 · 10⁵ раз);

$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = 10 \text{ дБ} = 10 \text{ раз.}$

$$P_{\text{ПРД(ЗС)}} = \frac{1,12 \cdot 10^{-4} \cdot 3,47 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2368 \cdot 54 \cdot 10^6 \cdot 1,32 \cdot 10}{1000 \cdot 1,118 \cdot 10^5 \cdot 0,85 \cdot 0,9} = \frac{0,905 \cdot 10^{-4}}{0,855 \cdot 10^8} = 105,84 \text{ Вт.}$$

Переведемо отримане значення в дБВт:

$$P_{\text{ПРД}} = 10 \log(105,84) = 20,24 \text{ дБВт.}$$

Висновки по 3 розділу

1. Проведено енергетичний розрахунок ділянок "вгору" супутникових ліній наземна-станція-космічна станція для с.Суслівка, с.Дібровськ, м.Волочиськ та проведено енергетичний розрахунок ділянки "вниз" супутникової лінії наземна-станція-космічна станція для м.Київ.

2. Визначенні значення затухання сигналу на ділянках земна станція-космічна станція через сферичне розсіювання хвиль, поглинання в спокійній атмосфері, втрати через неузгодженість поляризації антен, втрати через неточність наведення антен та втрати в гідрометеорах для: с.Суслівка(209.7дБ);с.Дібровськ(209.6);м.Волочиськ(210.1дБ);центральна земна станція м.Київ(210.5дБ).

3.Проведені розрахунки щодо необхідних потужностей передавачів земних станцій:с.Суслівка(41.1Вт); с.Дібровськ(26.46Вт); м.Волочиськ(30.49); центральна земна станція м.Київ(105.84Вт).

4. Еквівалентна шумова температура приймального тракту космічної станції ABS-2 з урахуванням шумової температури антени, шумової температури фідера та приймача складає: 414.4К

4 ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ПОТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ В МЕРЕЖАХ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ VSAT ПРИ ВІДПОВІДНИХ СПІВВІДНОШЕННЯХ СИГНАЛ/ШУМ НА ЙМОВІРНІСТЬ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ

4.1 Дослідження впливу швидкості цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку VSAT

Визначимо потужність сигналу на вході приймача земної станції VSAT:

$$P_c = 10^{0.1 \cdot p_c} \quad (4.1)$$

де P_c – потужність сигналу на вході, Вт; p_c – задана потужність на вході приймача, дБ Вт.

Тривалість тактового інтервалу(тривалість одного біту)дорівнює

$$T = 1 / R. \quad (4.2)$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_b = P_c \cdot T. \quad (4.3)$$

Потужність шумів на вході приймача можна визначити по формулі [1] :

$$P_{ш.пр} = n \cdot k \cdot \Delta f_{пр} \quad (4.4)$$

де n – коефіцієнт шуму приймача ($n = 10$ дБ); $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц·град – стала Больцмана; $T_0 = 290$ К – шумова температура в градусах Кельвіна; $\Delta f_{пр}$ – ширина смуги пропускання високочастотного тракту приймача.

Звідси одностороння спектральна щільність потужності білого шуму може бути представлена як:

$$N_0 = n \cdot k \cdot T_0, \quad (4.5)$$

що дозволяє записати:

$$N_0 = k \cdot T_0 + n = -204 + 10 = -194 \frac{\text{дБ} \cdot \text{Вт}}{\text{Гц}}. \quad (4.6)$$

Останній результат можна переписати у вигляді:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}. \quad (4.7)$$

Відношення сигнал/шум на вході приймача знаходиться як:

$$E_b / N_0. \quad (4.8)$$

Ймовірність помилки розраховується:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right). \quad (4.9)$$

Визначимо ймовірність бітової помилки в системах мобільного зв'язку з фазовою маніпуляцією ФМ-2 (BPSK) для забезпечення якості прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки $10^{-4} - 10^{-7}$.

При швидкості передачі $R=8$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c.\max}$) на вході приймача, яка забезпечує максимальну якість прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} (Q(5.19)). По формулі (9) знаходимо значення $E_b = 5.36 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/8 \cdot 10^6 = 1.25 \cdot 10^{-7}$ с.

Згідно формул (4.3) та (4.1) визначаємо $p_{c.\max}$.

$$p_{c.\max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -113.6 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-4} (Q(3.69)) [1].

$$p_{c.\min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -116.7 \text{ дБ Вт}.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($p_{c,max} = -113.6$ дБВт; $p_{c,min} = -116.7$ дБВт)

Знайдемо потужність сигналу на вході приймача

$$\begin{aligned}
 P_{c1} &= 10^{0.1 \cdot (-113.6)} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c2} &= 10^{0.1 \cdot (-114.122.4)} = 3.97 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c3} &= 10^{0.1 \cdot (-114.3)} = 3.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c4} &= 10^{0.1 \cdot (-114.6)} = 3.39 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c5} &= 10^{0.1 \cdot (-115)} = 3.14 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c6} &= 10^{0.1 \cdot (-115.3)} = 2.9 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c7} &= 10^{0.1 \cdot (-115.7)} = 2.68 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c8} &= 10^{0.1 \cdot (-116)} = 2.48 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c9} &= 10^{0.1 \cdot (-116.3)} = 2.29 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c10} &= 10^{0.1 \cdot (-116.7)} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c1} &= P_{c,max} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c10} &= P_{c,min} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}
 \end{aligned}$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта, рівна

$$T_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{8 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$\begin{aligned}
 E_{b1} &= P_{c1} \cdot T_1 = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b2} &= P_{c2} \cdot T_1 = 3.97 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b3} &= P_{c3} \cdot T_1 = 3.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b4} &= P_{c4} \cdot T_1 = 3.39 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b5} &= P_{c5} \cdot T_1 = 3.14 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b6} &= P_{c6} \cdot T_1 = 2.9 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.62 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b7} &= P_{c7} \cdot T_1 = 2.68 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.35 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b8} &= P_{c8} \cdot T_1 = 2.48 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b9} &= P_{c9} \cdot T_1 = 2.29 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.86 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b10} &= P_{c10} \cdot T_1 = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}
 \end{aligned}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача:

$$\begin{aligned}
 \frac{E_{b1}}{N_0} &= \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.47. & \frac{E_{b2}}{N_0} &= \frac{4.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.46.
 \end{aligned}$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{4.58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.50.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{4.23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.62.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{3.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.84.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{3.62 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.09.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{3.35 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.41.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{3.1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.78.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{2.86 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.18.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.78.$$

Розраховуємо ймовірність бітової помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.36 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.19) = 1.051 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.96 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.99) = 3.019 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.58 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.8) = 7.933 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.23 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.61) = 1.013 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.92 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.44) = 4.498 \cdot 10^{-6}. \quad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.62 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.27) = 9.774 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.35 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.10) = 2.066 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.1 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.8) = 3.908 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.86 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.79) = 7.532 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.69) = 1.121 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 4.1 - Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 8 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$0.051 \cdot 10^{-7}$	$3.019 \cdot 10^{-7}$	$7.933 \cdot 10^{-7}$	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$4.498 \cdot 10^{-6}$	$9.774 \cdot 10^{-6}$	$3.908 \cdot 10^{-5}$	$7.532 \cdot 10^{-5}$	$1.121 \cdot 10^{-4}$
Потужність сигналу, дБВт	-113,6	-114	-114,3	-114,6	-115	-115,3	-115,7	-116	-116,3
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13,47	12,46	11,5	10,62	9,84	9,09	8,41	7,78	7,18

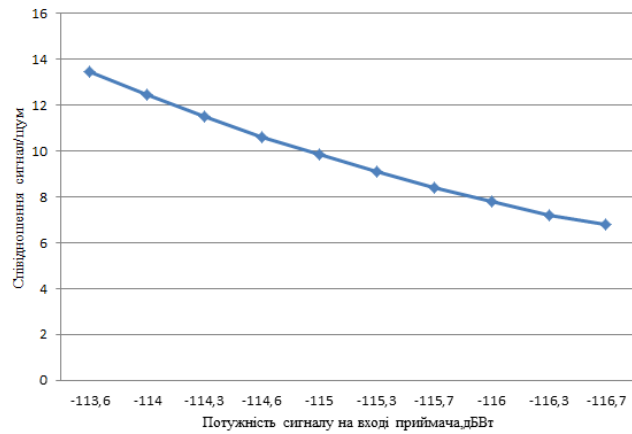


Рис 4.1-Залежність співвідношення сигнал/шум від потужності сигналу на вході приймача для $R_1=8$ Мбіт/с

При швидкості передачі $R=24$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($P_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує якість прийому інформації в межах ймовірності біткової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} (Q(5.18)). По формулі (4.9) знаходимо значення $E_b = 5.31 \cdot 10^{-19}$ Джс.

Тривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/24 \cdot 10^6 = 0.416 \cdot 10^{-7}$ с.

Згідно формул (4.3) та (4.1) визначаємо $P_{c,max}$.

$$P_{c,max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Джс}}{0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 12.764 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -108.9 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності біткової помилки 10^{-4} (Q(3.67)) [1].

$$P_{c,min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.68 \cdot 10^{-19} \text{ Джс}}{0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 6.44 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -111.9 \text{ дБ Вт}.$$

Визначаємо потужність сигналу на вході приймача.

$$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-108.9)} = 12.882 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-109.2)} = 12.022 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-109.5)} = 11.220 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-109.9)} = 10.232 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-110.2)} = 9.549 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-110.6)} = 8.709 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-110.9)} = 8.128 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-111.2)} = 7.585 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-111.6)} = 6.918 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-111.9)} = 6.456 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c1} = P_{c,max} = 12.882 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c10} = P_{c,min} = 6.456 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта, рівна

$$T_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{24 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_2 = 8.511 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_2 = 7.888 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.93 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_2 = 7.413 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_2 = 6.918 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.32 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_2 = 6.025 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_2 = 5.888 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_2 = 5.495 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.43 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_2 = 5.011 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.13 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_2 = 4.677 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_2 = 4.365 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.72 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача.

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.34.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{4.93 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.38.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{4.63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.63.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{4.32 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.85.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{3.76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.44.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{3.68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.24.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{3.43 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.61.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{3.13 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.86.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{2.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.33.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{2.72 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.83$$

Розраховуємо ймовірність помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.31 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.18) = 1.109 \cdot 10^{-8}. \quad P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.93 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.98) = 3.179 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.63 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.82) = 7.547 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.32 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.66) = 1.581 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.76 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.35) = 6.807 \cdot 10^{-6}. \quad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.68 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.3) = 8.540 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.43 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.15) = 1.662 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.13 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.97) = 3.594 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.92 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.87) = 6.407 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.72 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.7) = 1.078 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 4.2 -Залежність значення ймовірності бігової помилки від потужності сигналу та співвідношення сигнал/шум на вході приймача для швидкості 24 Мбіт/с

Ймовірність бігової помилки	$1.109 \cdot 10^{-7}$	$3.179 \cdot 10^{-7}$	$7.547 \cdot 10^{-7}$	$1.581 \cdot 10^{-6}$	$6.807 \cdot 10^{-6}$	$8.540 \cdot 10^{-5}$	$1.662 \cdot 10^{-5}$	$6.407 \cdot 10^{-5}$	$1.078 \cdot 10^{-4}$
Потужність сигналу, дБВт	-108.9	-109.2	-109.5	-109.9	-110.2	-110.6	-110.9	-111.2	-111.6
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13.34	12.38	11.63	10.85	9.44	9.24	8.61	7.86	7.33

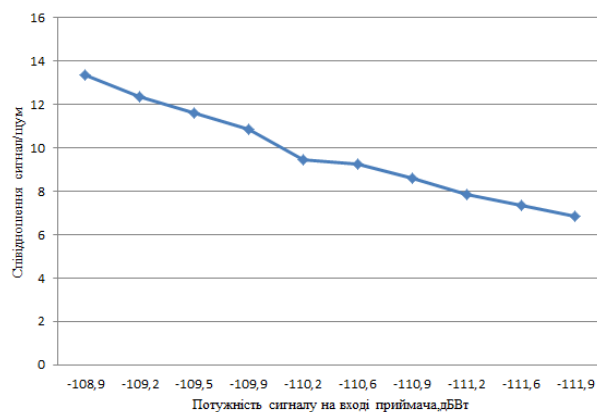


Рис.4.2 - Залежність співвідношення сигнал/шум від потужності сигналу на вході приймача для $R_2=24$ Мбіт

При швидкості передачі $R_3=40$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($P_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує якість прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} (Q(5.19)). По формулі (4.9) знаходимо значення $E_b = 5.36 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/40 \cdot 10^6$ біт/с = $0.25 \cdot 10^{-7}$ с.

Згідно формул (4.3) та (4.1) визначаємо $P_{c,max}$.

$$P_{c,max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 21.24 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -106.7 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-4} (Q(3.68)) [1].

$$P_{c,min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 10.8 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -109.6 \text{ дБ Вт}.$$

Визначаємо потужність сигналу на вході приймача.

$$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-106.7)} = 21.376 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-107)} = 19.952 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-107.3)} = 18.620 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-107.6)} = 17.378 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-108)} = 15.848 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-108.3)} = 14.791 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-108.6)} = 13.803 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-109)} = 12.589 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-109.3)} = 11.641 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-109.6)} = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c1} = P_{c,max} = 21.367 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c10} = P_{c,min} = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта, рівна:

$$T_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{40 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_3 = 21.376 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_3 = 19.952 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_3 = 18.620 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.65 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_3 = 17.378 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.34 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_3 = 15.848 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_3 = 14.791 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_3 = 13.803 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.45 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_3 = 12.589 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.14 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_3 = 11.641 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.91 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_3 = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача.

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.46.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{4.98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.51.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{4.65 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.68.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{4.34 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.90.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{3.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.94.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{3.69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.27.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{3.45 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.66.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{3.14 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.88.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{2.91 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.31.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{3.46 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.78.$$

Розраховуємо ймовірність помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.19 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.19) = 1.051 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.93 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.0) = 2.867 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.65 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.83) = 6.827 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.34 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.67) = 1.506 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.96 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.46) = 4.098 \cdot 10^{-6}. \quad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.69 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.3) = 8.163 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.45 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.16) = 1.591 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.97) = 3.594 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.91 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.16) = 6.673 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.68) = 1.166 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 4.3-Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 40 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$1.051 \cdot 10^{-7}$	$2.867 \cdot 10^{-7}$	$6.827 \cdot 10^{-7}$	$1.506 \cdot 10^{-6}$	$4.098 \cdot 10^{-6}$	$8.163 \cdot 10^{-6}$	$1.591 \cdot 10^{-5}$	$3.594 \cdot 10^{-5}$	$6.673 \cdot 10^{-5}$
-----------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Потужність сигналу, дБВт	-106.7	-107	-107.3	-107.6	-108	-108.3	-108.6	-109	-109.3
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13.46	12.51	11.68	10.90	9.94	9.27	8.66	7.88	7.31

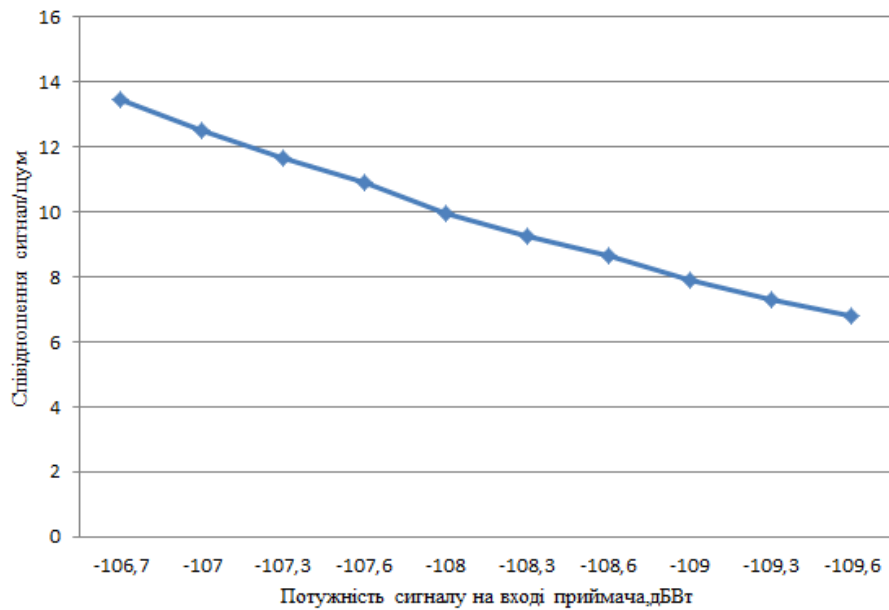


Рис. 4.3-Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для $R_3=40$ Мбіт/с.

Таблиця 4.4-Залежність динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача від швидкості передачі інформації в межах ймовірності помилки $10^{-7} \dots 10^{-4}$

Швидкість передачі \ Потужність Сигналу	$p_{c.max}$, дБ Вт	$p_{c.min}$, дБ Вт
8 Мбіт/с	-113.6	-116.6
24 Мбіт/с	-108.9	-111.9
40 Мбіт/с	-106.7	-109.6

4.2 Залежність ймовірності бітової помилки від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношення сигнал/шум при заданій потужності сигналу на вході приймача населених пунктів Сулівка;Дібровськ;Волочиськ;Київ.

Таблиця 4.5 - Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношенні сигнал/шум при потужності сигналу на вході приймача $P_{c \max}$ для населеного пункту Сулівка

R, Мбіт/с	$P_{c \max}$, дБВт	T_0 , К	E_b/N_0	E_b/N_0 , дБ	P_b
8	-113.6	290	13.47	11.3	$1.051 \cdot 10^{-7}$
		299	13	11.1	$1.698 \cdot 10^{-7}$
		308	12.61	11	$2.584 \cdot 10^{-7}$
16	-110.7	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		299	12.88	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		308	12.49	11.0	$2.867 \cdot 10^{-7}$
24	-108.9	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		299	12.88	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		308	12.49	11.0	$2.867 \cdot 10^{-7}$
32	-107.7	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		299	12.88	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		308	12.49	11.0	$2.867 \cdot 10^{-7}$
40	-106.7	290	13.47	11.3	$1.051 \cdot 10^{-7}$
		299	13	11.1	$1.698 \cdot 10^{-7}$
		308	12.61	11	$2.584 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 4.6 - Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношенні сигнал/шум при потужності сигналу на вході приймача $P_{c \max}$ для населеного пункту Дібровськ

R, Мбіт/с	$P_{c \max}$, дБВт	T_0 , К	E_b/N_0	E_b/N_0 , дБ	P_b
8	-113.6	290	13.47	11.3	$1.051 \cdot 10^{-7}$
		300	12.94	11	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		310	12.55	11	$2.772 \cdot 10^{-7}$

16	-110.7	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		300	12.82	11.1	$2.096 \cdot 10^{-7}$
		310	12.43	10.9	$3.019 \cdot 10^{-7}$
24	-108.9	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		300	12.82	11.1	$2.096 \cdot 10^{-7}$
		310	12.43	10.9	$3.019 \cdot 10^{-7}$
32	-107.7	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		300	12.82	11.1	$2.096 \cdot 10^{-7}$
		310	12.43	10.9	$3.019 \cdot 10^{-7}$
40	-106.7	290	13.47	11.3	$1.051 \cdot 10^{-7}$
		300	12.94	11	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		310	12.55	11	$2.772 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 4.7 - Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношенні сигнал/шум при потужності сигналу на вході приймача $P_c \max$ для міста Волочиськ

R, Мбіт/с	$P_c \max$, дБВт	T_0 , К	E_b/N_0	E_b/N_0 , дБ	P_b
8	-113.6	290	13.47	11.3	$1.051 \cdot 10^{-7}$
		298	13.04	11.2	$1.611 \cdot 10^{-7}$
		307	12.67	11	$2.452 \cdot 10^{-7}$
16	-110.7	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		298	12.91	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		307	12.55	11	$2.722 \cdot 10^{-7}$
24	-108.9	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		298	12.91	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		307	12.55	11	$2.722 \cdot 10^{-7}$
32	-107.7	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		298	12.91	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		307	12.55	11	$2.722 \cdot 10^{-7}$
40	-106.7	290	13.47	11.3	$1.051 \cdot 10^{-7}$
		298	13.04	11.2	$1.611 \cdot 10^{-7}$
		307	12.67	11	$2.452 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 4.8 - Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношенні сигнал/шум при потужності сигналу на вході приймача $P_c \max$ для міста Київ

R, Мбіт/с	P _c max, дБВт	T ₀ , К	E _b /N ₀	E _b /N ₀ , дБ	P _b
8	-113.6	290	13.47	11.3	1.051·10 ⁻⁷
		302	12.88	11.1	1.887·10 ⁻⁷
		312	12.46	11	3.019·10 ⁻⁷
16	-110.7	290	13.34	11.3	1.19·10 ⁻⁷
		302	12.76	11.1	2.209·10 ⁻⁷
		312	12.34	10.9	3.348·10 ⁻⁷
24	-108.9	290	13.34	11.3	1.19·10 ⁻⁷
		302	12.76	11.1	2.209·10 ⁻⁷
		312	12.34	10.9	3.348·10 ⁻⁷
32	-107.7	290	13.34	11.3	1.19·10 ⁻⁷
		302	12.76	11.1	2.209·10 ⁻⁷
		312	12.34	10.9	3.348·10 ⁻⁷
40	-106.7	290	13.47	11.3	1.051·10 ⁻⁷
		302	12.88	11.1	1.878·10 ⁻⁷
		312	12.46	11	3.019·10 ⁻⁷

Таблиця 4.9 – Ймовірність бігової помилки в залежності від шумової температури, потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації R=24 Мбіт/с для населеного пункту Суслівка

T, К	P _c , дБВт	E _b /N ₀	E _b /N ₀ , дБ	P _b
290	-108.9	13.34	11.3	1.19·10 ⁻⁷
	-110.2	9.84	9.9	4.498·10 ⁻⁶
	-111.9	6.7	8,3	1.261·10 ⁻⁴
299	-108.9	12.88	11.1	1.887·10 ⁻⁷
	-110.2	9.12	9.6	9.774·10 ⁻⁶
	-111.9	6.6	8.2	1.417·10 ⁻⁴
308	-108.9	12.49	11.0	2.867·10 ⁻⁷
	-110.2	8.84	9.4	1.277·10 ⁻⁵
	-111.9	6.4	8	1.718·10 ⁻⁴

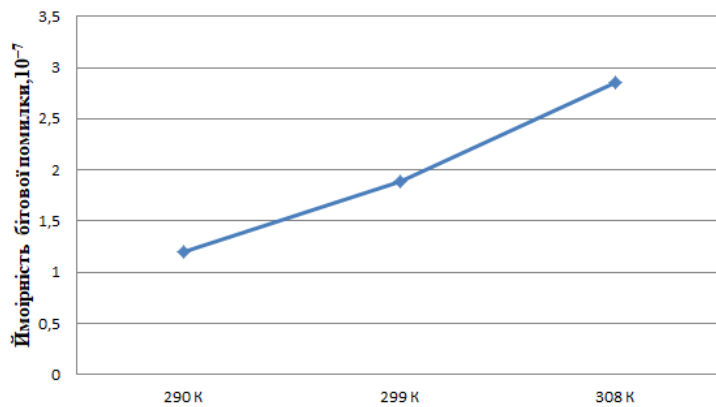


Рисунок 4.4-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -108.9дБВт, $R=24$ Мбіт/с для населеного пункту Суслівка

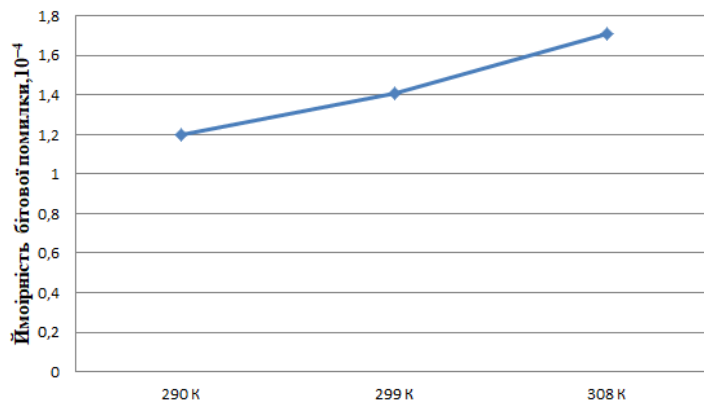


Рисунок 4.5-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -111.9дБВт, $R=24$ Мбіт/с для населеного пункту Суслівка

Таблиця 4.10 – Ймовірність бітової помилки в залежності від шумової температури, потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації $R=24$ Мбіт/с для населеного пункту Дібровськ

T, K	P_c , дБВт	E_b/N_0	E_b/N_0 , дБ	P_b
290	-108.9	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	9.84	9.9	$4.498 \cdot 10^{-6}$
	-111.9	6.7	8.3	$1.261 \cdot 10^{-4}$
300	-108.9	12.82	11.1	$2.096 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	9.08	9.5	$1.022 \cdot 10^{-5}$
	-111.9	6.57	8.1	$1.473 \cdot 10^{-4}$
	-108.9	12.43	10.9	$3.019 \cdot 10^{-7}$

310	-110.2	8.80	9.4	$1.222 \cdot 10^{-5}$
	-111.9	6.37	8	$1.785 \cdot 10^{-4}$

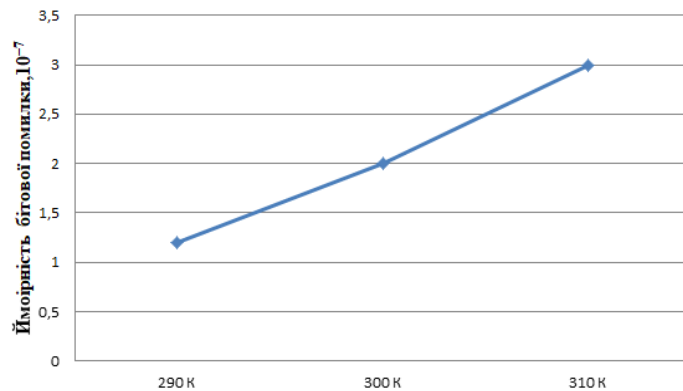


Рисунок 4.6-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -108.9дБВт, R=24 Мбіт/с для населеного пункту Дібровськ

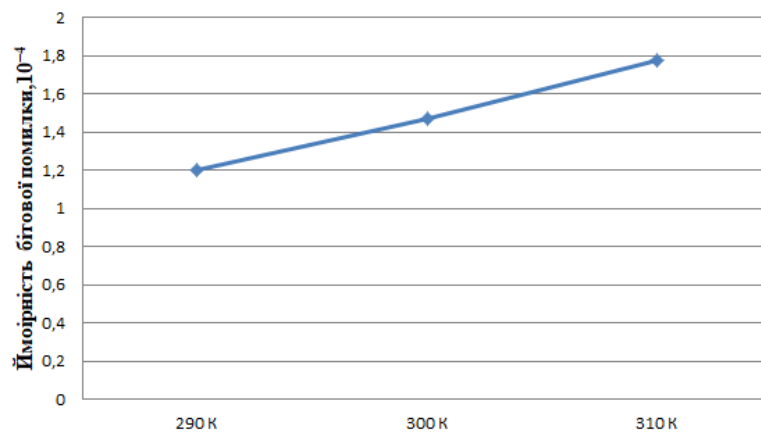


Рисунок 4.7-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -111.9дБВт, R=24 Мбіт/с для населеного пункту Дібровськ

Таблиця 4.11 – Ймовірність бітової помилки в залежності від шумової температури, потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації R=24 Мбіт/с для міста Волочиськ

Т, К	P_c , дБВт	E_b/N_0	E_b/N_0 , дБ	P_b
290	-108.9	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	9.84	9.9	$4.498 \cdot 10^{-6}$
	-111.9	6.7	8,3	$1.261 \cdot 10^{-4}$

298	-108.9	12.91	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	9.14	9.6	$9.345 \cdot 10^{-6}$
	-111.9	6.61	8.2	$1.363 \cdot 10^{-4}$
307	-108.9	12.55	11	$2.722 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	8.88	9.4	$1.222 \cdot 10^{-5}$
	-111.9	6.43	8	$1.653 \cdot 10^{-4}$

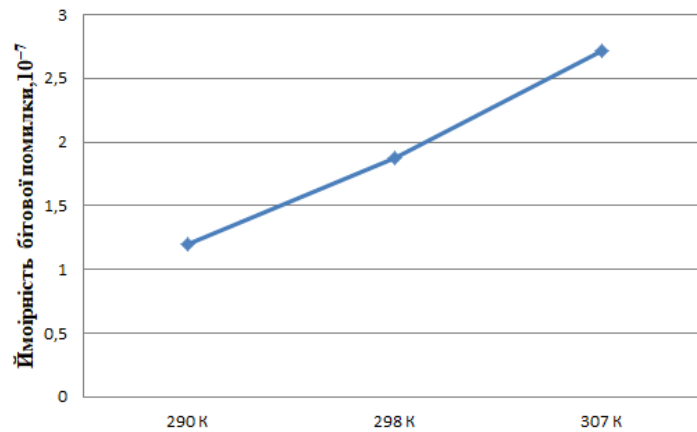


Рисунок 4.8-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -108.99дБВт, R=24 Мбіт/с для міста Волочиськ

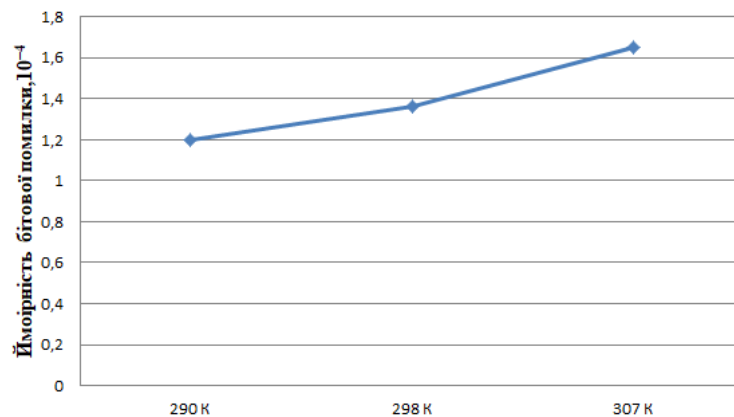


Рисунок 4.9-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -111.99дБВт, R=24 Мбіт/с для міста Волочиськ

Таблиця 4.12 – Ймовірність бітової помилки в залежності від шумової температури, потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації R=24 Мбіт/с для міста Київ.

Т, К	P_c , дБВт	E_b/N_0	E_b/N_0 , дБ	P_b
290	-108.9	13.34	11.3	$1.1.9 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	9.84	9.9	$4,498 \cdot 10^{-6}$

	-111.9	6.7	8,3	$1.261 \cdot 10^{-4}$
302	-108.9	12.76	11.1	$2.209 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	9.03	9.5	$1.069 \cdot 10^{-5}$
	-111.9	6.53	8.1	$1.473 \cdot 10^{-4}$
312	-108.9	12.34	10.9	$3.348 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	8.74	9.4	$1.458 \cdot 10^{-5}$
	-111.9	6.32	8	$1.854 \cdot 10^{-4}$

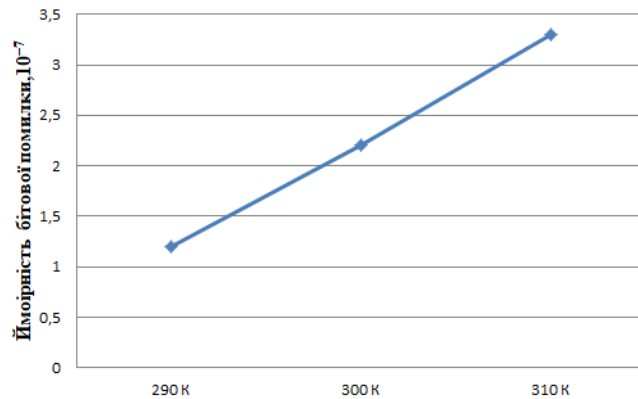


Рисунок 4.10-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -108.99дБВт, R=24 Мбіт/с для міста Київ

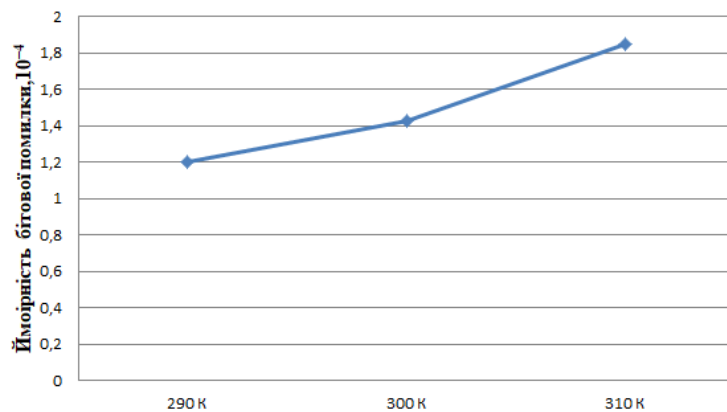


Рисунок 4.11-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -111.99дБВт, R=24 Мбіт/с для міста Київ

Висновки по 4 розділу

Досліджено вплив швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на вході приймача абонентської супутникової станції на ймовірність бітової помилки.

1. Для забезпечення ймовірності бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4} при шумовій температурі 290К динамічний діапазон зміни потужностей на вході приймача наземної станції VSAT повинен знаходитися в межах: від -113.6 до -116.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_1=8$ Мбіт/с; від -108.9 до -111.9 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_2=24$ Мбіт/с; від -106.7 до -109.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_3=40$ Мбіт/с.

2. При збільшенні швидкості передачі цифрової інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT від 8 Мбіт/с до 40 Мбіт/с необхідно потужність сигналу на вході приймача підвищити в середньому в 5 разів (на 7дБ) для забезпечення заданої якості зв'язку(ймовірність бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4}).

3. Для визначення впливу швидкості цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку VSAT на ймовірність бітової помилки на вході приймача потребує подальшого дослідження підвищення співвідношення сигнал/шум з урахуванням випадання опадів, підвищення температури навколишнього середовища в місцях знаходження наземної станції VSAT.

При швидкості передачі інформації $R = 24$ Мбіт/с при температурі шумів $T_0 = 290$ К, потужності сигналу на вході приймача $P_c = -108.9$ дБВт, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0 = 13.34$.

4. При потужності сигналу $p_c = -111.9$ дБВт і температурі шумів $T = 290$ К, швидкості передачі інформації $R = 24$ Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0 = 6.7$ При зменшенні потужності сигналу від -108.9дБВт до -111.9 дБВт відношення сигнал/шум зменшиться на 50,2% і становитиме 6.7, а ймовірність бітової помилки P_b збільшиться з $1.19 \cdot 10^{-7}$ до $1.26 \cdot 10^{-4}$.

5. При температурі $T = 308 \text{ K}$, потужності сигналу на вході приймача $P_c = -108.9 \text{ дБВт}$, швидкості передачі інформації $R = 24 \text{ Мбіт/с}$, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0 = 12.49$. При збільшенні температури шумів з 290 K до 308 K відношення сигнал/шум зменшиться на $6,4\%$ і становитиме 12.49 , а ймовірність бітової помилки P_b збільшиться з $1.19 \cdot 10^{-7}$ до $2.87 \cdot 10^{-7}$

ВИСНОВКИ

1. Один штучний супутник Землі на геостаціонарній орбіті з глобальним приймальним променем може обслужити близько третини всієї земної кулі.

2. Супутникові цифрові канали систем зв'язку VSAT мають широкий діапазон і велику пропускну здатність, що дає можливість мати мережу з високими необхідними інформаційними послугами високої якості з ймовірністю помилкового прийому двійкового символу в межах не більше 10^6 при мінімальних витратах.

3. Центральна земна станція гарантує ефективне управління функціонуванням не тільки самої центральної ЗС, але і всіх її периферійних терміналів. За допомогою неї здійснюється як управління інформаційними потоками так і технічна діагностика можливих несправностей.

4. Оператори мобільного зв'язку застосовують мережі VSAT для приєднання віддалених базових станцій з малим трафіком телефонних розмов через інтерфейс E1(2.048 Мбіт/с).

5. Розраховані ослаблення сигналу в іоносфері, в спокійній атмосфері і опадах на території України в чотирьох населених пунктах (с.Суслівка;с.Дібровськ;м.Волочиськ;м.Київ) в залежно від пори року і часу доби, для виявлення найгіршого ослаблення сигналу з урахуванням отриманих даних. Ослаблення сигналу протягом року на ділянках ЗС - ШСЗ і ШСЗ – ЗС найбільше у с.Дібровськ (випадання опадів 19 мм/год, загасання сигналу 1.8дБ) а найменше у с.Суслівка (випадання опадів 16 мм/год загасання сигналу 1.3дБ).

6. Затухання для двох робочих частот 11ГГц і 13ГГц в іоносфері складає: $1.65 \cdot 10^{-5}$ дБ та $1.18 \cdot 10^{-5}$ дБ відповідно.

7. Ослаблення сигналу в спокійній атмосфері найбільше у с.Дібровськ (поглинання сигналу складає 0.6дБ) і найменше у м.Київ (поглинання складає 0.3).

8. Визначенні значення затухання сигналу на ділянках земна станція-космічна станція через сферичне розсіювання хвиль, поглинання в спокійній атмосфері, втрати через неузгодженість поляризації антен, втрати через неточність наведення антен та втрати в гідрометеорах для: с.Суслівка(209.7дБ);с.Дібровськ(209.6);м.Волочиськ(210.1дБ);центральна земна станція м.Київ(210.5дБ).

9.Проведені розрахунки щодо необхідних потужностей передавачів земних станцій:с.Суслівка(41.1Вт); с.Дібровськ(26.46Вт); м.Волочиськ(30.49); центральна земна станція м.Київ(105.84Вт). Еквівалентна шумова температура приймального тракту космічної станції ABS-2 з урахуванням шумової температури антени, шумової температури фідера та приймача складає: 414.4К

10. Для забезпечення ймовірності бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4} при шумовій температурі 290К динамічний діапазон зміни потужностей на вході приймача наземної станції VSAT повинен знаходитися в межах: від -113.6 до -116.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_1=8$ Мбіт/с; від -108.9 до -111.9 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_2=24$ Мбіт/с; від -106.7 до -109.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_3=40$ Мбіт/с.

11. При збільшенні швидкості передачі цифрової інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT від 8 Мбіт/с до 40 Мбіт/с необхідно потужність сигналу на вході приймача підвищити в середньому в 5 разів (на 7дБ) для забезпечення заданої якості зв'язку(ймовірність бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4}).

12.При швидкості передачі інформації $R = 24$ Мбіт/с при температурі шумів $T_0 = 290$ К, потужності сигналу на вході приймача $P_c = -108.9$ дБВт, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0= 13.34$.

13. При потужності сигналу $p_c = -111.9$ дБВт і температурі шумів $T = 290$ К, швидкості передачі інформації $R = 24$ Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0= 6.7$ При зменшенні потужності сигналу від -108.9дБВт до --

111.9 дБВт відношення сигнал/шум зменшиться на 50,2% і становитиме 6.7, а ймовірність бітової помилки P_b збільшиться з $1.19 \cdot 10^{-7}$ до $1.26 \cdot 10^{-4}$.

14. При температурі $T = 308$ К, потужності сигналу на вході приймача $P_c = -108.9$ дБВт, швидкості передачі інформації $R = 24$ Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0 = 12.49$. При збільшенні температури шумів з 290 К до 308 К відношення сигнал/шум зменшиться на 6,4% і становитиме 12.49, а ймовірність бітової помилки P_b збільшиться з $1.19 \cdot 10^{-7}$ до $2.87 \cdot 10^{-7}$.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами: учеб. пособ. /Сукачев Э.А. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.
2. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами: учеб. пособ./Сукачев Э.А.: [2-е изд., испр. и доп.]. – Одесса: УГАС им. А.С. Попова, 2000. – 119 с.
3. Ратынский М.В. Основы сотовой связи/ Ратынский М.В. – М.: Радио и связь, 2000. – 248 с.
4. Системы мобильной связи: учеб. пособ. для вузов/ [Ипатов В.П., Орлов В.И., Самойлов И.М. и др.]. – М.: Горячая линия– Телеком, 2003. – 272 с.
5. Берлин А.Н. Сотовые системы связи: учеб. пособ./Берлин А.Н. – М.: БИНОМ, 2009. – 360 с.
6. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра/ Феер К.; пер. с англ. под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами/ Варакин Л.Е. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
- 8 Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. - 272 с.
- 9 Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. Под ред. Б.С. Алёшина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. М.: Физматлит, 2006. - 424 с.
- 10 Соловьёв Ю. А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000. - 268 с.
- 11 Кас'янов О.В., "Детально про GPS" <http://www.geoguide.com.ua/survey/survey.php?part=gps&art=gpsnav05>

- 12 <http://znaimo.com.ua> Супутникова система навігації.
- 13 Сомов А.М., Корнев С.Ф. Супутниковые системы связи Учебное пособие для вузов. Под ред. А.М. Сомова 2014 - 244 стр.
14. В.В. Бартенов, Г.В. Болотов, Супутникова связь – М.: Радио и связь, 1997.
15. Кислицын А.С., Корпоративные спутниковые информационные сети на основе VSAT – технологии. Методологии построения – М. Радиотехника 2007.
16. Hadjitheodosiou M. Service Integration in Next Generation VSAT Networks / CSHCN T.R. 97-29 (ISR T.R. 97-76).
17. Горностаев Ю.Н., Невдяев Л.М., Современные спутниковые системы связи. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2002. __
18. Maral G. VSAT Network. - John Willey & Sons, Ltd. 1995. - 282 p.
19. Р. Морелос-Сарагоса. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. Москва: Техносфера, 2005. - 320с
20. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Супутниковые сети связи: Учеб. пособие. - М.: Альпина Паблицер, 2004.75
21. Шелухин О.И., Шелухин А.О., Сирухи Дж.В. Интеграция видео, голоса и данных в гибридных сетях. Труды LVI Научной сессии, посвященной дню радио. «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, Москва, 2001. - Том 2, с. 311-354.
22. Анпилогов В.Р., Афонин А.А., Сети VSAT // Международная конференция операторов и пользователей спутниковых сетей связи на базе технологии VSAT. Тезисы докладов. Дубна, 2011.
23. Farserotu J., Prasad R. A Survey of Future Broadband Multimedia Satellite Systems, Issues and Trends., IEEE Communications Magazine, June 2000, pp.128-133.

24. Н.Н. Гладышева, Л.П. Ключковская. Спутниковые и радиорелейные системы передачи. Методические указания к выполнению курсовой работы – Алматы 2009.

25. Ахметбеков Р.Д., Чайко Е.В. Методы снижения задержек и потерь пакетов в спутниковой связи по технологии iDirect; Поиск №1(2)/2014, стр. 311-313.

26. Анпилогов В.Р. Спутниковое вещание – тенденции развития рынка. – М.: ВИСАТ-ТЕЛ. Спутниковые сети связи VSAT. Материалы сервера www.vsat-tel.ru

27. Спутниковые системы связи: Учебное пособие/В. Е. Камнев, В. В. Черкасов, Г. В. Чечин. – М.: «Альпина Паблишер», 2004. – 536 с.

28. Радиорелейные и спутниковые системы передачи: Учебник для вузов/А.С.Немировский, О. С. Данилович и др. под ред. А. С. Немировского. – М.: Радио и связь, 1986. – 392 с.

29. Регламент радиосвязи. Том 1. – М.: Радио и связь, 1985. – 509 с.

30. Материалы сервера www.eutelsat.com

Машбиц Л.М. Компьютерная картография и зоны спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 2000. - 254 с.

31. Материалы сервера www.boeing.com

32. Анпилогов В.Р. Эффективность и стоимость геостационарных ИСЗ фиксированной связи и вещания. – ВИСАТ-ТЕЛ. Материалы сервера www.vsat-tel.ru

33. Советов В.Я., Рухман Е.А., Яковлев С.А. Системы передачи информации от терминалов к ЦВМ. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. –240 с.

34. Спутниковая связь и вещание: Справочник/Под ред. Л.Я.Кантора. М.: Радио и связь, 1997. - 528 с.

35. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское радио, 1969. – 680 с.

36 Диденко М.Г., Столяров И.Н. Магистральная спутниковая связь: проблемы и решения. Спутниковая связь, №1, 2001/Приложение к журналу Технологии и средства связи, с. 18-24.

37 Кампев Е.Ф., Петрович Н.Т., Каблукова Н.В. Космическая радиосвязь. – М.: Советское радио, 1979. – 278 с.

38. Бабак В. П. Супутникова радіонавігація / В. П. Бабак, В. В. Конін, В. П. Харченко – К.: Техніка, 2004. – 328 с

39 .Аболиц, А. И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность / А. И. Аболиц. – М.: ИТИС, 2004. – 426с.: ил.

40. Кантор, Л. Я. Расцвет и кризис спутниковой связи / Л. Я. Кантор // Электросвязь, 2007. – №7. – С. 19-23.

41. Гениатулин, К. А. Системы подвижной спутниковой связи с зональным обслуживанием / К. А. Гениатулин // Молодой ученый: ежемесячный научный журнал. – Чита, 2009. – №10. – С. 46-48.

42. Машбиц, Л. М. Зоны обслуживания систем спутниковой связи / Л. М. Машбиц. – М.: Радио и связь, 1982. – 169с.

43. Дятлов, А. П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: Учебное пособие. Ч.1. / А. П. Дятлов. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 95 с.

44. Гудингз, Р. О спутниковой связи Thuraya [Электронный ресурс] / Р. Гудингз, . Нёрпель, Д. Уотсон. – Режим доступа: <http://www.nordcomp.ru/info/40/> (дата обращения: 16.09.2008).

45. Roddy, D. Satellite Communications: Third Edition / D. Roddy. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 552 с.

46. Анпилогов, В. Р. Методика вероятностной оценки пропускной способности многолучевой спутниковой сети массового обслуживания / В. Р. Анпилогов, А. А. Афонин // «Электросвязь». – 2011. – № 7. – С. 45-47.

47. Гениатулин, К. А. Моделирование распределения абонентов для проведения частотно-территориального планирования сети спутниковой

М. Машбиц. – М.: Радио и связь, 1982. – 169с.

43. Дятлов, А. П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: Учебное пособие. Ч.1. / А. П. Дятлов. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 95 с.

44. Гудингз, Р. О спутниковой связи Thuraya [Электронный ресурс] / Р. Гудингз, . Нёрпель, Д. Уотсон. – Режим доступа: <http://www.nordcomp.ru/info/40/> (дата обращения: 16.09.2008).

45. Roddy, D. Satellite Communications: Third Edition / D. Roddy. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 552 с.

46. Анпилогов, В. Р. Методика вероятностной оценки пропускной способности многолучевой спутниковой сети массового обслуживания / В. Р. Анпилогов, А. А. Афонин // «Электросвязь». – 2011. – № 7. – С. 45-47.

47. Гениатулин, К. А. Моделирование распределения абонентов для проведения частотно-территориального планирования сети спутниковой связи с зональным обслуживанием / К. А. Гениатулин // Современные проблемы телекоммуникаций: мат-лы Росс. научн.-техн. конф. – Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2014. – С. 103-104.

48. Гениатулин, К. А. Планирование систем спутниковой связи с зональным обслуживанием / К. А. Гениатулин, В. И. Носов // Вестник СибГУТИ: научный журнал. – Новосибирск, 2009, – № 4. – С. 11-22.

49. Стеклов В.К., Кільчицький Є.В. Основи управління мережами та послугами телекомунікацій: Підруч. [для студ. вищ. навч. закл за напрямом «Телекомунікації»]; За ред. Стеклова В.К. – К.: Техніка 2002. – 438 с.

50. Крылов, А. Системы спутниковой связи Ka-диапазона: состояние и перспективы развития / А. Крылов // Каталог «Технологии и средства связи». – 2011. – С. 48-50

Додаток Б. Апробація роботи

УДК 637.5.02

DOI:

ЛУЖАНСЬКИЙ В.І., КАРПОВА Л.В., КАНЮКА М.О.

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0001-5015-2107

e-mail: rtleasy@gmail.com

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ПОТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ В МЕРЕЖАХ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ VSAT ПРИ ВІДПОВІДНИХ СПІВВІДНОШЕННЯХ СИГНАЛ/ШУМ НА ЙМОВІРНІСТЬ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ

В роботі наведено дослідження впливу швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT – мала супутникова наземна станція при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на вході приймача абонентської супутникової станції на ймовірність біткової помилки. Наводяться технічні характеристики абонентських супутникових станцій, які працюють в K_u –діапазоні частот 11/14 ГГц з штучним супутником Землі на геостаціонарній орбіті. Визначено динамічний діапазон зміни потужностей сигналу на вході приймача наземної станції супутникового зв'язку на базі VSAT при різних швидкостях передачі даних, який забезпечує задане співвідношення сигнал/шум та ймовірність бітових помилок в межах 10^{-7} - 10^{-4} для необхідної якості зв'язку.

Ключові слова: абонентська супутникова станція на базі VSAT, швидкість передачі цифрових потоків, потужність сигналу на вході приймача, співвідношення сигнал/шум, ймовірність біткової помилки.

LUZHANSKIY Viktor I., KARPOVA Lesia V., KANYUKA Maksym O.

Khmel'nitsky National University

INFLUENCE OF THE TRANSMISSION RATE OF DIGITAL INFORMATION STREAMS IN VSAT-BASED SATELLITE COMMUNICATION NETWORKS WITH APPROPRIATE SIGNAL-TO-NOISE RATIOS ON THE PROBABILITY OF BIT ERROR

Among the satellite technologies, special attention is paid to the development of satellite communication technologies based on VSAT (Very Small Aperture Terminal). Small ground station VSAT, a terminal with a very small antenna diameter (0.9 ... 3.5 m), allows the use of VSAT stations antennas. This makes it possible to significantly reduce the size and cost of ground stations, the power of their transmitters and make their use widespread.

VSAT equipment makes it possible to build multiservice networks that provide all modern communication services: Internet access; telephone connection; transmission of audio and video information; reservation of existing communication channels; data collection, monitoring and remote control of industrial facilities, etc. Satellite signals, especially high-frequency bands Ku and Ka, are subject to attenuation during rain, fog, clouds. But this shortcoming is easily overcome when properly designing the network, choosing the technology and location of antennas.

The scientific article is devoted to the study of the influence of the speed of digital information transmission in satellite networks based on VSAT - a small satellite ground station, at the appropriate signal-to-noise ratio at the input of the receiver of the subscriber satellite station on the probability of bit error. The technical characteristics of subscriber satellite stations operating in the Ku-frequency band 11/14 GHz with an artificial satellite of the Earth in geostationary orbit are given. The dynamic range of signal power change at the input of the VSAT-based satellite

ground receiver at different data rates is determined, which provides a given signal-to-noise ratio and bit error probability in the range of 10^{-7} - 10^{-4} for the required communication quality.

Keywords: VSAT-based terrestrial satellite station, digital data rate, signal strength at the receiver input, signal-to-noise ratio, bit error probability.

Вступ

Мережі супутникового зв'язку VSAT (Very Small Aperture Terminal) являють собою ефективний інструмент передачі інформації по супутникових каналах, дозволяючи організувати звичний інформаційний простір в регіонах з нерозвиненою інфраструктурою за відсутності високошвидкісних наземних каналів зв'язку. Перш за все, мережа супутникового зв'язку VSAT цікава державним структурам, бізнесу, деяким категоріям приватних користувачів, оскільки з її допомогою можна реалізувати повноцінну корпоративну мережу незалежно від місця розташування. Супутник, який обслуговує мережу VSAT, знаходиться на геостаціонарній орбіті на висоті 35 786 км від поверхні Землі.

VSAT дослівно переводиться як «термінал з дуже малою апертурою». Це наземні станції супутникового зв'язку, технічні характеристики яких відповідають вимогам Рекомендацій МСЕ-Р S.725-S.729.37.

Основні вимоги мережі супутникового зв'язку VSAT:

- для роботи використовуються діапазони частот, виділені для Фіксованого супутникового зв'язку (14 і 6 ГГц на лінії «вгору» і 11-12 ГГц і 4 ГГц на лінії «вниз»);
- діаметр антен знаходиться в межах 0.9... 3.5 м;
- швидкість передачі інформації з наземної станції на супутник складає 1.2 кбіт/с ... 2.048 Мбіт/с, а з супутника до земної станції 2 ... 50 Мбіт/с;
- більшість мереж VSAT переважну частину свого робочого часу забезпечують ймовірність бітових помилок не більше 10^{-7} ;
- станції встановлюються безпосередньо у користувача, причому щільність розміщення їх на обмеженій території може бути дуже високою;
- станції можуть працювати автономно, контроль і керування роботою станцій у мережі здійснюються централізовано;
- станції можуть застосовуватися для передачі даних і телефонії в цифровому вигляді і в режимах роботи тільки на прийом (симплекс), чи на прийом/передачу (дуплекс);
- в станціях використовуються малопотужні радіопередавачі (від декількох ватів до десятків ватів) з обов'язковим обмеженням випромінюваної потужності з метою безпеки користувачів;
- мережі VSAT будуються на базі геостаціонарних супутників-ретрансляторів.

Це дозволяє максимально спростувати конструкцію абонентських терміналів і постачати їх простими фіксованими антенами без системи спостереження за супутником. Для забезпечення роботи через малогабаритні абонентські станції типу VSAT супутникові передавачі повинні мати вихідну потужність близько 40 Вт.

По усьому світі число встановлених станцій вимірюється сотнями тисяч, а число абонентів, що обслуговуються сотнями мільйонів. В Україні на сьогоднішній день вже більше 400 станцій VSAT по всій країні, які об'єднані в корпоративні системи.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Аналіз літературних джерел [1-3] показує недостатність проведених досліджень у цьому напрямку.

Метою даної роботи є дослідження впливу швидкості цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на ймовірність бітової помилки.

Виклад основного матеріалу

Визначимо потужність сигналу на вході приймача земної станції VSAT:

$$P_c = 10^{0.1 \cdot p_c} \quad (1)$$

де P_c – потужність сигналу на вході, Вт; p_c – задана потужність на вході приймача, дБ Вт.

Тривалість тактового інтервалу(тривалість одного біту)дорівнює

$$T = 1 / R. \quad (2)$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_b = P_c \cdot T. \quad (3)$$

Потужність шумів на вході приймача можна визначити по формулі [1] :

$$P_{ш.нр} = n \cdot k \cdot \Delta f_{нр}, \quad (4)$$

де n – коефіцієнт шуму приймача ($n = 10$ дБ); $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Вм/Гц·град – стала Больцмана; $T_0 = 290$ К – шумова температура в градусах Кельвіна; $\Delta f_{нр}$ – ширина смуги пропускання високочастотного тракту приймача.

Звідси одностороння спектральна щільність потужності білого шуму може бути представлена як:

$$N_0 = n \cdot k \cdot T_0, \quad (5)$$

що дозволяє записати:

$$N_0 = k \cdot T_0 + n = -204 + 10 = -194 \frac{\text{дБ} \cdot \text{Вм}}{\text{Гц}}. \quad (6)$$

Останній результат можна переписати у вигляді:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вм}}{\text{Гц}}. \quad (7)$$

Відношення сигнал/шум на вході приймача знаходиться як:

$$E_b / N_0. \quad (8)$$

Ймовірність помилки розраховується:

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}} \right). \quad (9)$$

Визначимо ймовірність бітової помилки в системах мобільного зв'язку з фазовою маніпуляцією ФМ-2 (BPSK) для забезпечення якості прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки $10^{-4} - 10^{-7}$.

При швидкості передачі $R=8$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c.\max}$) на вході приймача, яка забезпечує максимальну якість прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} (Q(5.19)). По формулі (9) знаходимо значення $E_b = 5.36 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/8 \cdot 10^6 = 1.25 \cdot 10^{-7}$ с.

Згідно формул (3) та (1) визначаємо $p_{c.\max}$.

$$p_{c.\max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вм} = -113.6 \text{ дБ Вм}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-4} (Q(3.69)) [1].

$$p_{c.\min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вм} = -116.7 \text{ дБ Вм}.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($p_{c.\max} = -113.6$ дБВт; $p_{c.\min} = -116.7$ дБВт)

Знайдемо потужність сигналу на вході приймача

$$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-113.6)} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вм}.$$

$$P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-114.22.4)} = 3.97 \cdot 10^{-12} \text{ Вм}.$$

$$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-114.3)} = 3.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вм}.$$

$$P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-114.6)} = 3.39 \cdot 10^{-12} \text{ Вм}.$$

$$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-115)} = 3.14 \cdot 10^{-12} \text{ Вм}.$$

$$P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-115.3)} = 2.9 \cdot 10^{-12} \text{ Вм}.$$

$$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-155.7)} = 2.68 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-116)} = 2.48 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-116.3)} = 2.29 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-116.7)} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c1} = P_{c.\max} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c10} = P_{c.\min} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта, рівна

$$T_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{8 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_1 = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_1 = 3.97 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_1 = 3.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_1 = 3.39 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_1 = 3.14 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_1 = 2.9 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.62 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_1 = 2.68 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.35 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_1 = 2.48 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_1 = 2.29 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.86 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_1 = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача:

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.47.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{4.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.46.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{4.58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.50.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{4.23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.62.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{3.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.84.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{3.62 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.09.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{3.35 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.41.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{3.1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.78.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{2.86 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.18.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.78.$$

Розрахуємо ймовірність бітової помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.36 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.19) = 1.051 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.96 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.99) = 3.019 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.58 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.8) = 7.933 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.23 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.61) = 1.013 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.92 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.44) = 4.498 \cdot 10^{-6}. \quad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.62 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.27) = 9.774 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.35 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.10) = 2.066 \cdot 10^{-5}, \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.1 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.8) = 3.908 \cdot 10^{-5}.$$

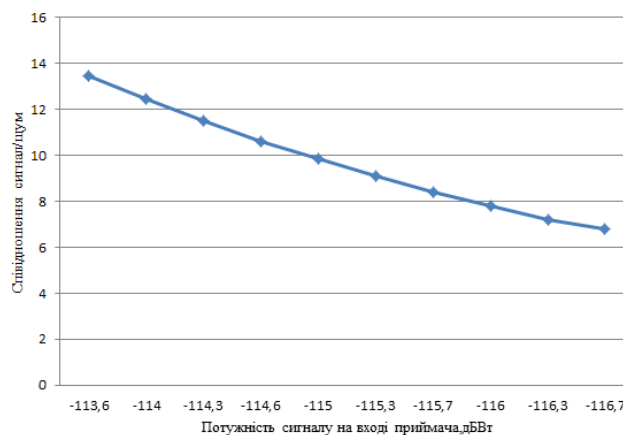
$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.86 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.79) = 7.532 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.69) = 1.121 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 1

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 8 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$0.051 \cdot 10^{-7}$	$3.019 \cdot 10^{-7}$	$7.933 \cdot 10^{-7}$	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$4.498 \cdot 10^{-6}$	$9.774 \cdot 10^{-6}$	$3.908 \cdot 10^{-5}$	$7.532 \cdot 10^{-5}$	$1.121 \cdot 10^{-4}$
Потужність сигналу, дБВт	-113,6	-114	-114,3	-114,6	-115	-115,3	-115,7	-116	-116,3
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13,47	12,46	11,5	10,62	9,84	9,09	8,41	7,78	7,18

Рис.1. Залежність співвідношення сигнал/шум від потужності сигналу на вході приймача для $R_1=8$ Мбіт/с

При швидкості передачі $R=24$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує якість прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} ($Q(5.18)$). По формулі (9) знаходимо значення $E_b = 5.31 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/24 \cdot 10^6 = 0.416 \cdot 10^{-7}$ с.

Згідно формул (3) та (1) визначаємо $p_{c,max}$.

$$P_{c,max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 12.764 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -108.9 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-4} ($Q(3.67)$) [1].

$$P_{c,min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 6.44 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -111.9 \text{ дБ Вт}.$$

Визначаємо потужність сигналу на вході приймача.

$$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-108.9)} = 12.882 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-109.2)} = 12.022 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c3} = 10^{0.1(-109.5)} = 11.220 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c4} = 10^{0.1(-109.9)} = 10.232 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c5} = 10^{0.1(-110.2)} = 9.549 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c6} = 10^{0.1(-110.6)} = 8.709 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c7} = 10^{0.1(-110.9)} = 8.128 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c8} = 10^{0.1(-111.2)} = 7.585 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c9} = 10^{0.1(-111.6)} = 6.918 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c10} = 10^{0.1(-111.9)} = 6.456 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c1} = P_{c.\max} = 12.882 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c10} = P_{c.\min} = 6.456 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта, рівна

$$T_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{24 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_2 = 8.511 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_2 = 7.888 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.93 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_2 = 7.413 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_2 = 6.918 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.32 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_2 = 6.025 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_2 = 5.888 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_2 = 5.495 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.43 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_2 = 5.011 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.13 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_2 = 4.677 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_2 = 4.365 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.72 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача.

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.34.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{4.93 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.38.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{4.63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.63.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{4.32 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.85.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{3.76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.44.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{3.68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.24.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{3.43 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.61.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{3.13 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.86.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{2.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.33.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{2.72 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.83$$

Розраховуємо ймовірність помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.31 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.18) = 1.109 \cdot 10^{-8}.$$

$$P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.93 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.98) = 3.179 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.63 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.82) = 7.547 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.32 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.66) = 1.581 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.76 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.35) = 6.807 \cdot 10^{-6}, \quad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.68 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.3) = 8.540 \cdot 10^{-6}.$$

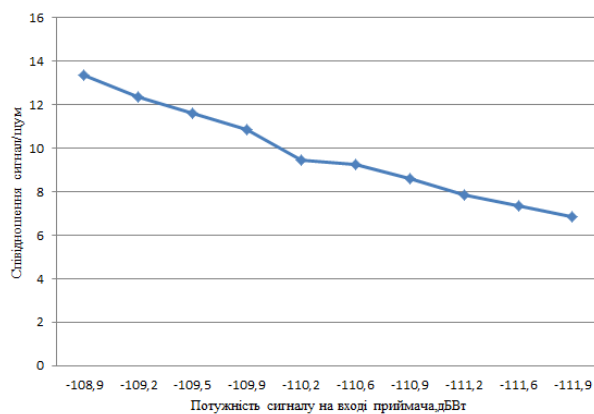
$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.43 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.15) = 1.662 \cdot 10^{-5}, \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.13 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.97) = 3.594 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.92 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.87) = 6.407 \cdot 10^{-5}, \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.72 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.7) = 1.078 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 2

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу та співвідношення сигнал/шум на вході приймача для швидкості 24 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$1.109 \cdot 10^{-7}$	$3.179 \cdot 10^{-7}$	$7.547 \cdot 10^{-7}$	$1.581 \cdot 10^{-6}$	$6.807 \cdot 10^{-6}$	$8.540 \cdot 10^{-6}$	$1.662 \cdot 10^{-5}$	$6.407 \cdot 10^{-5}$	$1.078 \cdot 10^{-4}$
Потужність сигналу, дБВт	-108.9	-109.2	-109.5	-109.9	-110.2	-110.6	-110.9	-111.2	-111.6
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13.34	12.38	11.63	10.85	9.44	9.24	8.61	7.86	7.33

Рис.2 Залежність співвідношення сигнал/шум від потужності сигналу на вході приймача для $R_2=24$ Мбіт/с

При швидкості передачі $R_3=40$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($P_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує якість прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} (Q(5.19)). По формулі (9) знаходимо значення $E_b = 5.36 \cdot 10^{-19}$ Джс.

Тривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/40 \cdot 10^6 \text{ біт/с} = 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}$.

Згідно формул (3) та (1) визначаємо $P_{c,max}$.

$$P_{c,max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Джс}}{0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 21.24 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -106.7 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-4} (Q(3.68)) [1].

$$P_{c,min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Джс}}{0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 10.8 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -109.6 \text{ дБ Вт}.$$

Визначаємо потужність сигналу на вході приймача.

$$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-106.7)} = 21.376 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-107)} = 19.952 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-107.3)} = 18.620 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-107.6)} = 17.378 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-108)} = 15.848 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-108.3)} = 14.791 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-108.6)} = 13.803 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-109)} = 12.589 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-109.3)} = 11.641 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-109.6)} = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c1} = P_{c.\max} = 21.367 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

$$P_{c10} = P_{c.\min} = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта, рівна

$$T_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{40 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_3 = 21.376 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_3 = 19.952 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_3 = 18.620 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.65 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_3 = 17.378 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.34 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_3 = 15.848 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_3 = 14.791 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_3 = 13.803 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.45 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_3 = 12.589 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.14 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_3 = 11.641 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.91 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_3 = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача.

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.46.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{4.98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.51.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{4.65 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.68.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{4.34 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.90.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{3.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.94.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{3.69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.27.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{3.45 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.66.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{3.14 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.88.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{2.91 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.31.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{3.46 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.78.$$

Розраховуємо ймовірність помилки:

$$P_{b1} = Q \left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.19 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}} \right) = Q(5.19) = 1.051 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b2} = Q \left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.93 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}} \right) = Q(5.0) = 2.867 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b3} = Q \left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.65 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}} \right) = Q(4.83) = 6.827 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b4} = Q \left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.34 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}} \right) = Q(5.67) = 1.506 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.96 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.46) = 4.098 \cdot 10^{-6}, \quad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.69 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.3) = 8.163 \cdot 10^{-6}.$$

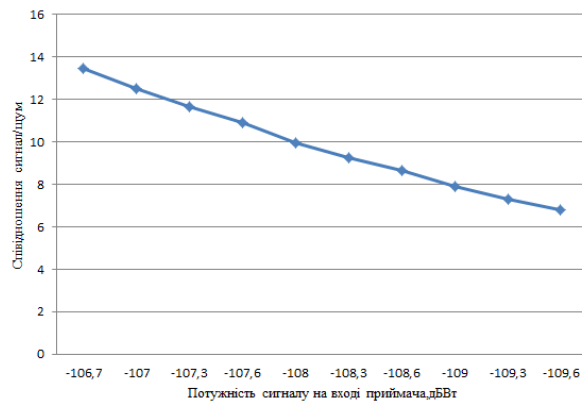
$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.45 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.16) = 1.591 \cdot 10^{-5}, \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.97) = 3.594 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.91 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.16) = 6.673 \cdot 10^{-5}, \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.68) = 1.166 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 3

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 40 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$1.051 \cdot 10^{-7}$	$2.867 \cdot 10^{-7}$	$6.827 \cdot 10^{-7}$	$1.506 \cdot 10^{-6}$	$4.098 \cdot 10^{-6}$	$8.163 \cdot 10^{-6}$	$1.591 \cdot 10^{-5}$	$3.594 \cdot 10^{-5}$	$6.673 \cdot 10^{-5}$
Потужність сигналу, дБВт	-106.7	-107	-107.3	-107.6	-108	-108.3	-108.6	-109	-109.3
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13.46	12.51	11.68	10.90	9.94	9.27	8.66	7.88	7.31

Рис. 3. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для $R_3=40$ Мбіт/с.

Таблиця 4

Залежність динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача від швидкості передачі інформації в межах ймовірності помилки $10^{-7} \dots 10^{-4}$

Швидкість передачі \ Потужність сигналу	$P_{c \max}$, дБ Вт	$P_{c \min}$, дБ Вт
8 Мбіт/с	-113.6	-116.6
24 Мбіт/с	-108.9	-111.9
40 Мбіт/с	-106.7	-109.6

Висновки

Досліджено вплив швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на вході приймача абонентської супутникової станції на ймовірність бітової помилки.

1. Для забезпечення ймовірності бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4} при шумовій температурі 290К динамічний діапазон зміни потужностей на вході приймача наземної станції VSAT повинен знаходитися в межах: від -113.6 до -116.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_1=8$ Мбіт/с;

від -108.9 до -111.9 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_2=24$ Мбіт/с; від -106.7 до -109.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_3=40$ Мбіт/с.

2. При збільшенні швидкості передачі цифрової інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT від 8 Мбіт/с до 40 Мбіт/с необхідно потужність сигналу на вході приймача підвищити в середньому в 5 разів (на 7дБ) для забезпечення заданої якості зв'язку (ймовірність бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4}).

3. Для визначення впливу швидкості цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку VSAT на ймовірність бітової помилки на вході приймача потребує подальшого дослідження підвищення співвідношення сигнал/шум з урахуванням випадання опадів, підвищення температури навколишнього середовища в місцях знаходження наземної станції VSAT.

Література

1. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами: учеб. пособ. /Сукачев Э.А. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.
2. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами: учеб. пособ./ Сукачев Э.А.: [2-е изд., испр. и доп.]. – Одесса: УГАС им. А.С. Попова, 2000. – 119 с.
3. Ратынский М.В. Основы сотовой связи/ Ратынский М.В. – М.: Радио и связь, 2000. – 248 с.
4. Системы мобильной связи: учеб. пособ. для вузов/ [Ипатов В.П., Орлов В.И., Самойлов И.М. и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 272 с.
5. Берлин А.Н. Сотовые системы связи: учеб. пособ./ Берлин А.Н. – М.: БИНОМ, 2009. – 360 с.
6. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра/ Феер К.; пер. с англ. под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами/ Варакин Л.Е. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

References

1. Sukachev E.A. Sotovyе seti radiosvyazi s podvizhnyimi obektami: ucheb. posob. /Sukachev E.A. – [3-e izd., pererab. i dopoln.]. – Odessa: ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 256 с.
2. Sukachev E.A. Sotovyе seti radiosvyazi s podvizhnyimi obektami: ucheb. posob./ Sukachev E.A.: [2-e izd., ispr. i dop.]. – Odessa: UGAS im. A.S. Popova, 2000. – 119 s.
3. Ratynskij M.V. Osnovy sotovoj svyazi/ Ratynskij M.V. – M.: Radio i svyaz, 2000. – 248 s.
4. Sistemy mobilnoj svyazi: ucheb. posob. dlya vuzov/ [Ipatov V.P., Orlov V.I., Samojlov I.M. i dr.]. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2003. – 272 s.
5. Berlin A.N. Sotovyе sistemy svyazi: ucheb. posob./ Berlin A.N. – M.: BINOM, 2009. – 360 s.
6. Feer K. Besprovodnaya cifrovaya svyaz. Metody modulyacii i rasshireniya spektra/ Feer K.; per. s angl. pod red. V.I. Zhuravleva. – M.: Radio i svyaz, 2000. – 520 s.
7. Varakin L.E. Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami/ Varakin L.E. – M.: Radio i svyaz, 1985. – 384 s.

Надійшла / Paper received : заповнюється редакцією

Надрукована/Printed : заповнюється редакцією

Рецензент – д.т.н., професор кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій ХНУ, Ю. М. Бойко

Додаток В. Q-ФУНКЦІЯ

Q-ФУНКЦІЯ

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

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2297	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.2275E-01	0.2222E-01	0.2169E-01	0.2118E-01	0.2068E-01	0.2018E-01	0.1970E-01	0.1923E-01	0.1876E-01	0.1831E-01
2.1	0.1786E-01	0.1743E-01	0.1700E-01	0.1659E-01	0.1618E-01	0.1578E-01	0.1539E-01	0.1500E-01	0.1463E-01	0.1426E-01
2.2	0.1390E-01	0.1355E-01	0.1321E-01	0.1287E-01	0.1255E-01	0.1222E-01	0.1191E-01	0.1160E-01	0.1130E-01	0.1101E-01
2.3	0.1072E-01	0.1044E-01	0.1017E-01	0.9903E-02	0.9642E-02	0.9387E-02	0.9137E-02	0.8894E-02	0.8656E-02	0.8424E-02

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
2.4	0.8198E-02	0.7976E-02	0.7760E-02	0.7549E-02	0.7344E-02	0.7143E-02	0.6947E-02	0.6756E-02	0.6569E-02	0.6387E-02
2.5	0.6210E-02	0.6037E-02	0.5868E-02	0.5703E-02	0.5543E-02	0.5386E-02	0.5234E-02	0.5085E-02	0.4940E-02	0.4799E-02
2.6	0.4661E-02	0.4527E-02	0.4396E-02	0.4269E-02	0.4145E-02	0.4025E-02	0.3907E-02	0.3793E-02	0.3681E-02	0.3573E-02
2.7	0.3467E-02	0.3364E-02	0.3264E-02	0.3167E-02	0.3072E-02	0.2980E-02	0.2890E-02	0.2803E-02	0.2718E-02	0.2635E-02
2.8	0.2555E-02	0.2477E-02	0.2401E-02	0.2327E-02	0.2256E-02	0.2186E-02	0.2118E-02	0.2052B-02	0.1988E-02	0.1926E-02
2.9	0.1866E-02	0.1807E-02	0.1750E-02	0.1695E-02	0.1641E-02	0.1589E-02	0.1538E-02	0.1489B-02	0.1441E-02	0.1395E-02
3.0	0.1350E-02	0.1306E-02	0.1264E-02	0.1223E-02	0.1183E-02	0.1144E-02	0.1107E-02	0.1070E-02	0.1035E-02	0.1001E-02
3.1	0.9676B-03	0.9354E-03	0.9043E-03	0.8740E-03	0.8447E-03	0.8164E-03	0.7888E-03	0.7622E-03	0.7364E-03	0.7114E-03
3.2	0.6871E-03	0.6637E-03	0.6410E-03	0.6190E-03	0.5977E-03	0.5770E-03	0.5571E-03	0.5377E-03	0.5190E-03	0.5009E-03
3.3	0.4834E-03	0.4665E-03	0.4501E-03	0.4342E-03	0.4189E-03	0.4041E-03	0.3897E-03	0.3758E-03	0.3624E-03	0.3495E-03
3.4	0.3369E-03	0.3248E-03	0.3131E-03	0.3018E-03	0.2909E-03	0.2803E-03	0.2701E-03	0.2602E-03	0.2507E-03	0.2415E-03
3.5	0.2326E-03	0.2241E-03	0.2158E-03	0.2078E-03	0.2001E-03	0.1926E-03	0.1854E-03	0.1785E-03	0.1718E-03	0.1653E-03
3.6	0.1591E-03	0.1531E-03	0.1473E-03	0.1417E-03	0.1363E-03	0.1311E-03	0.1261E-03	0.1213E-03	0.1166E-03	0.1121E-03
3.7	0.1078E-03	0.1036E-03	0.9961E-04	0.9574E-04	0.9201E-04	0.8842E-04	0.8496E-04	0.8162E-04	0.7841E-04	0.7532E-04
3.8	0.7235E-04	0.6948E-04	0.6673E-04	0.6407E-04	0.6152E-04	0.5906E-04	0.5669E-04	0.5442E-04	0.5223E-04	0.5012E-04
3.9	0.4810E-04	0.4615E-04	0.4427E-04	0.4247E-04	0.4074E-04	0.3908E-04	0.3748E-04	0.3594E-04	0.3446E-04	0.3304E-04
4.0	0.3167E-04	0.3036E-04	0.2910E-04	0.2789E-04	0.2673E-04	0.2561E-04	0.2454E-04	0.2351E-04	0.2252E-04	0.2157E-04
4.1	0.2066E-04	0.1978E-04	0.1894E-04	0.1814E-04	0.1737E-04	0.1662E-04	0.1591E-04	0.1523E-04	0.1458E-04	0.1395E-04
4.2	0.1335E-04	0.1277E-04	0.1222E-04	0.1168E-04	0.1118E-04	0.1069E-04	0.1022E-04	0.9774E-05	0.9345E-05	0.8934E-05
4.3	0.8540E-05	0.8163E-05	0.7802E-05	0.7456E-05	0.7124E-05	0.6807E-05	0.6503E-05	0.6212E-05	0.5934E-05	0.5668E-05
4.4	0.5413E-05	0.5169E-05	0.4935E-05	0.4712E-05	0.4498E-05	0.4294E-05	0.4098E-05	0.3911E-05	0.3732E-05	0.3561E-05
4.5	0.3398E-05	0.3241E-05	0.3092E-05	0.2949E-05	0.2813E-05	0.2682E-05	0.2558E-05	0.2439E-05	0.2325E-05	0.2216E-05
4.6	0.2112E-05	0.2013E-05	0.1919E-05	0.1828E-05	0.1742E-05	0.1660E-05	0.1581E-05	0.1506E-05	0.1434E-05	0.1366E-05
4.7	0.1301E-05	0.1239E-05	0.1179E-05	0.1123E-05	0.1069E-05	0.1017E-05	0.9680E-06	0.9211E-06	0.8765E-06	0.8339E-06
4.8	0.7933E-06	0.7547E-06	0.7178E-06	0.6827E-06	0.6492E-06	0.6173E-06	0.5869E-06	0.5580E-06	0.5304E-06	0.5042E-06
4.9	0.4792E-06	0.4554E-06	0.4327E-06	0.4112E-06	0.3906E-06	0.3711E-06	0.3525E-06	0.3348E-06	0.3179E-06	0.3019E-06
5.0	0.2867E-06	0.2722E-06	0.2584E-06	0.2452E-06	0.2328E-06	0.2209E-06	0.2096E-06	0.1989E-06	0.1887E-06	0.1790E-06
5.1	0.1698E-06	0.1611E-06	0.1528E-06	0.1449E-06	0.1374E-06	0.1302E-06	0.1235E-06	0.1170E-06	0.1109E-06	0.1051E-06
5.2	0.9964E-07	0.9442E-07	0.8946E-07	0.8475E-07	0.8029E-07	0.7605E-07	0.7203E-07	0.6821E-07	0.6459E-07	0.6116E-07
5.3	0.5790E-07	0.5481E-07	0.5188E-07	0.4911E-07	0.4647E-07	0.4398E-07	0.4161E-07	0.3937E-07	0.3724E-07	0.3523E-07
5.4	0.3332E-07	0.3151E-07	0.2980E-07	0.2818E-07	0.2664E-07	0.2518E-07	0.2381E-07	0.2250E-07	0.2127E-07	0.2010E-07

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
5.5	0.1899E-07	0.1794E-07	0.1695E-07	0.1601E-07	0.1512E-07	0.1428E-07	0.1349E-07	0.1274E-07	0.1203E-07	0.1135E-07
5.6	0.1072E-07	0.1012E-07	0.9548E-08	0.9011E-08	0.8503E-08	0.8022E-08	0.7569E-08	0.7140E-08	0.6735E-08	0.6352E-08
5.7	0.5990E-08	0.5649E-08	0.5326E-08	0.5022E-08	0.4734E-08	0.4462E-08	0.4206E-08	0.3964E-08	0.3735E-08	0.3519E-08
5.8	0.3316E-08	0.3124E-08	0.2942E-08	0.2771E-08	0.2610E-08	0.2458E-08	0.2314E-08	0.2179E-08	0.2051E-08	0.1931E-08
5.9	0.1818E-08	0.1711E-08	0.1610E-08	0.1515E-08	0.1425E-08	0.1341E-08	0.1261E-08	0.1186E-08	0.1116E-08	0.1049E-08
6.0	0.9866E-09	0.9276E-09	0.8721E-09	0.8198E-09	0.7706E-09	0.7242E-09	0.6806E-09	0.6396E-09	0.6009E-09	0.5646E-09
6.1	0.5303E-09	0.4982E-09	0.4679E-09	0.4394E-09	0.4126E-09	0.3874E-09	0.3637E-09	0.3415E-09	0.3205E-09	0.3008E-09
6.2	0.2823E-09	0.2649E-09	0.2486E-09	0.2332E-09	0.2188E-09	0.2052E-09	0.1925E-09	0.1805E-09	0.1693E-09	0.1587E-09
6.3	0.1488E-09	0.1395E-09	0.1308E-09	0.1226E-09	0.1149E-09	0.1077E-09	0.1009E-09	0.9451E-10	0.8854E-10	0.8294E-10
6.4	0.7769E-10	0.7276E-10	0.6814E-10	0.6380E-10	0.5974E-10	0.5593E-10	0.5235E-10	0.4900E-10	0.4586E-10	0.4292E-10
6.5	0.4016E-10	0.3758E-10	0.3515E-10	0.3289E-10	0.3076E-10	0.2877E-10	0.2690E-10	0.2516E-10	0.2352E-10	0.2199E-10
6.6	0.2056E-10	0.1922E-10	0.1796E-10	0.1678E-10	0.1568E-10	0.1465E-10	0.1369E-10	0.1279E-10	0.1195E-10	0.1116E-10
6.7	0.1042E-10	0.9731E-11	0.9086E-11	0.8483E-11	0.7919E-11	0.7392E-11	0.6900E-11	0.6439E-11	0.6009E-11	0.5607E-11
6.8	0.5231E-11	0.4880E-11	0.4552E-11	0.4246E-11	0.3960E-11	0.3693E-11	0.3443E-11	0.3210E-11	0.2993E-11	0.2790E-11
6.9	0.2600E-11	0.2423E-11	0.2258E-11	0.2104E-11	0.1961E-11	0.1826E-11	0.1701E-11	0.1585E-11	0.1476E-11	0.1374E-11
7.0	0.1280E-11	0.1192E-11	0.1109E-11	0.1033E-11	0.9612E-12	0.8946E-12	0.8325E-12	0.7747E-12	0.7208E-12	0.6706E-12
	$Q(x)$	x				$Q(x)$	x			
	1E-01	1.28115				1E-06	4.75342			
	1E-02	2.32635				1E-07	5.19934			
	1E-03	3.09023				1E-08	5.61200			
	1E-04	3.71902				1E-09	5.99781			
	1E-05	4.26489				1E-10	6.63134			

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 4.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 14%

ID: 98267 Назва: Магістерська кваліфікаційна робота Додано в БД: 2021-12-07 Автора: Канюка М.О. Керівники: Лужанський В.І. Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	17774	119	1374 (8%)	18 (15%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми



Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1009564586

Дата перевірки:
07.12.2021 09:50:51 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet

Дата звіту:
07.12.2021 09:51:12 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: **диплом готовий канюка**

Кількість сторінок: **100** Кількість слів: **6056** Кількість символів: **48465** Розмір файлу: **4.80 MB** ID файлу: **1009571941**

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

3.34% Схожість

Найбільша схожість: **1.96%** з Інтернет-джерелом (<http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/9738/1/%D0%A4%D>).

3.34% Джерела з Інтернету

25

Сторінка 102

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

24

Підозріле форматування

4

сторінки

АКТГ професору
Мартинюку В.В.

здобувача вищої освіти студента Канюки
Максима Олександровича, факультет
інформаційних технологій, 2 курс, ТРМ-20-1

ЗАЯВА

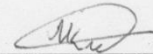
З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

30. 11. 2021

дата



підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ ПО КАФЕДРИ АКІТ
 ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: доповідь про ефективність засобів мережі
 Автор: Катюка М.О.
 Спеціальність: ІТТ телекомунікацій та радіотехніки
 Освітня програма: телекомунікацій та радіотехніки
 Науковий керівник: Лужанський В.В.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:
 науковий керівник Лужанський В.В.
 зав. кафедри АКІТ Мартинюк В.В.
7.12.2021

Дата

Підписи

Відгук

на дипломну роботу

«Дослідження ефективності застосування мережі VSAT в стільникових системах радіозв'язку»

студента Канюки Максима Олександровича

У дипломній роботі наведено теоретичне узагальнення методів підвищення ефективності застосування супутникової мережі зв'язку VSAT при одночасному забезпеченні заданої якості зв'язку.

Для вирішення сформульованих у дослідженні часткових завдань було використано комплекс взаємопов'язаних методів системного аналізу; теорії радіотехнічних сигналів і статистичного аналізу.

Під час праці над дипломною роботою Канюка М.О. виконав детальний аналіз вітчизняної, закордонної технічної літератури, що дозволило прийняти раціональні рішення під час виконання роботи.

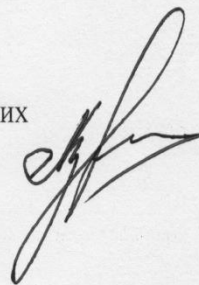
В пояснювальній записці технічно грамотно та достатньо повно обґрунтований вибір технічних рішень, проведені необхідні розрахунки та дослідження. Автор достатньо обґрунтував вибір предмету, об'єкту та мети дослідження.

Матеріали дипломної роботи мають практичну цінність і можуть бути використані при проектуванні та експлуатації супутникових мереж зв'язку VSAT.

Під час виконання роботи Канюка М.О. проявив креативність, ініціативність, старанність, наполегливість, здатність та вміння застосовувати набуті знання для вирішення складних завдань, обізнаність у сучасних системних та інформаційних технологіях.

Дипломна робота виконана у повному обсязі, відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки «відмінно», а її автору, Канюці Максиму Олександровичу, може бути присвоєна кваліфікація магістра телекомунікацій та радіотехніки.

Керівник дипломної роботи
кандидат військових наук,
доцент кафедри
автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих
технологій



Лужанський В.І.

«3» грудня 2021 р.

РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу

**«Дослідження ефективності застосування мережі VSAT в
стільникових системах радіозв'язку»**
студента Канюки Максима Олександровича

Дипломна робота та її зміст повністю відповідають завданню. Сформульовані мета, об'єкт та предмет дослідження свідчать про актуальність теми – є дослідження енергетичної ефективності цифрового супутникового каналу зв'язку в мережах VSAT при одночасному забезпеченні заданої якості зв'язку.

Дипломна робота виконана відповідно до перспективних планів наукової роботи кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій університету з тематики подальшого розвитку систем супутникового зв'язку.

Метою роботи є: дослідження енергетичної ефективності цифрового супутникового каналу зв'язку в мережах VSAT.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що автором надані науково-обгрунтовані рекомендації щодо підвищення ефективності роботи систем супутникового зв'язку в умовах дії завад при заданій якості обслуговування абонентів.

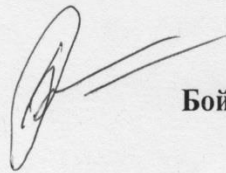
Результати дипломної роботи можуть бути використані при проектуванні мереж супутникового зв'язку VSAT. В цілому зміст роботи відповідає темі, вся інформація подана у роботі є достовірною. До недоліків роботи можна віднести деякі стилістичні помилки, які суттєво не впливають на її наукову-технічну цінність.

Робота викладена науковою мовою, логічно й послідовно. Пояснювальна записка відповідає стандартам до її оформлення.

Робота Канюки Максима Олександровича відповідає вимогам, які висуваються до дипломної роботи і може бути оцінена на оцінку «добре».

Рецензент:

доктор технічних наук, професор



Бойко Ю. М.

“5” 12 2021р.

ДОВІДКА № 12/1-1

Затверджує те, що стаття «**ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ПОТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ В МЕРЕЖАХ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ VSAT ПРИ ВІДПОВІДНИХ СПІВВІДНОШЕННЯХ СИГНАЛ/ШУМ НА ЙМОВІРНІСТЬ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ**» авторів **ЛУЖАНСЬКИЙ В.І., КАРПОВА Л.В., КАНЮКА М.О.** (Хмельницький національний університет) – прийнята до опублікування у науковому журналі "Вісник Хмельницького національного університету" № 5 за 2021 р., серія "Технічні науки", який включено до наукометричних баз (Index Copernicus, Google Scholar) та затверджений як фахове видання Постановою президії ВАК України від 28.12.2019 № 1643

Начальник відділу
інтелектуальної власності та трансферу технологій,
відповідальний секретар Вісника ХНУ



Ю. В. Кравчик

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ДИПЛОМНА РОБОТА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕРЕЖІ VSAT В
СТІЛЬНИКОВИХ СИСТЕМАХ РАДІОЗВ'ЯЗКУ**

Студент групи ТРм-20-1

Керівник роботи

кандидат військ. наук, доцент

Канюка Максим Олександрович

Лужанський Віктор Ігорович

- **Актуальність теми.** У процесі обміну цифровою інформацією між наземними станціями мережі VSAT та штучним супутником Землі, який знаходиться на геостаціонарній орбіті, заводська обстановка може постійно змінюватися.

Від оперативної енергетичної оцінки, величини відношення сигнал/шум, рівня потужності сигналу на вході приймача наземної станції, ймовірності бітових помилок в залежності від швидкості передачі цифрової інформації, температури навколишнього середовища, рівня опадів та інших факторів залежать якісні показники супутникової мережі VSAT.

У результаті вирішення зазначених наукових задач з'являється можливість оптимізувати елементи супутникової мережі VSAT вже на етапі її проектування, модернізації та розгортання.

Таким чином, тема дипломної роботи, у якій вирішуються такі науково-технічні задачі, є актуальною.

- **Мета і задачі дослідження.**
- Метою роботи є дослідження енергетичної ефективності цифрового супутникового каналу зв'язку в мережах VSAT. Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:
 - 1. Особливості технологій супутникових мереж VSAT;
 - 2. Дослідження послаблення сигналу в супутниковому зв'язку на базі мережі VSAT для 4 наземних станцій;
 - 3. Теоретичний розрахунок супутникової лінії наземна станція-космічна станція-наземна станція;
 - 4. Вплив швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на ймовірність бітової помилки при заданій потужності сигналу на вході приймача.

Об'єкт дослідження – процес прийому цифрового сигналу в супутникових каналах зв'язку мережі VSAT.

- **Предмет дослідження** – оцінка якості енергетичної ефективності цифрових сигналів супутникової лінії зв'язку в мережі VSAT.
- **Методи досліджень.** Для вирішення поставлених наукових завдань використовується математичний апарат теорії цифрової обробки сигналів, передачі та приймання сигналів.
- **Наукова новизна одержаних результатів:**
 - 1. Вперше проведена оцінка енергетичної ефективності цифрових сигналів супутникової лінії зв'язку мережі VSAT для 4-х наземних станцій, які знаходяться на території України
 - 2. Набув подальшого розвитку метод оцінки енергетичної якості сигналу супутникової лінії зв'язку мережі VSAT.
- **Практичне значення** одержаних результатів:
 - 1.Проведено аналіз енергетичної ефективності супутникового каналу зв'язку мережі VSAT для 4-х наземних станцій, які знаходяться на території України.
 - 2.Використана методика дозволяє оцінити енергетичну ефективність якості супутникового зв'язку мережі VSAT в заданих районах розміщення наземних станцій . Це дозволить оперативно вирішувати питання щодо удосконалення супутникової мережі VSAT.
 - 3.Сформульовані науково-обґрунтовані практичні рекомендації,щодо раціонального використання 3-х наземних станцій та центральної наземної станції мережі VSAT в різних умовах заводової обстановки.
- **Публікації.** Результати дипломної роботи магістра опубліковані в науковій статті у науковому журналі «Вісник хмельницького національного університету»,№6.2021

1. Особливості технологій мереж VSAT ((Very Small Aperture Terminal-мала супутникова наземна станція)

Супутникові цифрові канали систем зв'язку VSAT мають широкий діапазон і велику пропускну здатність, що дає можливість мати мережу високої якості з ймовірністю бітових помилок в межах не більше 10^{-6} при мінімальних витратах. Мережі VSAT мають низьку вартість, прості в технічному обслуговування і як правило, термінали VSAT не вимагають постійного технічного обслуговування. Системи VSAT забезпечують високу інформаційну безпеку з використанням ефективних алгоритмів криптозахисту переданих даних .

1.1 Топологія мережі VSAT



Рисунок 1 – Топологія мережі VSAT по типу «зірка»

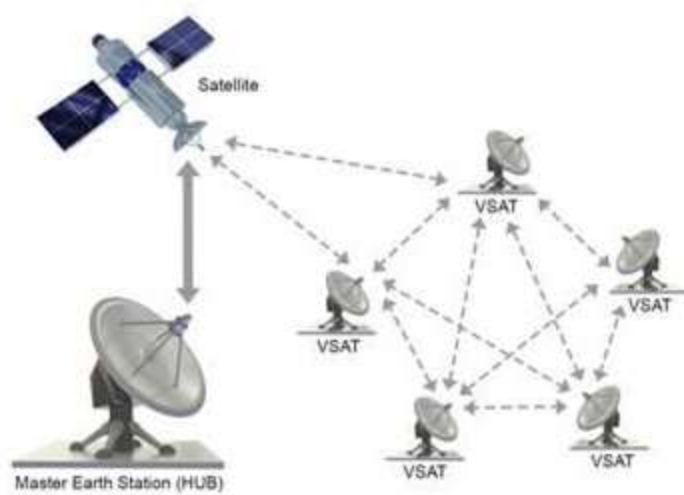


Рисунок 2 – Топологія мережі VSAT по типу «кожен з кожним» («mesh»)



- **Рисунок3– Супутниковий зв'язок VSAT для мереж GSM**

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛАБЛЕННЯ СИГНАЛУ В СУПУТНИКОВОМУ ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ VSAT

2.1 Послаблення сигналу в іоносфері

Затухання для двох робочих частот 11ГГц і 13ГГц в іоносфері визначається як :

$$L_I = \frac{2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-3}}{11^2} = \frac{0.002}{11^2} = 1.65 \cdot 10^5 \text{ дБ.}$$

$$L_I = \frac{2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-3}}{13^2} = \frac{0.002}{13^2} = 1,18 \cdot 10^{-5} \text{ дБ.}$$

2.2 Ослаблення супутникового сигналу для наземної станції VSAT м.Волочиськ

Поглинання сигналу в атмосфері м. Волочиськ, Хмельницька область .

Таблиця 1-Погодні дані м.Волочиськ

Погодні дані	Зима		Весна		Літо		Осінь	
	день	ніч	день	ніч	день	ніч	день	ніч
Т, температура, К	275	273	285	283	296	292	287	282
Р, тиск, кПа	98	97	97	96	97	97	98	98
Вологість повітря, г/м ³	1,42	0,37	3.9	3.5	8,4	7,3	4,1	3,3

Таблиця 2– Поглинання сигналу киснем і водяною парою при частоті 11ГГц, м.Волочиськ

Пора року	Час доби	L'к	L'в
Зима	День	0,00823	0,005
	Ніч	0,0823	0,0014
Весна	День	0,00732	0.013
	Ніч	0,00785	0,013
Літо	День	0,00659	0,023
	Ніч	0,00684	0,021
Осінь	День	0,00733	0,013
	Ніч	0,00769	0,012

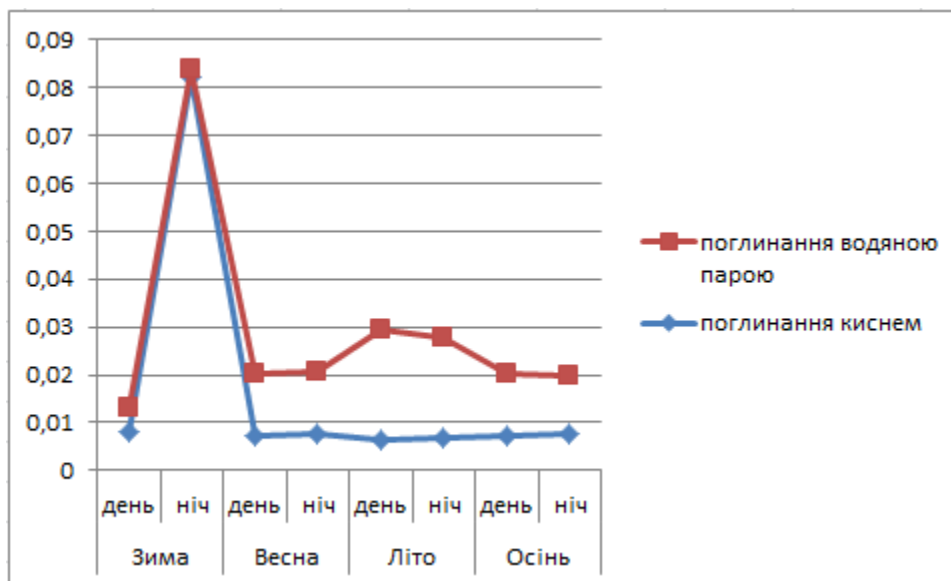


Рисунок 4-Поглинання киснем і водяною парою при частоті 11ГГц, м.Волочиськ

Таблиця 3 – Поглинання сигналу в спокійній атмосфері м.Волочиськ , дБ

Пора року	Час доби	11ГГц	13ГГц
Зима	День	0.207	0.267
	Ніч	0.18	0.204
Весна	День	0.16	0.354
	Ніч	0.171	0.338
Літо	День	0.153	0.492
	Ніч	0.156	0.474
Осінь	День	0.16	0.354
	Ніч	0.167	0.339

3 Розрахунок енергетичної супутникової лінії зв'язку наземна станція-космічна станція-наземна станція

3.1 Енергетичний розрахунок ділянки "вгору" супутникової лінії наземна станція(м.Волочиськ)-космічна станція

Кут місця $\varphi = 17^\circ$. Координати супутника 75° сх.д. Земна станція $49^\circ 32'$ пн.ш, $26^\circ 12'$ сх.д.

Розрахунок відстані від наземної стації до космічної стації

ξ - широта земної стації $\xi_{ЗС} = 49^\circ 32'$ пн.ш,

β - різниця по довготі між ЗС и КС; $\beta = 75^\circ - 26^\circ 8'$.

$$\cos \Psi = \cos \xi \cdot \cos \beta = \cos(49^\circ 32') \cdot \cos(48^\circ 8') = 0,4286.$$

$$d = 42644 \sqrt{1 - 0,2954 \cdot 0,4286} = 39853 \text{ км.}$$

Загасання сигналу у вільному просторі визначається за формулою:

$$L_{\Sigma} = L_0 + L_{\text{дод}}, \quad (1)$$

де L_0 – затухання сигналу на лінії наземна станція- штучний супутник Землі через сферичне розсіювання хвиль;

$L_{\text{дод}}$ – додаткові витрати, які визначаємо за формулою:

$$L_{\text{дод}} = L_a + L_g + L_n + L_p,$$

де L_a – поглинання в спокійній атмосфері,

L_g – втрати в гідрометеорах,

L_n – втрати через неточність наведення антени,

L_p – втрати через неузгодженість поляризації антени.

Коефіцієнт підсилення антени земної стації:

$$G_{ЗС} = \frac{10 \cdot g \cdot D_A^2}{\lambda^2}, \quad (2)$$

де $g = 0,6 \dots 0,8$ – коефіцієнт використання поверхні антени,

$D_A = 1,83 \text{ м}$ - діаметр антени ЗС,

λ – довжина хвилі, м,

сумарна потужність шумів на вході приймача :

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f, \quad (3)$$

де Δf – ефективна смуга частот ЗС (36 МГц),

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт/К} \cdot \text{Гц}$ - стала Больцмана,

T_{Σ} - сумарна шумова температура, К.

Визначасмо потужність передавача земної станції:

$$P_{\text{ПРД}}(\text{ЗС}) = \frac{L_{0\uparrow} \cdot L_{\text{ДОД}} \cdot k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{шЗС}} \cdot a \cdot \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}}\right)}{G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}}}, \quad (4)$$

- де $a = 6$ дБ (3,98 раз) - коефіцієнт запасу для лінії «вгору»,
- $\Delta f_{\text{ш}} = 36$ МГц. - ефективна смуга частот ЗС,
- $L_{\text{ДОД}} = 3.5$ дБ (2,24),
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/К · Гц - стала Больцмана,
- $G_{\text{ПРМ}} = 39$ дБ ($7,943 \cdot 10^3$),
- $G_{\text{ПРД}} = 47,69$ дБ ($0,379 \cdot 10^5$),
- $\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} = 12.88$ дБ.

Переведемо отримане значення в дБВт: $P_{\text{ПРД}} = 10 \log(30,49) = 14,84$ дБВт.

- Визначені потужності передавачів земних станцій, використовуючи вище зазначені формули:
- с.Суслівка(41.1Вт); с.Дібровськ(26.46Вт); центральна земна станція м.Київ(105.84Вт).

Розрахунок сумарної шумової температури приймального тракту космічної станції .

- Еквівалентна шумова температура приймача, що складається з антени, хвилеводного тракту та приймача:

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0 \cdot \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) + \frac{T_{\text{пр}}}{\eta}, \quad (5)$$

- де T_A - шумова температура антени КС - 60К;
- $T_0 = 290$ К;
- $\eta = 0,9$ (ККД АФТ КС).

$$T_{\text{пр}} = T_0 \cdot (K_{\text{ш}} - 1),$$

- де $K_{\text{ш}} = 2$ - коефіцієнт шуму приймача, K

$$T_{\Sigma} = \frac{1-0.9}{0.9} + \frac{290}{0.9} = 414.4\text{К}.$$

4 Вплив швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на ймовірність бітової помилки

Тривалість тактового інтервалу(тривалість одного біту)дорівнює

$$T = 1 / R. \quad (6)$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_b = P_c \cdot T \quad (7)$$

Потужність шумів на вході приймача можна визначити по формулі

$$P_{ш.пр} = n \cdot k \cdot \Delta f_{пр}, \quad (8)$$

де n – коефіцієнт шуму приймача k – стала Больцмана; T_0 – шумова температура в градусах Кельвіна; $\Delta f_{пр}$ – ширина смуги пропускання високочастотного тракту приймача.

Одностороння спектральна щільність потужності білого шуму може бути представлена як:

$$N_0 = n \cdot k \cdot T_0. \quad (9)$$

Відношення сигнал/шум на вході приймача знаходиться як:

$$E_b / N_0. \quad (10)$$

Ймовірність помилки розраховується:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right). \quad (11)$$

Таблиця 4 - Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 8 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$0.051 \cdot 10^{-7}$	$3.019 \cdot 10^{-7}$	$7.933 \cdot 10^{-7}$	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$4.498 \cdot 10^{-6}$	$9.774 \cdot 10^{-6}$	$3.908 \cdot 10^{-5}$	$7.532 \cdot 10^{-5}$	$1.121 \cdot 10^{-4}$
Потужність сигналу, дБВт	-113,6	-114	-114,3	-114,6	-115	-115,3	-115,7	-116	-116,3
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13,47	12,46	11,5	10,62	9,84	9,09	8,41	7,78	7,18

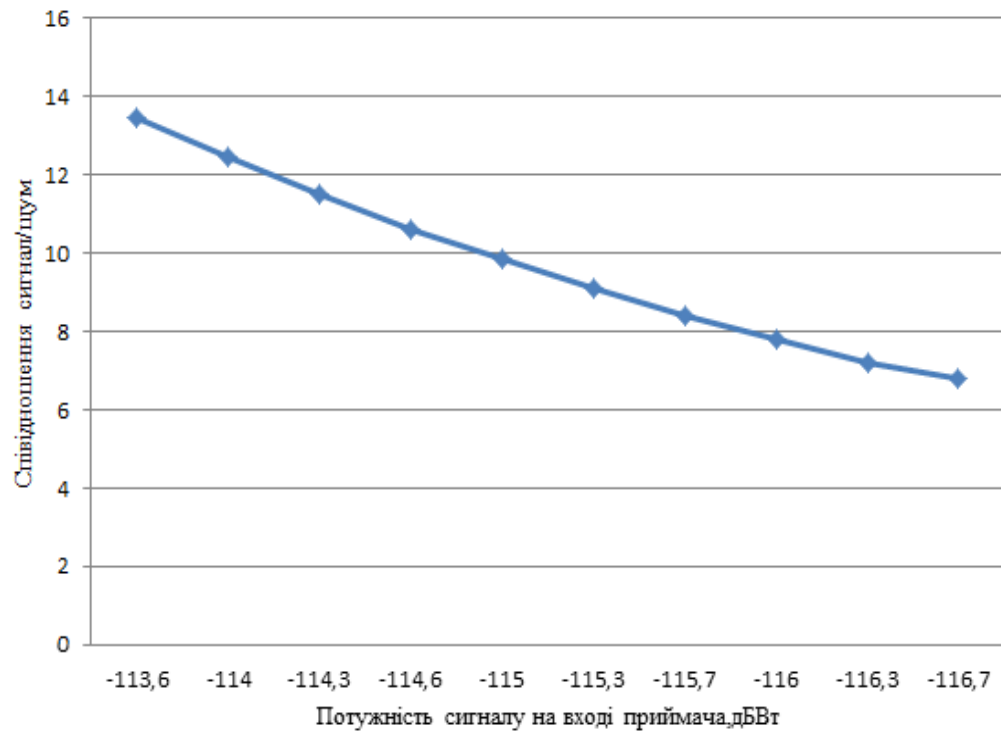


Рис 5-Залежність співвідношення сигнал/шум від потужності сигналу на вході приймача для $R_1=8$ Мбіт/с, $R_2=24$ Мбіт/с, $R_3=40$ Мбіт/с

- Таблиця 5-Залежність динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача від швидкості передачі інформації в межах ймовірності помилки $10^{-7} \dots 10^{-4}$

Потужність сигналу Швидкість передачі	$P_{с.мах}$, дБ Вт	$P_{с.мін}$, дБ Вт
8 Мбіт/с	-113.6	-116.6
24 Мбіт/с	-108.9	-111.9
40 Мбіт/с	-106.7	-109.6

**Залежність ймовірності бітової помилки від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношення сигнал/шум при заданій потужності сигналу на вході приймача земних станцій:
с.Сулівка;с.Дібровськ;м.Волочиськ;м.Київ.**

Таблиця 5 - Ймовірність бітової помилки в залежності від швидкості передачі інформації, шумової температури та відношенні сигнал/шум при потужності сигналу на вході приймача P_c max для міста Волочиськ

R, Мбіт/с	P_c max, дБВт	T_0 , К	E_b/N_0	E_b/N_0 , дБ	P_b
8	-113.6	290	13.47	11.3	$1.051 \cdot 10^{-7}$
		298	13.04	11.2	$1.611 \cdot 10^{-7}$
		307	12.67	11	$2.452 \cdot 10^{-7}$
16	-110.7	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		298	12.91	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		307	12.55	11	$2.722 \cdot 10^{-7}$
24	-108.9	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		298	12.91	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		307	12.55	11	$2.722 \cdot 10^{-7}$
32	-107.7	290	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
		298	12.91	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
		307	12.55	11	$2.722 \cdot 10^{-7}$
40	-106.7	290	13.47	11.3	$1.051 \cdot 10^{-7}$
		298	13.04	11.2	$1.611 \cdot 10^{-7}$
		307	12.67	11	$2.452 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 6 – Ймовірність бітової помилки в залежності від шумової температури, потужності сигналу на вході приймача та відношенні сигнал/шум при швидкості передачі інформації $R=24$ Мбіт/с для міста Волочиськ **14**

T, K	P_s , дБВт	E_b/N_0	E_b/N_0 , дБ	P_b
290	-108.9	13.34	11.3	$1.19 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	9.84	9.9	$4,498 \cdot 10^{-6}$
	-111.9	6.7	8,3	$1.261 \cdot 10^{-4}$
298	-108.9	12.91	11.1	$1.887 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	9.14	9.6	$9.345 \cdot 10^{-6}$
	-111.9	6.61	8.2	$1.363 \cdot 10^{-4}$
307	-108.9	12.55	11	$2.722 \cdot 10^{-7}$
	-110.2	8.88	9.4	$1.222 \cdot 10^{-5}$
	-111.9	6.43	8	$1.653 \cdot 10^{-4}$

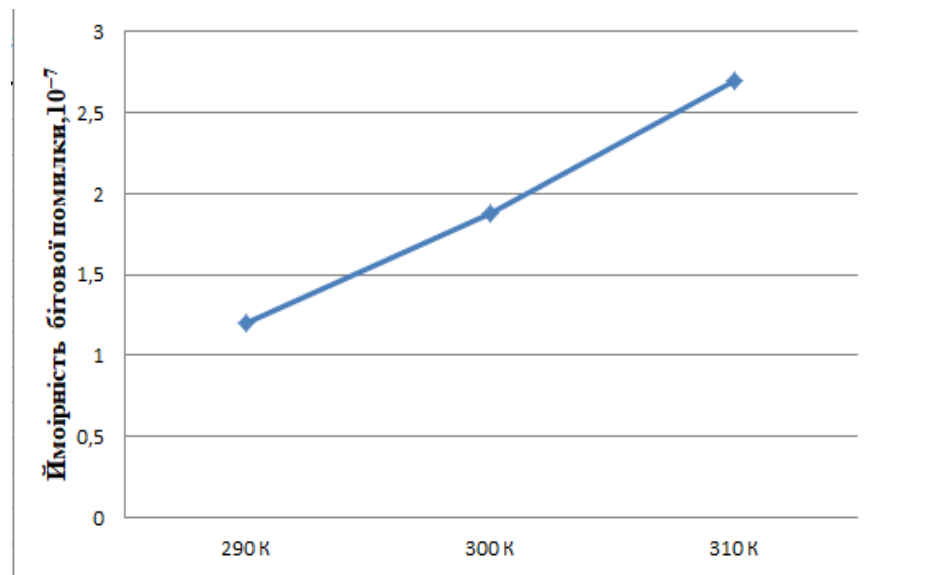


Рисунок 6-Залежність ймовірності бітової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -108.99дБВт, $R=24$ Мбіт/с для міста Волочиськ

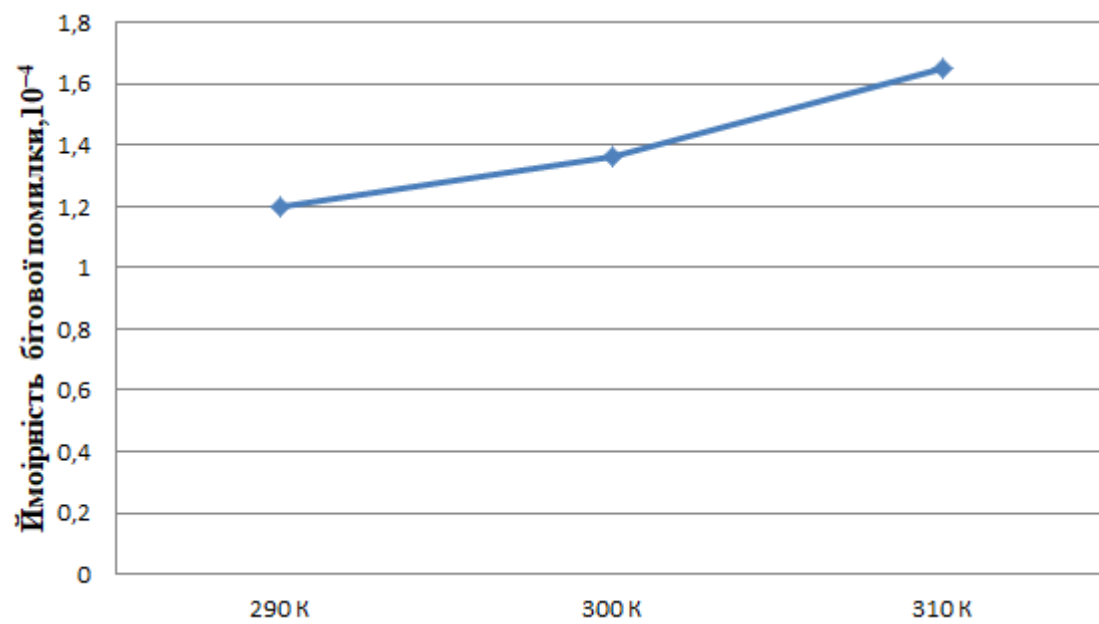


Рисунок 7-Залежність ймовірності біткової помилки від шумової температури при потужності сигналу на вході приймача -111.99дБВт, R=24 Мбіт/с для міста Волочиськ

• ВИСНОВКИ

- 1.Розраховані ослаблення сигналу в іоносфері, в спокійній атмосфері і опадах на території України в чотирьох населених пунктах (с.Суслівка;с.Дібровськ;м.Волочиськ;м.Київ) в залежно від пори року і часу доби, для виявлення найгіршого ослаблення сигналу з урахуванням отриманих даних. Ослаблення сигналу протягом року на ділянках ЗС - ШСЗ і ШСЗ – ЗС найбільше у с.Дібровськ (випадання опадів 19 мм/год,загасання сигналу 1.8дБ) а найменше у с.Суслівка (випадання опадів 16 мм/год загасання сигналу 1.3дБ).
- 2.Затухання для двох робочих частот 11ГГц і 13ГГц в іоносфері складає: $1.65 \cdot 10^{-5}$ дБ та $1.18 \cdot 10^{-5}$ дБ відповідно.
- 3.Ослаблення сигналу в спокійній атмосфері найбільше у с.Дібровськ(поглинання сигналу складає 0.6дБ) і найменше у м.Київ (поглинання складає 0.3).
- 4.Визначенні значення затухання сигналу на ділянках земна станція- космічна станція через сферичне розсіювання хвиль, поглинання в спокійній атмосфері, втрати через неузгодженість поляризації антен, втрати через неточність наведення антен та втрати в гідрометеорах для: с.Суслівка(209.7дБ);с.Дібровськ(209.6);м.Волочиськ(210.1дБ);центральна земна станція м.Київ(210.5дБ).
- 5.Проведені розрахунки щодо необхідних потужностей передавачів земних станцій: с.Суслівка,(41.1Вт); с.Дібровськ(26.46Вт); м. Волочиськ (30.49Вт); центральна земна станція м.Київ(104.84Вт). Еквівалентна шумова температура приймального тракту космічної станції ABS-2 з урахуванням шумової температури антени, шумової температури фідера та приймача складає:414.4К.
- 6.Для забезпечення ймовірності бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4} при шумовій температурі 290К динамічний діапазон зміни потужностей на вході приймача наземної станції VSAT повинен знаходитися в межах: від -113.6 до -116.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_1=8$ Мбіт/с; від -108.9 до -111.9 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_2=24$ Мбіт/с; від -106.7 до -109.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_3=40$ Мбіт/с.

- 7. При збільшенні швидкості передачі цифрової інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT від 8 Мбіт/с до 40 Мбіт/с необхідно потужність сигналу на вході приймача підвищити в середньому в 5 разів (на 7дБ) для забезпечення заданої якості зв'язку (ймовірність бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4}).
- 8. При швидкості передачі інформації $R = 24$ Мбіт/с при температурі шумів $T_0 = 290$ К, потужності сигналу на вході приймача $P_c = -108.9$ дБВт, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0 = 13.34$.
- 9. При потужності сигналу $p_c = -111.9$ дБВт і температурі шумів $T = 290$ К, швидкості передачі інформації $R = 24$ Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0 = 6.7$. При зменшенні потужності сигналу від -108.9 дБВт до -111.9 дБВт відношення сигнал/шум зменшиться на 50,2% і становитиме 6.7, а ймовірність бітової помилки P_b збільшиться з $1.19 \cdot 10^{-7}$ до $1.26 \cdot 10^{-4}$.
- 10. При температурі $T = 308$ К, потужності сигналу на вході приймача $P_c = -108.9$ дБВт, швидкості передачі інформації $R = 24$ Мбіт/с, відношення сигнал/шум складає $E_b/N_0 = 12.49$. При збільшенні температури шумів з 290 К до 308 К відношення сигнал/шум зменшиться на 6,4% і становитиме 12.49, а ймовірність бітової помилки P_b збільшиться з $1.19 \cdot 10^{-7}$ до $2.87 \cdot 10^{-7}$.