

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

**Кафедра комп'ютерної інженерії**

До захисту допущено:

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Юрій Бойко

« \_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

на тему:

**«МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ НА ІНФОРМАЦІЙНІ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ СУПУТНИКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ»**

**Виконав:**

студент 4-го курсу бакалаврату

денної форми навчання

спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

ОНП « \_\_\_\_\_ »

Таїсія-Валерія Капустенко \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

Доктор технічних наук, доцент

Сергій Ольшевський \_\_\_\_\_

**Рецензент:**

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі

немає запозичень з праць інших авторів без

відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_

Робота допущена до захисту в ЕК рішенням кафедри \_\_\_\_\_

від « \_ » \_\_\_\_\_ 2023 р., протокол № \_.

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_,

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Бойко Юрій Володимирович

(підпис)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить – 38 сторінок, 4 рисунки, 1 додаток, використано – 8 інформаційних джерел.

Об'єктом дослідження роботи є іоносферні збурення та їх вплив на передачу супутникових сигналів. Предметом роботи є можливість дізнаватись вплив що може завдати іоносферне явище завчасно.

Метою роботи є написання скрипту мовою R для обробки трьох різних масивів даних, що мають інформацію про вплив збурень на характеристики супутникового радіозв'язку.

Інструментарій реалізації – програмне забезпечення R 4.1.3, мова програмування R.

Результати роботи – розроблено та реалізовано програму, що моделює вплив іоносферних збурень на цифрові сигнали.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ .....	6
1.1 Поширення радіохвиль та характеристика іоносфери.....	6
1.1.1 Що таке іоносфера.....	7
1.2 Аналіз стану проблеми.....	10
1.2.1 Збурення іоносфери та їх вплив на передачу сигналів.....	10
1.2.2 Супутниковий зв'язок .....	14
1.2.3 Способи подолання шумів викликаних збуреннями.....	15
1.3 Запропонований підхід.....	17
РОЗДІЛ 2. АПРОБАЦІЯ МОДЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ.....	21
2.1 Моделювання поширення сигналів в стохастичних середовищах.....	21
2.1.1 Стохастичне середовище .....	21
2.1.2 Приймальна апертура.....	24
2.1.3 Процедура розрахунку.....	27
2.2 Моделювання.....	30
ВИСНОВКИ.....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	38
ДОДАТКИ.....	39

## ВСТУП

Наукове дослідження, описане в цій кваліфікаційній роботі, спрямоване на моделювання впливу різних іоносферних явищ, зокрема іоносферних збурень, на процес оброблення інформаційних сигналів у телекомунікаційних системах. В умовах наявності полярних сьйв або висотних ядерних вибухів, що супроводжуються інтенсивними завадами, стандартні методи зв'язку не забезпечують високої якості телекомунікаційних каналів. Однак, згідно з другою теоремою Шеннона, теоретично можливо створити цифрові сигнали, які забезпечать надійний зв'язок навіть у таких складних умовах.

З метою вивчення ефективних методів передачі даних у таких умовах, в цій роботі було розроблено імітаційну модель, яка дозволить аналізувати вплив полярних сьйв, висотних ядерних вибухів та інших іоносферних явищ на властивості сигналів в контрольованих лабораторних умовах. Це дозволить вивчати та оцінювати різні методи передачі даних без необхідності очікувати на наявність реальних полярних сьйв або проведення ядерних вибухів.

У рамках цього дослідження було використано програмування мовою R для створення моделі впливу завад на сигнали. Програмне забезпечення R надає широкі можливості для маніпуляції даними, візуалізації результатів та статистичного моделювання. Враховуючи інтенсивні завади, які впливають на оброблення сигналів, важливо детально вивчити всі можливі види збурень, що можуть виникнути в системі передачі даних. Аналіз отриманих даних і моделювання впливу різних збурень дозволять досягти мети цього дослідження і в майбутньому допомогти дослідникам в роботі з сигналами в умовах інтенсивних завад, пов'язаних з іоносферними збуреннями.

## РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Будь-яка система передачі сигналів складається з трьох основних частин: передавального пристрою, приймального пристрою та проміжної ланки - простору, в якому поширюються радіохвилі. При поширенні радіохвиль в середовищі відбуваються зміна амплітуди поля хвилі, зміна швидкості і напрямку поширення, поворот площини поляризації і спотворення переданих сигналів.

В атмосфері розрізняють три області, які надають вплив на поширення радіохвиль: тропосферу, стратосферу і іоносферу. Межі між цими областями виражені не різко і залежать від часу і географічного місця.

### 1.1 Поширення радіохвиль та характеристика іоносфери

Роль радіохвиль у забезпеченні надійного зв'язку на великій відстані неможливо переоцінити. У земних умовах радіохвилі широко використовуються для передачі інформації, і їх властивості залежать від різних факторів, таких як довжина хвилі, атмосферні шари та характеристики поверхні землі.

Атмосфера, яку ми поділяємо на тропосферу, стратосферу і іоносферу, впливає на поширення радіохвиль. Тропосфера і стратосфера впливають на ультракороткі хвилі, тоді як іоносфера впливає на хвилі всіх діапазонів через рух вільних зарядів, спричинений радіохвилями. Головною причиною іонізації атмосфери є випромінювання сонця, зокрема ультрафіолетові промені з довжиною хвилі менше 0,1 мкм. «Іонізація атмосфери викликається також потоком частинок (корпускул), що випускаються сонцем. Короткохвильові ультрафіолетові промені і корпускули не досягають тропосфери, і повітря в ній практично не іонізоване.»[1] Особливо помітна іонізація повітря в іоносфері на висотах більше 50-60 км.

Експерименти підтверджують наявність декількох шарів в іоносфері, які відбивають радіохвилі. Це призводить до багатопрореневості, коли радіохвилі можуть поширюватися декількома шляхами одночасно. Проте, це також призводить до завмирання сигналу через інтерференцію, коли електромагнітне поле стає сумою зміщених у часі радіохвиль. Завмирання може виникати через зміни параметрів середовища та багатопрореневість.

При передачі радіохвиль через антену в простір, вони розповсюджуються як енергія електромагнітного поля. Радіозв'язок може здійснюватися за допомогою поверхневих і просторових радіохвиль (рис.1). Поверхневі хвилі огинають поверхню землі, дифрагуючи навколо перешкод, що залежить від співвідношення між довжиною хвилі і розмірами перешкод. Хоча всі радіохвилі мають однакову природу, їх здатність до розповсюдження значно залежить від довжини хвилі. На низьких частотах хвилі можуть огинати перешкоди і дифрагувати більше, що забезпечує більшу дальність розповсюдження поверхневих хвиль. Але для коротких хвиль, які використовуються в радіозв'язку, дифракція менш виразна. Проходячи над поверхнею землі, радіохвилі поступово слабшають через взаємодію з електрострумом, який порушується в поверхні землі. Ця взаємодія призводить до поглинання енергії хвилею землею, особливо при вищих частотах.



Рис.1 Розповсюдження просторової та поверхневої хвиль. [1]

Просторові ж хвилі, що можуть мати довжину більше 10 метрів, розповсюджуються навколо земної кулі на великі відстані, завдяки одноразовому та багаторазовому відбиттю від іоносфери.

Розуміння цих факторів дозволяє розробляти ефективні системи зв'язку та уникати деяких проблем. Радіозв'язок стає можливим завдяки розумінню природи радіохвиль і їх взаємодії з оточуючим середовищем.

### **1.1.1 Що таке іоносфера**

Іоносфера — це область верхніх шарів атмосфери Землі, яка простягається приблизно від 60 км до 1000 км над поверхнею, де існує значна кількість вільних електронів та іонів. Іонізацію викликають високоенергетичні ультрафіолетові та рентгенівські фотони випромінювані Сонцем, під впливом яких відбувається іонізація нейтральних атомів та молекул у верхніх шарах атмосфери, в результаті з'являються вільні електрони та позитивно заряджені іони. Також на іонізацію впливають висипання високоенергетичних частинок із радіаційного поясу Землі.

Іоносфера характеризується складною та динамічною структурою, яка змінюється залежно від часу, місця розташування планети та сонячної активності. Нічна іонізація підтримується за рахунок розсіяного сонячного випромінювання, потоків частинок із магнітосфери та плазми з магнітосфери. Сфера розділена на кілька шарів, кожен зі своїми відмінними властивостями та характеристиками іонізації. Ионосфера напряду впливає на поширення радіохвиль і функціонуванні систем супутникового зв'язку та навігації. Вона може заломлювати, відбивати та поглинати радіохвилі, а її властивості впливають на якість і надійність радіопередач. Однак іоносферні збурення можуть мати значний вплив на продуктивність цих систем. Різні іоносферні збурення мають вплив різного характеру на функціонування супутникових прийому та передачі інформації.

Іоносфера, складаючись з трьох шарів - D, E та F, відрізняється за густиною іонів і має різні характеристики. Кожен з цих шарів впливає на поширення радіохвиль і комунікаційні системи.

Шар D розташований на висоті від 60 до 90 кілометрів і характеризується низькою концентрацією заряджених частинок, що становить  $N_{\max} \sim 10^2 - 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Це слабо іонізований шар, і його іонізація зменшується значно вночі.

Шар E розташований на висоті від 90 до 120 кілометрів і має високу густину плазми до  $N_{\max} \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Він поділяється на регулярний шар E та нерегулярний спорадичний шар E. У регулярному шарі E відбувається зростання концентрації електронів протягом дня завдяки сонячному короткохвильовому випромінюванню. Проте вночі густина іонів може впасти до  $10^3 \text{ см}^{-3}$  через швидку рекомбінацію іонів. Дифузія зарядів з шару F, що знаходиться вище, запобігає цьому процесу.

На висотах 100-120 кілометрів майже завжди спостерігається тонкий, але щільний спорадичний підшар ES. Його особливістю є висока концентрація електронів ( $n_e \geq 10^5 \text{ см}^{-3}$ ), що має значний вплив на поширення середніх і коротких радіохвиль, які відбиваються від цього шару іоносфери. Шар E, завдяки своїй високій концентрації вільних носіїв заряду, відіграє важливу роль у поширенні середніх і коротких хвиль і часто називається "шаром Кеннеллі-Гевісайд".

Шар F включає всю іоносферу вище 130-140 кілометрів. Максимальне утворення іонів спостерігається на висотах 150-200 кілометрів. За рахунок дифузії та тривалого життя іонів, плазма в шарі F поширюється вгору та вниз від ділянки максимуму. Найбільша концентрація електронів і іонів у шарі F спостерігається на висотах 250-400 кілометрів, через що можна простежити наявну залежність температури газу і концентрації вільних електронів від висоти (рис.2).

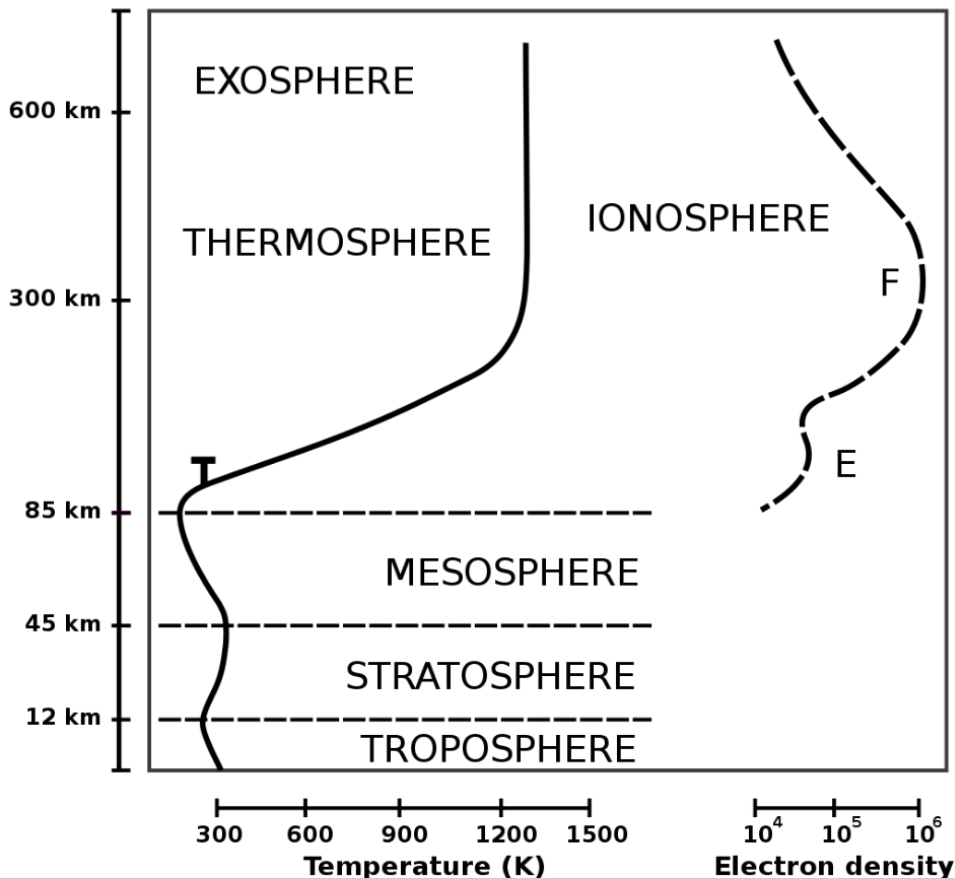


Рис 2. Залежність температури газу і концентрації вільних електронів від висоти.[2]

У денний час виникає "сходінка" в розподілі електронної концентрації в шарі F1 (150-200 кілометрів), що викликана сонячним ультрафіолетовим випромінюванням. Цей шар впливає на поширення коротких радіохвиль.

Вищу частину шару F називають шаром F2, де густина заряджених частинок досягає максимуму ( $N \sim 10^5-10^6 \text{ см}^{-3}$ ). На великих висотах переважають легші іони кисню до висоти 400-1000 кілометрів, а ще вище зустрічаються іони водню та атоми гелію у невеликих кількостях.

Особливістю шару F є його здатність відбивати радіохвилі в діапазоні коротких хвиль з частотами від декількох мегагерц до 10 МГц, що сприяє передачі радіосигналів на великі відстані.

Незважаючи на залежність іонного складу шару F від сонячної активності, його здатність відбивати електромагнітні хвилі з частотою менше 10 МГц є стабільною.

Іоносфера та її шари відіграють важливу роль у забезпеченні радіозв'язку та поширенні радіохвиль на різних висотах. Розуміння їх характеристик та властивостей є важливим для розвитку комунікаційних систем і передачі сигналів на великі відстані.

## **1.2 Аналіз стану проблеми**

### **1.2.1 Збурення іоносфери та їх вплив на передачу сигналів**

Одним із найпоширеніших іоносферних збурень є іоносферна сцинтиляція. Сцинтиляція спричинена нерегулярністю електронної густини іоносфери, що призводить до коливань фази та амплітуди радіохвиль, що проходять крізь неї. Ці коливання створюють перешкоди супутниковим сигналам, що можуть призвести до втрати фіксації, поганої якості сигналу та навіть повної втрати сигналу. Це може бути особливо проблематично для систем GPS, які покладаються на інформацію про точний час і фазу для визначення положення приймача.

Іоносферна сцинтиляція викликає коливання амплітуди, фази та частоти сигналів, отриманих приймачем GPS. Одним із основних впливів сцинтиляції на прийом супутника GPS є погіршення співвідношення сигнал-шум (SNR – signal-to-noise ratio). SNR є мірою потужності сигналу GPS відносно фонового шуму. Коли виникає іоносферна сцинтиляція, SNR може значно знизитися, що призведе до втрати фіксації сигналу та збільшення часу, необхідного приймачу GPS для отримання та відстеження сигналу. Це може спричинити помилки в даних

геопозиції і часу та призвести до втрати покриття в областях із високою сцинтиляційною активністю.

Іншим впливом іоносферної сцинтиляції на прийом супутника GPS є поява фазових і частотних помилок у сигналах GPS. Помилки, внесені іоносферною сцинтиляцією, можуть змінюватися залежно від часу, місця та частоти, що ускладнює виправлення цих помилок і забезпечення точного позиціонування та часу.

Окрім вищезазначених впливів також виникають багатопроменеві помилки в сигналах. Коли виникає іоносферна сцинтиляція, відбиті сигнали можуть бути ще більше спотворені, коли сигнали GPS відбиваються від поверхонь, таких як будівлі, дерева та місцевість, і заважають прямому сигналу від супутника, що спричиняють помилки багатопроменевого поширення. Для пом'якшення впливу іоносферної сцинтиляції на прийом GPS-супутників було розроблено кілька методів, включаючи алгоритми обробки сигналів, двочастотні GPS-приймачі та наземні системи моніторингу іоносфери.

У статті [3] зі списку використаних джерел досліджується використання даних GPS для вивчення танення льодовиків у Гренландії, на спостереження за якими впливають проблеми з обробкою даних через збурення іоносфери. Автори ідентифікують раптові збурення в іоносфері, які відбуваються над льодовиком Хельхайм, і використовують спеціальне приладдя для аналізу цих збурень. Автори відзначають, що на щільність електронів в іоносфері в основному впливає сонце, і вона демонструє добові та сезонні коливання. Вони посилаються на попередні дослідження, які вказують на те, що збурення іоносфери часто відбуваються у високоширотних регіонах і що ці збурення часто корелюють з геомагнітними коливаннями та сонячною активністю. В ділянках полярної шапки та в ділянках каспа, де щільність електронів значно змінюється, що за припущенням авторів є

основною причиною швидких змін інформаційних сигналів GPS. Загалом стаття підкреслює важливість розуміння та врахування збурень іоносфери при використанні даних GPS для вивчення руху льодовиків та інших геофізичних явищ.

Ще одним іоносферним збуренням є іоносферні бурі. Іоносферні бурі виникають, коли раптове збільшення сонячної активності викликає збурення в магнітосфері Землі, що призводить до швидкого збільшення електронної густини в іоносфері. Це може призвести до значного приросту загальної густини електронів (TEC) іоносфери, що впливає на поширення радіохвиль. Протягом активної іоносферної бурі TEC може зрости до такої міри, що супутникові сигнали можуть повністю заблокуватися або заломитися.

Геомагнітні бурі є ще одним типом іоносферних збурень, які можуть вплинути на прийом супутників. Причини геомагнітних бурь схожі на причини іоносферних, а наслідки можуть включати в себе сцинтиляцію та підвищення TEC. Також до причин виникнення геомагнітних бурь часто відноситься вплив електричних струмів, що протікають поверхнею Землі, що може спричинити перебої з електроенергією та пошкодження електричної інфраструктури.

На останок, спорадичні E-шари — плями підвищеної електронної щільності в іоносфері, які виникають нерегулярно та непередбачувано – також є завадою для передачі супутникових сигналів. Ці плями можуть відбивати радіохвилі, що призводить до багатопроменевого поширення сигналу та значних перешкод передачі інформації.

Не складно зрозуміти, наскільки іоносфера є критично важливим компонентом систем супутникового зв'язку та навігації. Однак іоносферні збурення мають значний вплив на продуктивність цих систем. Іоносферна сцинтиляція, іоносферні бурі, геомагнітні бурі та спорадичні E-шари є прикладами

іоносферних збурень, які можуть заважати повноцінній передачі супутникових сигналів. Важливо розуміти ці перешкоди для правильної обробки даних отриманих з різних супутників.

Перш ніж перейти до розгляду наступної статті що стосується збурень у іоносфері треба зазначити що таке авроральний електрострум. Це явище безпосередньо пов'язаний з іншим збуренням іоносфери, відомим як полярне сьайво. Полярне сьайво спричинене зарядженими частинками від Сонця, головним чином електронами та протонами, які прискорюються магнітним полем Землі до полярних областей. Ці частинки стикаються з атомами та молекулами у верхніх шарах атмосфери, збуджуючи їх і змушуючи випромінювати світло.

В той же час авроральний електрострум — це система струмів, яка тече в іоносфері паралельно магнітним силовим лініям Землі. Ця система струмів спричинена взаємодією магнітного поля Землі з потоком заряджених частинок, що тече від Сонця — сонячним вітром. Коли сонячний вітер взаємодіє з магнітним полем Землі, він змушує силові лінії магнітного поля вібрувати, що, у свою чергу, створює електричні струми в іоносфері. Ці струми течуть на схід і на захід навколо полярних регіонів. Вплив збурень спричинених цими струмами збільшується під час геомагнітних бурь.

За створення магнітних збурень, які спостерігаються у авроральному овалі під час полярних явищ відповідає авроральний електрострум. Ці перешкоди можуть спричинити перебої в електропостачанні та інші збої в системі зв'язку та навігації.

Підсумовуючи, авроральний електрострум — це система струмів в іоносфері, які виникають в полярному овалі, і є причиною магнітних збурень, що спостерігаються на землі під час полярних сьайв.

[4] У шарі іоносфери також присутні хвилеподібні коливання, які називаються TID (Traveling Ionospheric Disturbance), відбуваються як у середньому, так і у великому масштабі. Великомасштабні TID (LSTID) можуть мати горизонтальну довжину хвилі від 1000 до 4000 км і тривати від 1 до 3 годин. Зазвичай вони генеруються в авроральному електрострумі та поширюються до екватора. Середньомасштабні TID (MSTID) мають горизонтальні довжини хвиль у кілька сотень кілометрів, тривають від 15 до 60 хвилин і поширюються в різних напрямках залежно від часу доби та пори року. TID можуть викликати помилки в системах навігації та позиціонування як для цивільних, так і для військових застосувань, тому моніторинг і виявлення TID є надзвичайно важливими.

### **1.2.2 Супутниковий зв'язок**

Супутниковий прийом радіохвиль - це складний процес, що включає в себе передачу і прийом електромагнітних хвиль між супутником на орбіті Землі і наземними приймачами. Генерація радіохвилі здійснюється перетворенням електричної енергії в електромагнітні хвилі різними пристроями. Ці хвилі поширюються в просторі і приймаються антенами, призначеними для їхнього вловлювання. Антена перетворює електромагнітні хвилі в електричний сигнал, який потім надсилається до приймача. Приймач обробляє сигнал і робить його доступним для використання кінцевим користувачем. Процес роботи супутників називається ретрансляцією. На прийом супутникового сигналу впливають різні фактори, включаючи вищезазначені іоносферні збурення, а також перешкоди від інших джерел. Для подолання деяких з цих проблем у системах супутникового зв'язку застосовуються різні технології: використання декількох антен, стрибкоподібна зміна частоти та інші.

Антени, які є невід'ємним компонентом системи супутникового зв'язку, відіграють вирішальну роль в обробці отриманих радіохвильових даних. Процес включає в себе збір переданого сигналу зв'язку з приймального модуля антени та фільтрацію шляхом видалення будь-якого шуму або перешкод, які могли виникнути під час передачі, посилення та перетворення його в цифрові дані.

Форма тарілки антени допомагає сфокусувати радіохвилі в одній точці і спрямувати їх до приймального модуля. Тарілка антени зазвичай виготовляється з металу, а її розмір і форма залежать від частоти радіохвиль, які вона має приймати або передавати.

### **1.2.3 Способи подолання шумів викликаних збуреннями**

У подоланні збоїв і шумів, що виникають у супутникових сигналах, використовуються різноманітні методи. Одним з них є кодування і корекція помилок, яке використовує спеціальні коди для виявлення та виправлення помилок у передачі даних. Застосування кодів Хеммінга або Рід-Соломона є поширеним у супутникових комунікаціях з метою корекції помилок.

Метод множинного приймання (diversity reception) також використовується для зниження впливу шуму та збоїв на сигнал. Цей підхід полягає в одночасному прийманні сигналів з різних антен або різних супутників з метою поліпшення якості сигналу та зниження впливу шуму.

Фільтрація сигналу є ще одним способом подолання збоїв і шумів. Вона дозволяє виділити корисний сигнал із суміші сигналів та шуму за допомогою аналогових або цифрових фільтрів, які приглушують шуми та спотворення.

Часова і частотна компенсація є важливими методами у супутникових системах, оскільки шум та збої можуть впливати на точність синхронізації часу та

частоти. Використання цих методів дозволяє скоригувати зсуви і забезпечити правильну синхронізацію.

Деякі модуляційні схеми, такі як QPSK або QAM, здатні працювати з високою залежністю від фази. Це робить їх більш стійкими до шуму та збоїв, оскільки навіть невеликі зміни фази можуть суттєво змінити сигнал. Тому такі схеми використовуються для підвищення стійкості супутникових сигналів.

Додатковим способом є використання передаточних функцій зі змінними розмірами символів. При передачі слабого сигналу використовуються більші символи, що дозволяє знизити вплив шуму. З іншого боку, при передачі сильного сигналу використовуються менші символи для збільшення пропускної здатності системи.

Застосування цих методів дозволяє покращити якість супутникових сигналів, забезпечити надійну передачу даних та знизити вплив шуму та збоїв на комунікацію. Ці методи представляють лише декілька з багатьох способів подолання збоїв та шумів у супутникових сигналах. Зазвичай комбінація декількох методів використовується для досягнення найкращих результатів залежно від конкретних вимог та обмежень системи.

Друга теорема Шеннона, також відома як теорема зв'язку каналу і шуму, є однією з фундаментальних теорем теорії інформації. Вона встановлює максимальну пропускну здатність (кількість інформації, яку можна передати через канал) для каналу з певним рівнем шуму.

Конкретно ця теорема Шеннона стверджує, що існує верхня межа (максимальна пропускну здатність) для швидкості передачі інформації через канал з відомим рівнем шуму. Ця межа, виражена в бітах на секунду, залежить від пропускної здатності каналу і відношення сигнал-шум (SNR) в цьому каналі. Чим вище SNR, тим більше інформації може бути передано за одиницю часу. Також

теорема демонструє, що існує оптимальний спосіб передачі інформації через канал, який називається каналом зв'язку зі складністю. Цей спосіб передачі дозволяє наблизитися до максимальної пропускної здатності каналу, незважаючи на наявний шум.

Ця теорема має велике значення в телекомунікаційних системах, де важливо максимізувати пропускну здатність каналу і забезпечити якісну передачу інформації при наявності шуму. Вона надає теоретичну основу для розробки ефективних кодування і модуляції, а також для вдосконалення технологій зв'язку, що дозволяють передавати більше інформації через обмежені канали.

### **1.3 Запропонований підхід**

Для того щоб правильно виконувати обробку отриманих сигналів що пройшли крізь іоносферу та були спотворені збуреннями, потрібно враховувати як саме вищевказані стохастичні середовища впливають на сигнали. Аби аналізувати вплив полярних сьйв, висотних ядерних вибухів та інших іоносферних явищ на властивості сигналів в контрольованих лабораторних умовах необхідно розробити імітаційну модель, що дозволить вивчати та оцінювати різні впливи на передачу даних без необхідності очікувати на наявність реальних іоносферних явищ або проведення імітації їх дії в лабораторії. Для цього необхідно зібрати теоретичні дані про можливі іоносферні збурення та написати програму, що виконуватиме моделювання таких подій для подальшого вирішення існуючої проблеми.

Моделювання поширення сигналів вимагає врахування кількох принципів. По-перше, необхідно враховувати фізичні характеристики середовища, через яке сигнал поширюється, такі як електромагнітні властивості, розподіл параметрів та наявність перешкод. Далі, моделювання базується на використанні математичних моделей, які відображають фізичні закони, що впливають на поширення сигналів.

У моделі також необхідно враховувати параметри самого сигналу, такі як амплітуда, частота, фаза і модуляція, оскільки вони впливають на характеристики сигналу під час поширення.

Часто для моделювання використовуються чисельні методи, такі як метод скінченних елементів, метод скінченних різниць або метод Монте-Карло, що дозволяють отримати наближений розв'язок. Після створення моделей необхідно провести їх валідацію і верифікацію, порівнюючи результати моделювання з експериментальними даними або теоретичними сподіваннями.

У моделі також варто враховувати умови поширення сигналу, такі як відстань, наявність перешкод, шум, розподіл сигналу в просторі та атмосферні умови. Ці умови можуть суттєво впливати на поширення сигналу і повинні бути враховані в моделі.

Для написання програми що моделюватиме вплив іоносферних явищ на поширення сигналів, було обрано середовище R, що використовує однойменну мову програмування. R — це популярна мова програмування з відкритим кодом, яка широко використовується для статистичних обчислень і графіки. Це потужний інструмент для аналізу даних, візуалізації даних і статистичного моделювання. Мова програмування R була вперше розроблена на початку 1990-х і відтоді набула популярності серед статистиків, аналітиків даних і дослідників по всьому світу.

Мова програмування R є розширюваною та має чималу колекцію пакетів, створених користувачами для різних цілей. R також добре сумісна у взаємодії з іншими мовами програмування, для прикладу такими як Python, C++ і Java. Популярність R можна пояснити її здатністю обробляти великі масиви даних, створювати високоякісні візуалізації даних і виконувати глибокий статистичний аналіз, що є корисним для проведення аналізу даних, перевірки гіпотез та прогнозного моделювання.

Мова R знайшла своє застосування в різних галузях, включаючи такі як фінанси, охорона здоров'я, генетика, соціальні науки та багато інших. Гнучкість і універсальність мови зробили її незамінним інструментом для професіоналів, які займаються різноманітними науковими дослідженнями, тож вона є чудовим інструментом для реалізації поставленої задачі з моделюванням впливу збурень на сигнали.

Таким чином основною метою цієї роботи є створення імітаційної моделі, яка дозволить досліджувати вплив іоносферних явищ на інформаційні характеристики кодово-імпульсних послідовностей. Для досягнення цієї мети, необхідно виконати наступні завдання:

1. Розробити математичну модель, яка враховуватиме вплив стохастичного середовища на властивості імпульсно-маніпульованого сигналу. Ця модель дозволить аналізувати зміни в сигналі, спричинені впливом стохастичного середовища.
2. Створити імітаційну модель, яка буде відтворювати формування фазових впливів динамічного об'єму зі стохастичним просторовим розподілом параметрів на широкосмугові сигнали. Ця модель дозволить досліджувати взаємозв'язок між фазовими впливами та характеристиками сигналу.
3. Провести верифікацію і валідацію розробленої моделі на основі тестування на стандартних тестових сигналах. Цей крок дозволить перевірити правильність роботи моделі і підтвердити її достовірність.

Виконання цих завдань сприятиме розумінню впливу іоносферних явищ на кодово-імпульсні послідовності та як результат матиме програму що зможе допомогти в моделюванні впливів в лабораторних умовах та розробці ефективних методів для компенсації цього впливу у телекомунікаційних системах.

## РОЗДІЛ 2. АПРОБАЦІЯ МОДЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

### 2.1 Моделювання поширення сигналів в стохастичних середовищах

#### 2.1.1 Стохастичне середовище

За модель стохастичного середовища править тривимірний масив розмірністю  $[M, N, L]$ , де  $M=N=100000$  а  $L=100$ . На платформі R це об'єкт `array(..., c(M,N,L))`. В кожен елемент масиву є елементарним об'ємом середовища. В ньому зберігається значення концентрації іоносферної плазми.

Необхідно написати функцію, яка буде повертати ФЧХ (фазово-частотну характеристику) елемента іоносферної плазми з концентрацією  $n_e$ . Фазовочастотна характеристику розраховують як фазову затримку кожної гармонічної компоненти сигналу в часі, обернено пропорційну показнику заломлення електромагнітної хвилі в плазмі:

$$n = \sqrt{1 - \frac{4\pi n_e e^2}{m_e \omega^2}}$$

де  $\omega$  – частота гармоніки,  $m_e$  – маса електрона.

Ця функція отримує тривимірний масив `array` з розмірністю  $[M, N, L]$  і значенням концентрації іоносферної плазми  $n_e$ . Вона обчислює фазово-частотну характеристику для кожного елемента масиву, шукаючи значення концентрації, яке відповідає заданій концентрації  $n_e$ . Для цього обчислюється фазова затримка кожної гармонічної компоненти сигналу в часі, обернено пропорційна показнику заломлення електромагнітної хвилі в плазмі. Значення фазово-частотної характеристики зберігаються в масиві FCH тієї ж розмірності  $[M, N]$ , який повертається в кінці функції.

Важливо врахувати, що обчислення фазово-частотної характеристики може бути часовитратним завданням, оскільки вимагає подвійного циклу по тривимірному масиву розмірністю [M, N, L]. Зазначений нижче код може виконуватись тривалий час, особливо при таких великих розмірах масиву, як [100000, 100000, 100].

Для перевірки роботи коду заповнимо масив array випадковими значеннями концентрації плазми замість нулів. Оскільки в масиві зберігаються значення концентрації плазми, які є елементарними об'ємами середовища, потрібно використати тип даних numeric для зберігання нецілих значень.

```
compute_FCH <- function(array, ne) {  
  
  M <- dim(array)[1]  
  
  N <- dim(array)[2]  
  
  L <- dim(array)[3]  
  
  FCH <- array(dim = c(M, N, L))  
  
  for (i in 1:M) {  
  
    for (j in 1:N) {  
  
      phase_delay <- 0  
  
      for (k in 1:L) {  
  
        ne_value <- array[i, j, k]  
  
        omega <- k # частота гармоніки  
  
        me <- 9.10938356e-31 # маса електрона  
  
        e <- 1.60217662e-19 # заряд електрона
```

```

refractive_index <- sqrt(1 - ((4 * pi * ne_value * e^2) / (me * omega^2)))
fch_num <- 1 / refractive_index
phase_delay <- phase_delay + fch_num
FCH[i, j, k] <- fch_num
}
}
}
return(FCH)
}

M <- 100000
N <- 100000
L <- 100

array <- array(0, dim = c(M, N, L))
for (i in 1:M) {
  for (j in 1:N) {
    for (k in 1:L) {
      array[i, j, k] <- runif(1, min = 10, max = 7000)
    }
  }
}
}

```

```
ne <- 5
```

```
FCH_result <- compute_FCH(array, ne)
```

```
print(FCH_result)
```

### 2.1.2 Приймальна апертура

За модель приймальної апертури править двовимірний масив розмірністю  $[R, C]$ , де  $R=C=100$ . На платформі R це об'єкт `matrix(0, R,C)`.

Сигнал в апертурі формується за принципом суперпозиції і дорівнює алгебраїчній сумі сигналів, сформованих в кожному елементі апертури. Сигнал в елементі апертури формується як геометрична сума затриманих в часі сигналів що пройшли крізь кожний елемент об'єму іоносферної плазми. Затримка в часі сигналів пропорційна відстані від елементу об'єму іоносферної плазми до елементу приймальної апертури – рис.3.

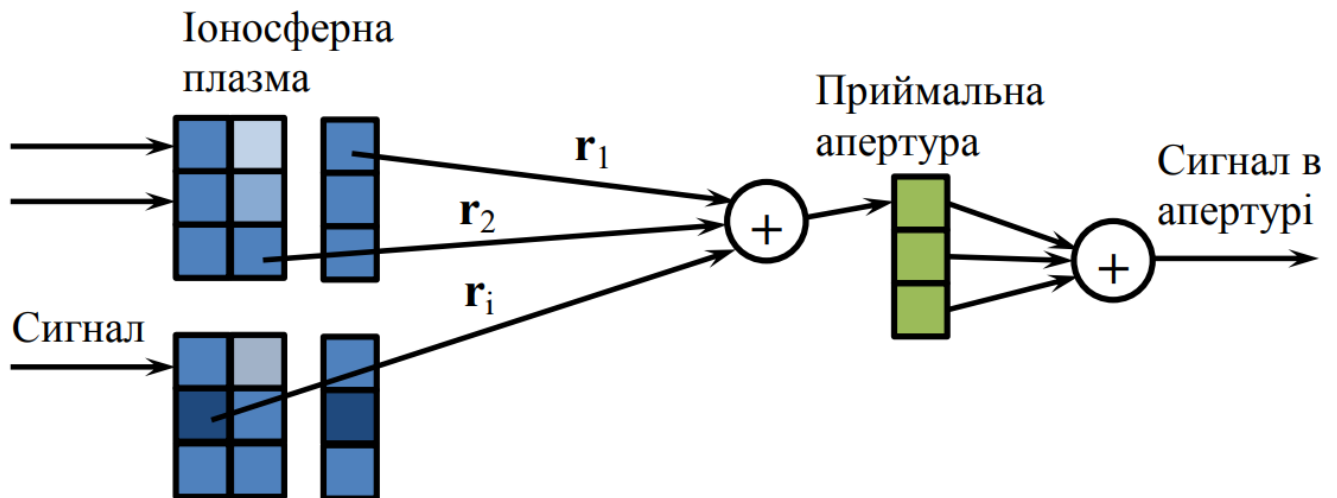


Рис.3 Схема формування спотвореного сигналу під впливом іоносферної плазми.

Модель приймальної апертури в мові R, яка враховує суперпозицію сигналів, що пройшли через кожний елемент об'єму іоносферної плазми і затрималися в часі:

```
# Розмірність матриці приймальної апертури
```

```
R <- 100
```

```
C <- 100
```

```
# Створення матриці приймальної апертури та заповнення випадковими значеннями
```

```
aperture <- matrix(runif(R * C), nrow = R, ncol = C)
```

```
# Задані параметри
```

```
signal_speed <- 3e8 # Швидкість поширення сигналу (м/с)
```

```
sampling_rate <- 1e6 # Частота дискретизації (Гц)
```

```
plasma_density <- 1e11 # Концентрація плазми (1/м3)
```

```
aperture_spacing <- 1 # Відстань між елементами апертури (м)
```

```
# Обхід кожного елемента апертури та моделювання сигналу
```

```
for (i in 1:R) {
```

```
  for (j in 1:C) {
```

```
    # Ініціалізація суми сигналів для поточного елемента апертури
```

```
    signal_sum <- 0
```

```
    # Відстань від елемента апертури до об'єму іоносферної плазми
```

```
    distance <- sqrt((i - R / 2) ^ 2 + (j - C / 2) ^ 2) * aperture_spacing
```

```

# Обхід кожного елементу об'єму іоносферної плазми

for (k in 1:L) {

  # Знаходження значення сигналу в елементі апертури

  signal_value <- array[i, j, k]

  # Затримка в часі сигналу, пропорційна відстані до елементу об'єму
іоносферної плазми

  time_delay <- distance / signal_speed

  # Визначення відповідного індексу сигналу, затриманого в часі

  delay_index <- round(time_delay * sampling_rate)

  # Додавання затриманого сигналу до суми сигналів

  signal_sum <- signal_sum + signal_value[delay_index]

}

signal_sum <- signal_sum+1

# Оновлення значення елементу апертури зі сформованим сигналом

aperture[i, j] <- signal_sum

}

}

# Виведення результату

print(aperture)

```

У цьому коді йдеться прохід по кожному елементу апертури (розмірність  $R \times C$ ) та обчислюється суперпозиція сигналів, які затрималися в часі. Затримка в часі вираховується залежно від відстані між елементом апертури і об'ємом іоносферної плазми. Значення сигналу в елементі апертури додається до відповідного елементу матриці приймальної апертури.

Код використовує параметри, такі як швидкість поширення сигналу, частота дискретизації, концентрація плазми та відстань між елементами апертури, які потрібно визначити відповідно до задачі.

### 2.1.3 Процедура розрахунку

Початковим кроком процедури розрахунку є генерація вектора з відліками тестового сигналу. Наступним кроком є формування вектора спотвореного і затриманого сигналу, що пройшов крізь поточний елемент іоносферної плазми. Цей сигнал додається до поточного елементу апертури

Ітерацією по всіх елементах плазмового об'єму з урахуванням відстані між елементом об'єму і елементом апертури формують сигнал в поточному елементі апертури. Аналогічні розрахунки проводять для всіх елементів апертури. Склавши сигнали, сформовані в усіх елементах апертури, отримується остаточний сигнал.

```
# Розмірність матриці приймальної апертури
```

```
R <- 100
```

```
C <- 100
```

```
# Створення матриці приймальної апертури та заповнення випадковими значеннями
```

```
aperture <- matrix(runif(R * C), nrow = R, ncol = C)
```

```

# Задані параметри

signal_speed <- 3e8 # Швидкість поширення сигналу (м/с)

sampling_rate <- 1e6 # Частота дискретизації (Гц)

plasma_density <- 1e11 # Концентрація плазми (1/м^3)

aperture_spacing <- 1 # Відстань між елементами апертури (м)

# Розмірність плазмового об'єму

L <- 10

# Створення тривимірного масиву з розмірністю [R, C, L] та заповнення
випадковими значеннями

array <- array(runif(R * C * L), dim = c(R, C, L))

# Обхід кожного елемента апертури та моделювання сигналу

for (i in 1:R) {

  for (j in 1:C) {

    # Ініціалізація суми сигналів для поточного елемента апертури

    signal_sum <- 0

    # Обхід кожного елемента плазмового об'єму

    for (k in 1:L) {

      # Знаходження значення сигналу в елементі апертури

      signal_value <- aperture[i, j]

      # Відстань від елемента апертури до елемента плазмового об'єму

```

```

distance <- sqrt((i - R / 2) ^ 2 + (j - C / 2) ^ 2) * aperture_spacing

# Затримка в часі сигналу, пропорційна відстані до елемента плазмового
об'єму

time_delay <- distance / signal_speed

# Визначення відповідного індексу сигналу, затриманого в часі

delay_index <- round(time_delay * sampling_rate)

# Формування спотвореного і затриманого сигналу

if (delay_index > 0) {

  signal_value <- signal_value + array[i, j, k] * exp(-plasma_density * delay_index)

}

# Додавання спотвореного і затриманого сигналу до суми сигналів

signal_sum <- signal_sum + signal_value

}

# Запис суми сигналів в поточний елемент апертури

aperture[i, j] <- signal_sum

}

}

# Виведення результату

print(aperture)

```

В кодї додається ітерація по елементам плазмового об'єму, враховуючи відстань до елементу апертури. Затримка в часі сигналу враховується шляхом обчислення відповідного індексу затримки та застосування затриманого та спотвореного сигналу до поточного елементу апертури. Остаточний сигнал формується шляхом додавання спотворених і затриманих сигналів для всіх елементів апертури.

## 2.2 Моделювання

В середовищі R необхідно сформувати тестовий сигнал: серію прямокутних імпульсів скважністю 30%. Кількість відліків на імпульс  $N=100$ . Сформувати серію з 50 імпульсів. Провести розрахунки для однорідного незбуреного середовища і для середовища з випадковим значенням концентрації іоносферної плазми в елементах об'єму розподієним за нормальним законом для трьох значень дисперсії: 3 потужності, 1 потужність і 0.1 потужності вихідного сигналу.

Для виконання цього завдання, давайте спочатку створимо тестовий сигнал, який складатиметься з серії прямокутних імпульсів зі скважністю 30% і кількістю відліків на імпульс  $N = 100$ . Сформуємо серію з 50 імпульсів. Код функції для генерації тестового сигналу зазначений в Додатку А.

Далі потрібно провести розрахунки для однорідного незбуреного середовища, а також для середовища з випадковим значенням концентрації іоносферної плазми в елементах об'єму, розподієного за нормальним законом для трьох значень дисперсії.

Для розрахунків в однорідному незбуреному середовищі можна використовувати попередній код, де `array` буде матрицею з однаковими значеннями концентрації плазми. Програма для проведення моделювання:

```

# Функція для проведення розрахунків

performCalculations <- function(test_signal, aperture, dispersion) {

# Кількість відліків на імпульс

N <- 100

# Змінна для зберігання результату

result <- vector(mode = "numeric", length = ncol(aperture))

# Ітерація по елементам апертури

for (i in 1:ncol(aperture)) {

# Сформувати затриманий і спотворений сигнал для поточного елемента
апертури

distorted_signal <- c(rep(0, i - 1), test_signal[1:(length(test_signal) - (i - 1))])

# Застосувати випадкові затримки для середовища з дисперсією dispersion

delays <- rnorm(length(distorted_signal), mean = 0, sd = sqrt(dispersion))

delayed_signal <- vector(mode = "numeric", length = length(distorted_signal))

# Сформувати затриманий сигнал

for (j in 1:length(distorted_signal)) {

delay_index <- round(j - delays[j])

if (delay_index >= 1 && delay_index <= length(distorted_signal)) {

delayed_signal[j] <- distorted_signal[delay_index]

}

}

}

```

```

}

# Сумувати сигнали, сформовані в усіх елементах апертури
result[i] <- sum(delayed_signal[1:N])

}

return(result) }

# Створення апертури

R <- 100

C <- 100

aperture <- matrix(1, nrow = R, ncol = C)

# Дисперсія для середовища з випадковими значеннями концентрації плазми
dispersion_values <- c(3, 1, 0.1)

# Виконання розрахунків для однорідного незбуреного середовища
result_homogeneous <- performCalculations(test_signal, aperture, 0)

# Виконання розрахунків для середовища з випадковими значеннями
концентрації плазми
results <- list()

for (dispersion in dispersion_values) {

  result <- performCalculations(test_signal, aperture, dispersion)

  results[[as.character(dispersion)]] <- result

}

```

```

# Виведення результатів

cat("Результати для однорідного незбуреного середовища:\n")

print(result_homogeneous)

for (dispersion in dispersion_values) {

  cat("Результати для середовища з дисперсією", dispersion, "потужності
вихідного сигналу:\n")

  print(results[[as.character(dispersion)]])

}

# Виведення результатів у вигляді графіка

library(ggplot2)

# Підготовка даних для графіка

df_homogeneous <- data.frame(Position = 1:length(result_homogeneous), Intensity
= result_homogeneous)

df_dispersion3 <- data.frame(Position = 1:length(results[["3"]]), Intensity =
results[["3"]])

df_dispersion1 <- data.frame(Position = 1:length(results[["1"]]), Intensity =
results[["1"]])

df_dispersion01 <- data.frame(Position = 1:length(results[["0.1"]]), Intensity =
results[["0.1"]])

# Графік

ggplot() +

```

```
geom_line(data = df_homogeneous, aes(x = Position, y = Intensity), color = "black",
size = 1) +

geom_line(data = df_dispersion3, aes(x = Position, y = Intensity), color = "blue",
size = 1) +

geom_line(data = df_dispersion1, aes(x = Position, y = Intensity), color = "orange",
size = 1) +

geom_line(data = df_dispersion01, aes(x = Position, y = Intensity), color = "green",
size = 1) +

xlab("Position") +

ylab("Intensity") +

ggtitle("Results") +

theme_minimal()
```

Після виконання коду відбуваються обчислення впливу збурень на запрограмований тестовий сигнал. При виводі результатів відображаються також виконані розрахунки для сигналу що проходив у незбуреному середовищі, для можливості порівняння зашумлених сигналів з «чистими». В результаті було отримано графік, на якому зображено чотири сигнали: з однорідного незбуреного середовища, а крім того, для середовища, де концентрація іоносферної плазми в елементах об'єму має випадкове значення, розподілене за нормальним законом з трьома різними значеннями дисперсії.

На рис. 4 зображені результати проведеного моделювання впливу стохастичного середовища на сигнал.

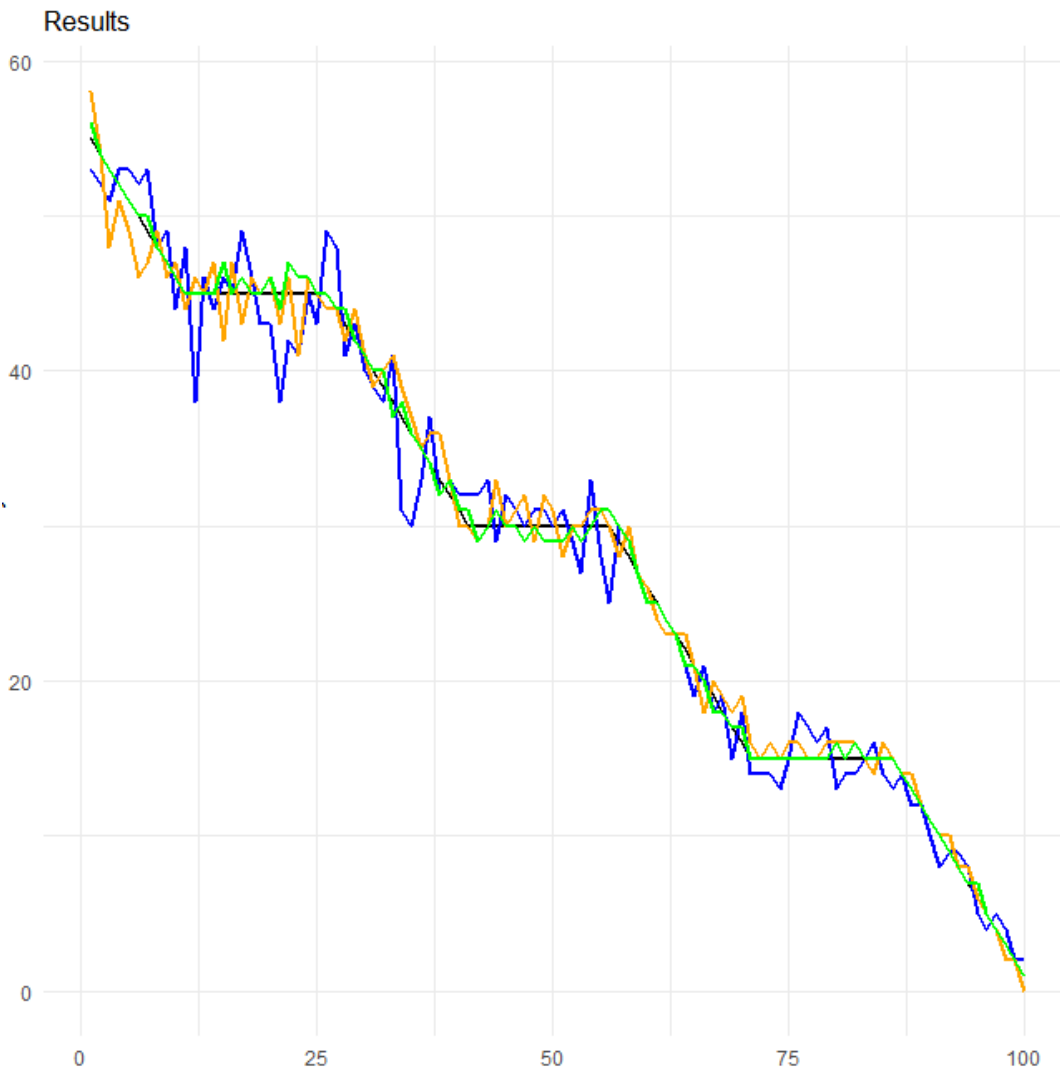


Рис.4 Результати роботи моделювання впливу збурень на тестовий сигнал

Далі для повноти розуміння сили впливу було проведено розрахунок співвідношення сигналу до шуму – SNR. Розраховують SNR як відношення квадрату математичного сподівання зашумленого сигналу до дисперсії шуму.

$$SNR = \frac{\mu^2}{\sigma}$$

де  $\mu$  — математичне сподівання спотвореного сигналу і  $\sigma$  — дисперсія спотвореного сигналу.

Для тестового сигналу SNR розраховується як усереднене відношення рівня сигналу на горизонтальних ділянках до дисперсії спотвореного сигналу на цих самих ділянках. У результаті маємо для тестового сигналу, де рівень дисперсії розподілу концентрації плазми в збуреній області дорівнює одиниці (помаранчева крива) рівень SNR приблизно дорівнює 10, а для сигналу при рівні дисперсії збурення 3 (синя крива), результат SNR має значення 6.

В майбутньому для більш заглибленого аналізу цієї моделі планується використовувати завадостійкі ГСПЧ-послідовності.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеної роботи розроблено числову модель впливу стохастичних середовищ на інформаційні характеристики кодово-імпульсних послідовностей.

В програмному середовищі R 4.1.3 розроблено та реалізовано оригінальний фреймворк, що втілює розроблений вплив іоносферних збурень на цифрові сигнали. Створена модель успішно апробований на експериментальних кодово-імпульсних послідовностях. Однак в подальшому, для більш глибокого аналізу стійкості каналів в стохастичних середовищах пропонується використовувати кодові послідовності в стандарті CDMA та псевдовипадкові послідовності створені комбінованим методом Гаусворта.

Розроблена модель дозволяє досліджувати вплив таких стохастичних середовищ, які неможливо створити в контрольованих лабораторних умовах, на властивості каналів передачі інформації. Це надає можливість вивчати та оцінювати методи покращення передачі даних без наявності реальних полярних сьайв або висотних ядерних вибухів

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Л. Пархоменко, «Комп'ютерне моделювання систем радіозв'язку і радіодоступу», 2017, міністерство освіти і науки України, державний університет телекомунікацій, Україна.
2. Wikipedia, Іоносфера [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Іоносфера>
3. Dong-Hyo Sohn, Kwan-Dong Park, James L. Davis, Meredith Nettles, Pedro Elosegui, «Rapid ionospheric variations at high latitudes: Focusing on Greenland», 2020, Advances in Space Research, Південна Корея, США, Іспанія
4. Feza Arıkan, Aysenur Yarıcı, «Spectral investigation of traveling ionospheric disturbances: IONOLAB-FFT», 2017, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Туреччина
5. Готинян О.Є., Івченко В.М., Рапопорт Ю.Г., Паррот М., «Іоносферні збурення, збурені літосферним газовим джерелом акустичних гравітаційних хвиль перед землетрусами», 2002, Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства, Україна
6. Kabacoff Robert I., «R in Action. Data analysis and graphics with R», 2012, США
7. 2. Wikipedia, Теорема Шеннона — Гартлі [Електронний ресурс] — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Теорема\\_Шеннона\\_—\\_Гартлі](https://uk.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шеннона_—_Гартлі)
8. Іващенко П. В., «ОСНОВИ ТЕОРІЇ ІНФОРМАЦІЇ», 2015, Одеська Національна Академія Зв'язку Ім. О.С. Попова, Україна

## ДОДАТКИ

### Додаток А

```
# Функція для генерації тестового сигналу

generateTestSignal <- function(pulse_width, num_pulses) {

  signal_duration <- pulse_width * num_pulses

  test_signal <- rep(c(1, 0), each = pulse_width / 2)

  test_signal <- rep(test_signal, num_pulses)

  test_signal <- test_signal[1:signal_duration]

  return(test_signal)

}

# Параметри тестового сигналу

pulse_width <- 30 # Скважність прямокутних імпульсів (у відсотках)

num_pulses <- 50 # Кількість імпульсів

# Генерація тестового сигналу

test_signal <- generateTestSignal(pulse_width, num_pulses)
```