

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №1

**«Дослідження принципів побудови супутникових
радіонавігаційних систем та їх характеристик»**

з дисципліни

**«Супутникові інформаційні системи»
для студентів спеціальності 172
«Електронні комунікації та радіотехніка»
всіх форм навчання**

2024

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №1 «Дослідження принципів побудови супутникових радіонавігаційних систем та їх характеристик» з дисципліни «Супутникові інформаційні системи» для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» всіх форм навчання/ Укл.: Логачова Л.М., Бугрова Т.І.– Запоріжжя,: НУ «ЗП», 2024 - 33с.

Укладачі: Л.М. Логачова, ст. викладач
Т.І. Бугрова, доцент , к.т.н.

Рецензент: С.С. Самойлик, доцент, к.ф.-м.н.

Відповідальний за випуск: Л.М. Логачова, ст. викладач

Затверджено
на засіданні кафедри
радіотехніки та телекомунікацій
Протокол № 4
від “15” лютого 2024 р.

Затверджено
на засіданні НМК ФІБЕК
Протокол № 5
від “15” лютого 2019 р.

Зміст

1 Загальні вимоги до виконання лабораторної роботи	4
2 Лабораторна робота	4
2.1 Ціль роботи	4
2.2 Ключові теоретичні положення	4
2.3 Контрольні запитання	12
2.4 Домашні завдання	14
2.5 Лабораторні завдання	14
2.6 Опис алгоритму та структури програмного комплексу	15
2.7 Зміст звіту	18
2.8 Перелік посилань	19
Додаток А Вихідні дані для виконання досліджень	20
Додаток Б Текст програми «Визначення супутникового сузір'я»	21
Додаток В Текст програми «Далекомірний метод розрахунку координат споживача»	27

1 ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Зміст виконуваної роботи повинен бути попередньо вивчений із залученням теоретичного матеріалу з лекційного курсу та відповідної літератури.

Лабораторна робота виконується групами у складі 2-х – 4-х студентів, кожен з яких виконує своє індивідуальне завдання.

З в і т складається кожним студентом и захищається у індивідуальному порядку.

Вихідні данні для виконання завдань досліджень обираються кожним студентом індивідуально у відповідності з передостанньою (m) та останньою (n) цифрами номера залікової книжки згідно до вихідних даних, які наведено у Додатку А.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА «ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК»

2.1 Ціль роботи

Ціль лабораторної роботи є поглиблення теоретичних знань та оволодіння розрахунковими методиками аналізу характеристик супутникових радіонавігаційних систем.

2.2 Ключові теоретичні положення

В світі експлуатуються більше десяти видів глобальних та локальних супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), однак найбільше поширення мають СРНС другого покоління: NAVSTAR (GPS) та ГЛОНАСС. Глобальна навігаційна система GPS (Global Positioning System) або NAVSTAR (Navigational Satellite Time and Ranging)

перекладається як навігаційний супутник часу та координат. Дана СРНС була розроблена на замовлення Міністерства оборони США. Перше штатне угруповання NAVSTAR розгортувалося з 1989 до 1994 року. Кінцеве введення у експлуатацію здійснилося у 1995 році. СРНС ГЛОНАСС (ГЛОбальна НАвігаційна Супутникова Система) розроблена у СРСР у кінці 80-х років XX століття. Розгортання орбітального угруповання навігаційних штучних супутників Землі (ШСЗ) було завершено у 1996 році та розпочалося його експлуатування. Принципи побудови СРНС NAVSTAR (GPS) та ГЛОНАСС в загальних рисах ідентичні, але відрізняються технічним виконанням підсистем.

У нинішній час готується до введення в експлуатацію Європейська глобальна навігаційна супутникова система GNSS (Global Navigation Satellite System), яка відома також під назвою GALILEO. Її сигнали будуть аналогічні та сумісні по структурі із сигналами СРНС NAVSTAR (GPS) та ГЛОНАСС, але в повідомлення GNSS будуть додані відомості про цілісність радіонавігаційної системи та ряд інших даних, що дозволяють підвищити точність визначення координат споживача.

Принцип побудови та склад СРНС

Супутниковою називають таку радіонавігаційну систему, у якій роль опорних радіонавігаційних станцій (маяків) виконують штучні супутники Землі (ШСЗ), які забезпечуються спеціальною передавальною навігаційною апаратурою. Основне призначення СРНС – високоточне визначення координат споживача, що складаються з вектора швидкості та прив'язки до системної шкали часу. Окрім основного призначення, СРНС дозволяють здійснювати високоточну взаємну синхронізацію стандартів частоти та часу на віддалених наземних об'єктах, взаємну геодезичну прив'язку та інше.

У СРНС NAVSTAR (GPS) та ГЛОНАСС кількість споживачів не обмежується, оскільки апаратура споживача не передає запитальних

радіосигналів на навігаційні ШСЗ, а тільки приймає радіосигнали від навігаційних ШСЗ (пасивна автономна радіонавігація).

СРНС включає в себе три функціональні частини (ці частини називають також сегментними) (див. рис.1):

- 1) космічний сегмент або орбітальне угруповання ШСЗ;
- 2) сегмент управління (наземний командно-вимірювальний комплекс управління) орбітальним угрупованням навігаційних ШСЗ (НШСЗ);
- 3) сегмент споживачів або апаратура користувачів системи.

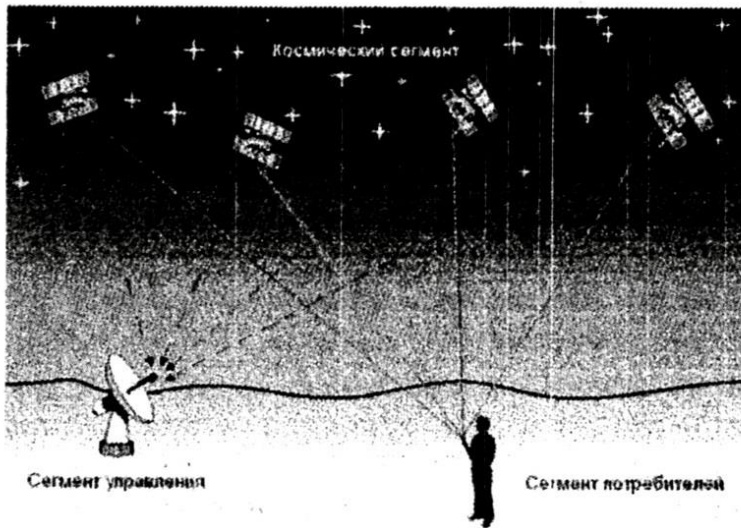


Рисунок 1 – Сегменти супутникових радіонавігаційних систем

Відмінною рисою космічного сегмента СРНС NAVSTAR (GPS) та ГЛОНАСС є значна кількість НШСЗ (24 та більше) на середньовисотних кругових геоцентричних похилих орбітах з висотою ≈ 20000 км над поверхнею землі (див. рис. 2). Порівняльні параметри орбітальних угруповань СРНС NAVSTAR (GPS) та ГЛОНАСС наведено в таблиці 1.

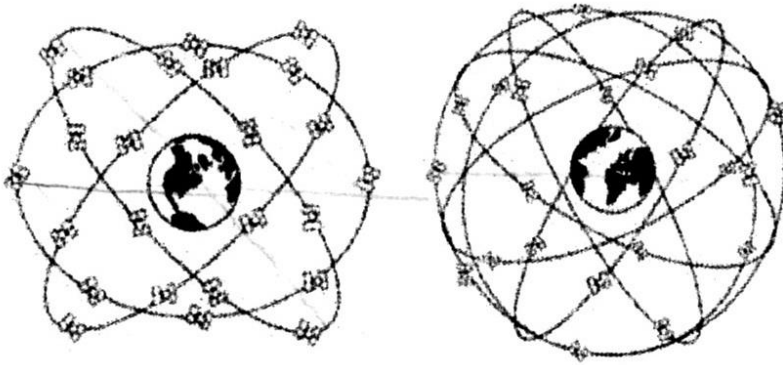


Рисунок 2 – Космічний сегмент систем ГЛОНАСС та NAVSTAR (GPS)

Таблиця 1 – Порівняльні параметри орбітальних угруповань СРНС

Показник	ГЛОНАСС	NAVSTAR (GPS)
Кількість НШСЗ у повному орбітальному угрупованні	24	24
Кількість орбітальних площин	3	6
Кількість НШСЗ у кожній площині	8	4
Висота орбіти, км	19 110	20 000
Нахил орбіти, град	64,8	55
Період обертання ШСЗ, год	11,26	12

Сегмент наземного комплексу управління СРНС виконує наступні функції:

- ефемеридне* та частотно-часове забезпечення;
- радіотелеметричний моніторинг НШСЗ;
- командне та програмне радіо-управління НШСЗ.

Ефемеридне та частотно-часове забезпечення супутників означає, що на Землі визначаються параметри руху НШСЗ та прогнозуються

значення цих параметрів на заздалегідь визначений проміжок часу. Параметри та їх прогноз закладаються у навігаційне повідомлення, яке передається НШСЗ із навігаційним сигналом. Сюди ж входять частотно-часові поправки бортової шкали часу НШСЗ відносно системного часу.

Вимірювання та прогноз параметрів руху НШСЗ (радіотелеметричний моніторинг НШСЗ) здійснюються у Балістичному центрі СРНС за результатами траєкторних вимірювань дальності до НШСЗ та його радіальної швидкості.

Для синхронізації шкал часу різних супутників з необхідною точністю на борту НШСЗ використовуються стандарти частоти з відносною нестабільністю порядку 10^{-13} . На наземному комплексі управління використовується стандарт з відносною нестабільністю 10^{-14} . Окрім того, у склад наземного комплексу управління СРНС входять засоби корекції шкал часу НШСЗ відносно еталонної шкали з похибкою 3...5 нс.

Навігаційною апаратурою споживача у сеансі радіонавігації одночасно приймаються радіосигнали не менш чим від чотирьох радіовидимих навігаційних ШСЗ. Результати вимірювань та ефемериди, що приймаються від кожного НШСЗ, дозволяють визначити (уточнити) три координати та три складові вектора швидкості споживача, а також визначити зміщення шкали часу НШСЗ.

Орбітальний рух НШСЗ

Орбіта НШСЗ, як і будь-якого іншого ШСЗ, без збурень є еліпсом, один з фокусів якого співпадає з центром маси Землі. Найбільш близько розташована до Землі точка еліптичної орбіти називається перигеєм, а найбільш віддалена – апогеєм.

Положення ШСЗ на орбіті відносно Землі може бути визначене шістьма кеплерівськими елементами, два з яких характеризують форму орбіти, три – орієнтацію орбіти та напрямок руху ШСЗ, а шостий – положення супутника на орбіті. Цими шістьма елементами є:

- 1) велика піввісь орбіти;
- 2) ексцентриситет орбіти;
- 3) нахил площини орбіти відносно площини екватора;
- 4) довгота висхідного вузла орбіти;
- 5) аргумент перигея;
- 6) істинна аномалія.

На рис. 3 зображено еліптичну орбіту ШСЗ у абсолютно геоцентричній (екваторіальній) системі координат. Початок системи суміщено з центром Землі. Вісь OZ направлена уздовж осі обертання Землі у бік північного полюса. Вісь OX лежить у екваторіальній площині і направлена у точку весняного рівнодення. Вісь OY доповнює декартову праву систему координат.

Велика піввісь орбіти a характеризує середнє віддалення ШСЗ, що рухається від центру Землі. Велика вісь орбіти пролягає через центр Землі та з'єднує точки апогею та перигею.

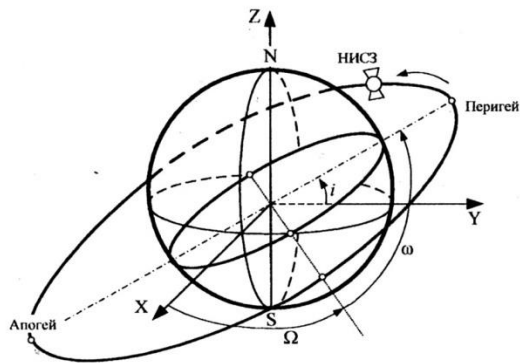


Рисунок 3 – Елементи орбіти НШСЗ у просторі

Ексцентриситет орбіти e – відношення відстані між фокусами до великої вісі, $e = \frac{c}{a}$ характеризує форму орбіти. Для еліптичних орбіт ШСЗ $0 \leq e < 1$. При $e = 0$ орбіта є круговою, при цьому висоти апогею та

перигею однакові. По круговій орбіті ШСЗ рухається з постійною швидкістю. При русі по еліптичній орбіті швидкість руху супутника змінюється, вона досягає максимуму в області перигею та мінімуму – в області апогею.

Нахил орбіти i – двогранний кут між площиною орбіти та площиною екватора, який відлічується від площини екватора проти руху часової стрілки для спостерігача, що знаходиться в точці висхідного вузла (ВВ). Висхідним вузлом називають точку, в якій ШСЗ переходить з південної півкулі у північну. Протилежна точка називається спадний вузол. По нахилу орбіти поділяються на екваторіальні ($i = 0^\circ$), нахилені ($0 \leq i \leq 90^\circ$) та полярні ($i = 90^\circ$).

Довгота висхідного вузла орбіти Ω характеризує поворот площини похилої або полярної орбіти навколо вісі (OZ) обертання Землі. Довгота висхідного вузла – це кут, що розміщений в екваторіальній області та відраховується від напрямку на точку весняного рівнодення (вісь OX) до лінії, яка з'єднує висхідний та спадний вузли.

Аргумент перигею ω характеризує орієнтацію великої вісі еліпса в площині орбіти. Аргумент перигею оцінюється як кутова відстань від висхідного вузла до перигею, що відраховується в площині орбіти в напрямку руху ШСЗ.

Істинна аномалія – поточне кутове положення ШСЗ на орбіті, котре визначає положення ШСЗ влюбий момент часу та рахується від перигею.

Метод розрахунку координат споживача

Для складання навігаційних рівнянь зручно використовувати геоцентричну прямокутну систему координат, при якій центр системи суміщений з центром Землі (див. рис. 3). Координати НШСЗ позначимо $x_{\text{ШСЗ}}$, $y_{\text{ШСЗ}}$, $z_{\text{ШСЗ}}$, а координати споживача - x_c , y_c , z_c . Тоді відстань між НШСЗ и споживачем дорівнює

$$D = \sqrt{(x_{\text{ШСЗ}} - x_c)^2 + (y_{\text{ШСЗ}} - y_c)^2 + (z_{\text{ШСЗ}} - z_c)^2}.$$

Якщо здійснюється вимірювання дальності до трьох супутників D_1, D_2, D_3 та координати усіх трьох НШСЗ $x_{\text{ШСЗ}}, y_{\text{ШСЗ}}, z_{\text{ШСЗ}}$ відомі, то отримаємо систему з трьох рівнянь вищенаведеного виду, рішення якої дозволить знайти невідомі координати споживача x_c, y_c, z_c .

Для обчислення відстаней D_1, D_2, D_3 між НШСЗ та споживачем використовуються різні дальномірні методи супутникової радіонавігації. Один з таких **дальномірних** методів заснований на вимірюванні відстані D між передавачем НШСЗ (точкою випромінювання) та приймачем споживача (точкою прийому) по часу затримки t радіосигналу при поширенні радіохвиль між цими точками $D = ct_3$, де c – швидкість поширення електромагнітних хвиль ($c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$).

Геометричним місцем точок, що є рівновіддаленими від НШСЗ є сферична поверхня радіусом D . Цю поверхню називають поверхнею положення дальномірної системи. Лініями положення, які виходять у результаті перетину поверхні положення з площиною або сферою (наприклад, на поверхні Землі), будуть окружності з центром в точці знаходження передавача (див. рис. 4). Тому дальномірні методи визначення координат називають круговими.

Місцеположення споживача (П) на поверхні Землі визначається як точка перетину ліній положення. Для двох ліній положення виникає неоднозначність відліку (точки П та П'), так як окружності перетинаються в двох точках. Для виключення неоднозначності можуть бути використані результати вимірювання дальності третього НШСЗ, додаткові засоби орієнтування або результати попередніх вимірювань. Для визначення місцеположення не на поверхні Землі, а у просторі необхідно виконувати вимірювання мінімум по чотирьом НШСЗ.

Однак виміряти істинну дальність між НШСЗ та споживачем можна тільки за умови точного суміщення їх шкал часу, тобто споживачам необхідно, аби НШСЗ випромінювали радіосигнали синхронно та споживачу був точно відомий момент випромінювання радіосигналів. Синхронність випромінювання радіосигналів усіх НШСЗ

забезпечується з високою точністю за командою з наземного комплексу управління у відповідності з єдиною системною шкалою часу.

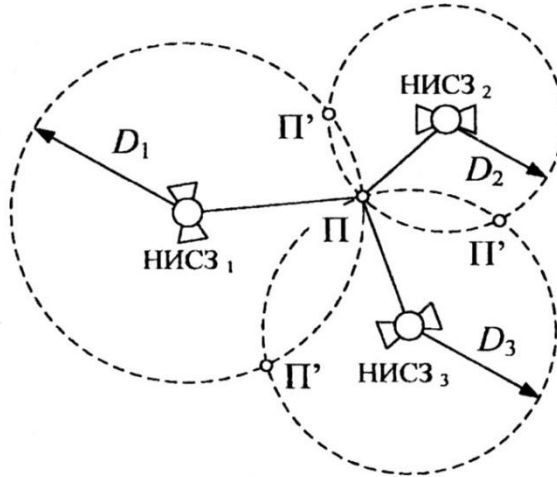


Рисунок 4 – Дальномірний метод визначення координат

Неможливість синхронізації апаратури споживача призводить до необхідності визначення місцеположення одночасно 5...8 НШСЗ.

2.3 Контрольні запитання

Запитання для допуску до лабораторної роботи :

- 1 Поясніть призначення супутникових радіонавігаційних систем.
- 2 Які глобальні системи супутникової радіонавігації Вам відомі, їх належність?
- 3 Перерахуйте сегменти супутникових радіонавігаційних систем, поясніть їх функції.

4 Дайте характеристику орбіт супутників NAVSTAR (GPS) та ГЛОНАСС.

5 Перерахуйте подібності та відмінності супутникових радіонавігаційних систем NAVSTAR (GPS) та ГЛОНАСС.

6 У чому полягає ціль розгортання супутникової радіонавігаційної системи GALILEO?

Затання до захисту лабораторної роботи :

1 Що розуміється під терміном «ефемериди»?

2 Що розуміється під термінами «апогей» та «перигей»?

3 Як визначається ексцентриситет орбіти та що він характеризує?

4 Як визначається нахил орбіти?

5 Що таке довгота висхідного вузла?

6 Як визначається аргумент перигея?

7 Що розуміється під істинною аномалією?

8 Поясніть геоцентричну інерційну систему координат.

9 Поясніть основні координати геофізичної системи координат.

10 Як зв'язана максимальна (мінімальна) широта підсупутникової точки з кутом нахилу орбіти?

11 Поясніть сферичні координати локальної наземної системи координат (похила дальність, азимут, кут місця).

12 Назвіть мінімальну кількість НШСЗ, які є необхідними для визначення місцеположення споживача на поверхні Землі та у навколосеземному просторі.

13 Яку роль відіграє час в супутникових радіонавігаційних системах?

14 Поясніть сутність дальномірного методу визначення координат споживача.

2.4 Домашнє завдання

1 Вивчіть ключові теоретичні положення, використовуючи методичні вказівки, конспект лекцій та рекомендовану літературу.

2 Підготуйте відповіді на контрольні запитання (запитання для допуску до лабораторної роботи).

3 Вивчіть опис алгоритму та структури програмного комплексу.

2.5 Лабораторне завдання

Завдання для усіх членів групи.

1 Для заданої СРНС (NAVSTAR (GPS) або ГЛОНАСС) перевірити у MathCAD-програмі основні установки, зокрема, параметри орбіти та орбітального угруповання згідно таблиці 1.

2 Ввести геодезичні координати заданого міста (див. таблицю висхідних даних у Додатку А).

3 Ввести поточний момент часу t_t (див. таблицю висхідних даних, Додаток А).

4 Змінюючи поточний момент часу t_t , визначіть мінімальний інтервал Δt_t , при якому візуально не спостерігається суттєвої зміни місцеположення НШСЗ в супутниковому сузір'ї.

Завдання для першого члена групи.

5 Заповніть таблицю «Кількість НШСЗ у зоні радіовидимості», змінюючи поточний момент часу у межах 20...30 хв від t_t з кроком Δt_t .

$t_t + k \Delta t_t$											
Кіл-ь НШСЗ											

$$k = 0, 1 \dots 10$$

6 Для заданих моментів часу $tt + k \Delta tt$, де $k = 0, 1 \dots 10$ визначити координати x, y для точки максимального перетину. За результатами заповніть таблицю.

$tt + k \Delta tt$											
$x \cdot 10^7$											
$y \cdot 10^7$											

$$k = 0, 1 \dots 10$$

2.6 Опис алгоритму та структури програмного комплексу

Програма «Визначення супутникового сузір'я» може бути представлена з наступних блоків (см. Додаток Б).

- Назва програми з зазначенням назви СРНС (наприклад, ГЛОНАСС або NAVSTAR (GPS));

- Вихідні дані;
- Параметри орбіти;
- Параметри орбітального угруповання;
- Визначення підсупутникової точки;
- Визначення супутникового сузір'я.

У блоці «Вихідні дані» задано поточний час, що змінюється в межах однієї доби, тобто від 0 до 24 годин. Крок зміни поточного часу може бути обрано довільно. В якості початкової установки крок дорівнює 5 хвилинам (12^{-1}). Також у цьому блоці задано радіус Землі – 6371 км.

У блоці «Параметри орбіти» визначені основні геометричні параметри орбіт для заданої СРНС. До них відносяться: висоти орбіт, нахил орбіт (до площини екватора), довгота висхідного вузла та аргумент перигею.

У СРНС, що аналізуються, використовуються кругові орбіти з висотою $H = 20000$ км для СРНС NAVSTAR (GPS) та $H = 19110$ км для СРНС ГЛОНАСС. Нахил орбіт під кутом $i=55^\circ$ для СРНС NAVSTAR (GPS) , та $i=64,8^\circ$ для СРНС ГЛОНАСС. Довгота висхідного вузла для кожної орбіти буде мати власні значення та у загальному випадку змінюватися. Так, для 6 орбіт СРНС NAVSTAR (GPS) початкове (наближене) значення для першої орбіти прийняте рівним 25° східної довготи, для решти орбіт довгота висхідного вузла зрушена на кут 60° . Аналогічно для СРНС ГЛОНАСС при 3 орбітах – початкове (наближене) значення 25° східної довготи, інші зрушені на кут 120° . Аргумент перигею має принципове значення для еліптичних орбіт, але так як в аналізованих СРНС використовують кругові геоцентричні орбіти , то цей кут можна обирати довільно.

У блоці **«Параметри орбітального угруповання»** визначені: кількість орбітальних площин $p=3$ для СРНС ГЛОНАСС та $p=6$ для СРНС NAVSTAR (GPS); кількість ШСЗ у кожній орбітальній площині для СРНС ГЛОНАСС $m=8$ і, відповідно, для СРНС NAVSTAR (GPS) $m=4$. Також до параметрів орбітального угруповання відносяться – період обертання НШСЗ навколо Землі, котрий дорівнює $T=12$ год для СРНС NAVSTAR (GPS) та $T=11,26$ год для СРНС ГЛОНАСС. Істинна аномалія $\theta(t)$ – поточне положення ШСЗ на орбіті у заданий момент часу t .

У блоці **«Визначення підсупутникової точки»** здійснюється розрахунок декартових координат місцеположення ШСЗ на орбіті у геоцентричній інерційній (рухомій) системі координат, а також довгота та широта підсупутникової точки в геофізичній системі координат. З урахуванням динамічної зміни положення ШСЗ по заданій орбіті наведено графічні залежності широти та довготи підсупутникової точки у геофізичній системі координат.

По відомим геофізичним координатам заданого міста (наприклад, м. Запоріжжя: довгота $35^0 24'$, широта $48^0 13'$) визначаються декартові координати Запоріжжя у геоцентричній інерційній (рухомій) системі

координат. Далі розраховуються сферичні координати місцеположення НШСЗ у локальній системі координат із центром в м. Запоріжжя, зокрема, похила дальність $H(t)$, кут місця $\theta(t)$ та азимут $\varphi(t)$ в залежності від часу спостереження.

У блоці **«Визначення супутникового сузір'я»** поточний момент часу t обирається згідно індивідуального завдання. Далі визначаються кутові координати НШСЗ, такі як кут місця θ_ξ та азимут φ_ξ . НШСЗ розташовані по орбітах рівномірно з часовим рознесенням 1,5 години для СРНС ГЛОНАСС та 3 години для СРНС NAVSTAR (GPS).

Програма **«Дальномірний метод розрахунку координат споживача»** також складається з окремих блоків (см. Додаток В).

- Назва програми із зазначенням аналізованої СРНС (наприклад, ГЛОНАСС або NAVSTAR (GPS));

- Вихідні дані;
- Параметри орбіти;
- Параметри орбітального угруповання;
- Визначення підсупутникової точки;
- Визначення супутникового сузір'я .
- Визначення кількості та положення ШСЗ у зоні радіовидимості;
- Реалізація та візуалізація дальномірного методу визначення координат споживача.

Перші 6 блоків аналогічні по змісту до відповідних блоків програми **«Визначення супутникового сузір'я»**, а останні два реалізують алгоритм дальномірного методу визначення координат.

У блоці **«Визначення кількості та положення ШСЗ у зоні радіовидимості»** на першому етапі визначається номер орбіти та номер НШСЗ, що знаходяться у зоні радіовидимості. Для цього аналізується кут місця кожного НШСЗ у локальній сферичній системі координат таким чином, щоб цей кут був не меншим за 80° . Далі, по відомим декартовим координатам обраних НШСЗ з геоцентричною інерційною (рухомою)

системою координат розраховуються геофізичні координати (довгота та широта) підсупутникової точки.

У блоці **«Реалізація та візуалізація дальномірного методу визначення координат споживача»** виконується розрахунок відповідних проекцій, побудова відповідних кіл та їх візуалізація, котрі в точці перетину будуть визначати координати споживача.

2.7 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити в собі:

- 1) Ціль роботи.
- 2) Завдання на домашнє дослідження та його результати.
- 3) Завдання на лабораторні дослідження.
- 4) Результати лабораторних досліджень.
- 5) Висновки.

В и с н о в к и по роботі повинні включати в себе як констатаційну частину, яка відображатиме основні отримані результати, так і аналітичну, у якій проводиться порівнювальний аналіз даних теоретичного та експериментального досліджень, а також пояснення отриманих результатів.

2.8 ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Омелянюк І.В. Цифрове ефірне телебачення. Практика, нові напрямки розвитку цифрового ефірного телебачення та створення цифрових ефірних телемереж. Посібник для фахівців телебачення. – К.: ЗАО «ТЕЛЕРАДІОКУР'ЄР», 2009. – 192 с., іл.
2. Гризків З.Д. Прикладні телевізійні системи: навчальний посібник. – Львів, 2003. – 250 с., іл..
3. Основи теорії сигналів: Підручник / За ред. Б.А. Мандзія. – Львів: Видавничий дім «Ініціатива», 2008. – 240 с.
4. В.П. Бабак, О.Г. Корченко. Інформаційна безпека та сучасні мережеві технології. – К. : НАУ, 2003. – 670 с.
5. Recommendation ITU-R. P.1546-1. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. (2001-2003).

Таблиця висхідних даних

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Місто*	Київ	Донецьк	Запоріжжя	Львів	Севастополь	Харків	Херсон	Хмельницький	Чернігів	Ялта
Широта, N	50°26′	48°0′	48°13′	49°50′	44°37′	49°59′	46°40′	49°24′	51°28′	44°28′
Довгота, E	30°31′	37°46′	35°24′	24°0′	33°33′	36°13′	32°37′	26°59′	31°15′	34°12′
m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
tt, год	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

n – остання цифра номера залікової книжки
m – передостання цифра номера залікової книжки
* інформація узята з сайту <http://travel.org.ua/sunrise>

Додаток Б

ВИЗНАЧЕННЯ СУПУТНИКОВОГО СУЗІР'Я

Супутникова навігаційна радіосистема NAVSTAR (GPS)

Висхідні дані :

Поточний час , t, год

$$t := 0,12^{-1}..24$$

Радіус Землі, R_z , м

$$R_z := 6371 * 10^3$$

Параметри орбіти :-висота орбіти, H , м

$$H := 20000 * 10^3$$

-нахил орбіти, i , рад.

$$i := 55 * \pi * 180^{-1}$$

-довгота висхідного вузла, Ω ,
рад.

$$\Omega(n) := (25 + 60 * n) * \pi * 180^{-1}$$

-аргумент перигею, ω_P , рад.

$$\omega_P := 0$$

Параметри орбітальногоугрупкування:-кількість орбітальних
площин, $n=6$

$$n := 0..5$$

-кількість ШСЗ у кожній
орбітальній площині, $m=4$

$$m := 0..3$$

-період обертання ШСЗ
навколо Землі, T , год

$$T := 12$$

-істинна аномалія (поточне
положення супутника на
орбіті), $\theta(t)$

$$\theta(t) := t * T^{-1} * 2 * \pi$$

Визначення під супутникової точки

Розрахунок декартових координат місцеположення ШСЗ на орбіті у геоцентричній інерційній (рухомій) системі координат

$$x(t, n) := (Rz + H) * (\cos(\theta(t) + \omega P) * \cos(\Omega(n)) - \sin(\theta(t) + \omega P) * \sin(\Omega(n)) * \cos(i))$$

$$y(t, n) := (Rz + H) * (\cos(\theta(t) + \omega P) * \cos(\Omega(n)) - \sin(\theta(t) + \omega P) * \sin(\Omega(n)) * \cos(i))$$

$$z(t, n) := (Rz + H) * \cos(\Omega(n)) - \sin(\theta(t) + \omega P) * \sin(i)$$

Розрахунок довготи $\lambda(t, n)$ та широти $\varphi(t, n)$ підсупутникової точки

$$j := \sqrt{-1}$$

$$yx(t, n) := x(t, n) + j * y(t, n)$$

$$\lambda(t, n) := \begin{cases} \arg(yx(t, n)) * \frac{180}{\pi} & \text{if } \arg(yx(t, n)) * \frac{180}{\pi} \geq 0 \\ \arg(yx(t, n)) * \frac{180}{\pi} + 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\varphi(t, n) := \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{z(t, n)}{\sqrt{x(t, n)^2 + y(t, n)^2 + z(t, n)^2}} \right) \right) * \frac{180}{\pi}$$

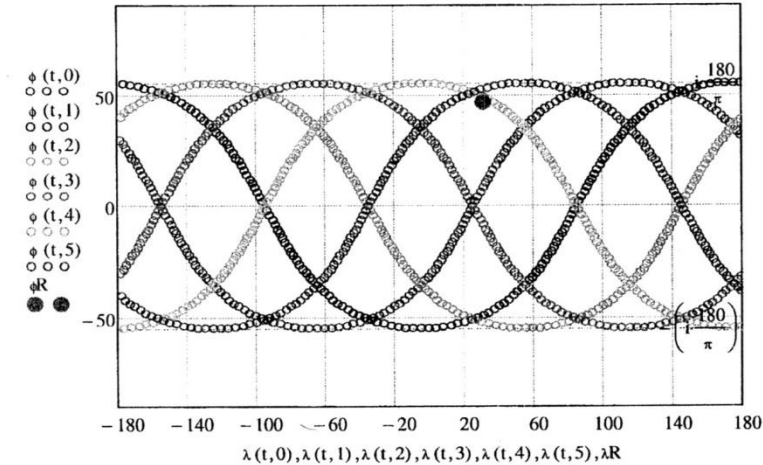
Географічні координати м.Запоріжжя:

довгота λ_R та широта φ_R , °

$$\lambda_R := 35.3$$

$$\varphi_R := 48.2$$

Візуалізація орбіт ШСЗ у вигляді залежності широти від довготи під супутникової точки із зазначенням місцеположення м.Запоріжжя



Декартові координати м.Запоріжжя у геоцентричній інерційній (рухомій) системі координат

$$xR := Rz * \cos\left(\varphi R * \frac{\pi}{180}\right) * \cos\left(\lambda R * \frac{\pi}{180}\right)$$

$$yR := Rz * \cos\left(\varphi R * \frac{\pi}{180}\right) * \sin\left(\lambda R * \frac{\pi}{180}\right)$$

$$zR := Rz * \sin\left(\varphi R * \frac{\pi}{180}\right)$$

Розрахунок сферичних координат місцеположення ШСЗ у локальній системі координат з центром в м.Запоріжжя

Похила дальність, $Hn(t,n)$, м

$$Hn(t,n) := \sqrt{(x(t,n) - xR)^2 + (y(t,n) - yR)^2 + (z(t,n) - zR)^2}$$

Кут місця, $\theta_{isz}(t,n), ^\circ$

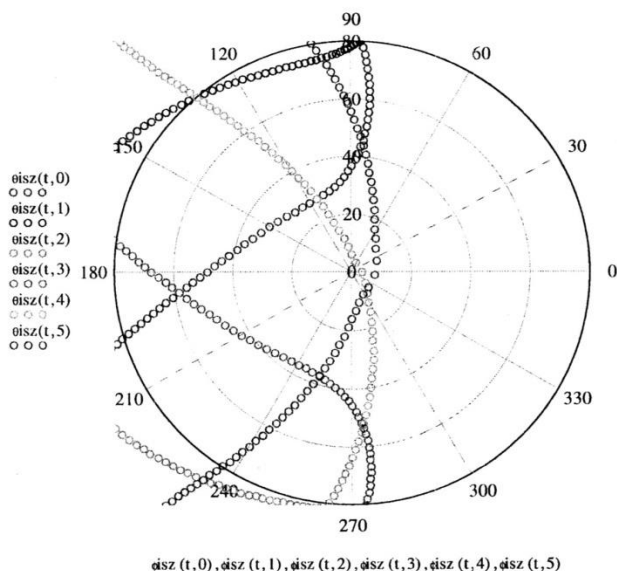
$$\theta_{isz}(t,n) := [\pi - \arccos \left[\frac{Rz^2 + Hn(t,n)^2 - (Rz+H)^2}{2 * Rz * Hn(t,n)} \right]] * \frac{180}{\pi}$$

Азимут $isz(t,n), ^\circ$

$$\varphi\lambda(t,n) := [(\varphi(t,n) - \varphi R) + j * (\lambda(t,n) - \lambda R)] * \frac{180}{\pi}$$

$$\varphi_{isz}(t,n) := \arg(\varphi\lambda(t,n))$$

Візуалізація орбіт ШСЗ у вигляді залежності азимут-кут місця з центром в м.Запоріжжя



Примітка:

-напрямок 0° - ПІВДЕНЬ; -напрямок 90° - ЗАХІД; -напрямок 180° - ПІВНІЧ; -напрямок 270° - СХІД; -кут піднесення $(90 - \theta_{isz}) > 10^\circ$.

ВИЗНАЧЕННЯ СУПУТНИКОВОГО СУЗІР'Я

Поточний момент часу, tt , год

$$tt := 2 + \frac{1}{60} * 0 + \frac{1}{60 * 60} * 0$$

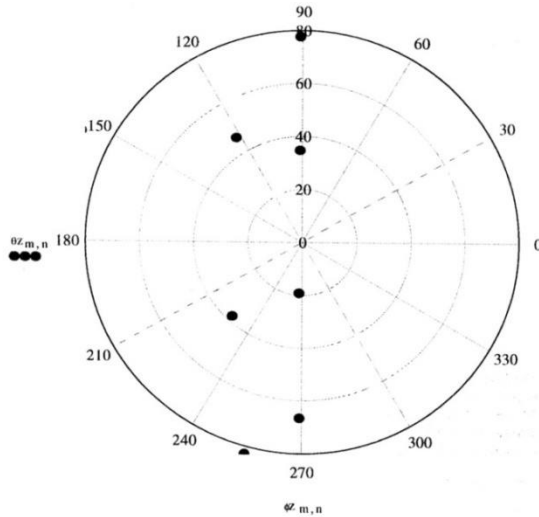
Кутові координати ШСЗ:

Кут місця, θz , °

$$\theta z_{m,n} := \theta isz(tt + m * 3, n)$$

Азимут φz , °

$$\varphi z_{m,n} := \varphi isz(tt + m * 3, n)$$



Примітка: ШСЗ розташовані по орбітам рівномірно із часовим розносом три години

Додаток В

ДАЛЬНОМІРНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ КООРДИНАТ
СПОЖИВАЧА

Супутникова навігаційна радіосистема NAVSTAR (GPS)

Вихідні дані:

Радіус Землі, R_z , м

$$R_z := 6371 * 10^3$$

Параметри орбіти:-висота орбіти, H , м

$$H := 20000 * 10^3$$

-нахил орбіти, i , рад

$$i := 55 * \pi * 180^{-1}$$

-довгота висхідного вузлу, Ω , рад.

$$\Omega(n) := ((25 + 60 * n)) * \pi * 180^{-1}$$

-аргумент перигею, ω_P , рад.

$$\omega_P := 0$$

Параметр орбітального угруповання:-кількість орбітальних площин, $n=6$

$$n := 0.5$$

-кількість ШСЗ у кожній орбітальній площині, $m=4$

$$m := 0.3$$

-період обертання ШСЗ навколо Землі, T , год

$$T := 12$$

-істинна аномалія (поточне положення супутника на орбіті), $\theta(t)$

$$\theta(t) := t * T^{-1} * 2 * \pi$$

Визначення під супутникової точки:

Розрахунок декартових координат місцеположення ШСЗ на орбіті у геоцентричній інерційній (рухомій) системі координат

$$x(t, n) := (Rz + H) * \cos(\theta(t) + \omega P) * \cos(\Omega(n)) - \sin(\theta(t) + \omega P) * \sin(\Omega(n)) * \cos(i)$$

$$y(t, n) := (Rz + H) * \cos(\theta(t) + \omega P) * \sin(\Omega(n)) + \sin(\theta(t) + \omega P) * \cos(\Omega(n)) * \cos(i)$$

$$z(t, n) := (Rz + H) * \sin(\theta(t) + \omega P) * \sin(i)$$

Розрахунок довготи $\lambda(t, n)$ та широти $\varphi(t, n)$ під супутникової точки

$$j := \sqrt{-1}$$

$$yx(t, n) := x(t, n) + j * y(t, n)$$

$$\lambda(t, n) := \begin{cases} \arg(yx(t, n)) * \frac{180}{\pi} & \text{if } \arg(yx(t, n)) * \frac{180}{\pi} \geq 0 \\ \arg(yx(t, n)) * \frac{180}{\pi} + 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\varphi(t, n) := \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{z(t, n)}{\sqrt{x(t, n)^2 + y(t, n)^2 + z(t, n)^2}} \right) \right) * \frac{180}{\pi}$$

Географічні координати м.Запоріжжя:

довгота λ_R та широта φ_R , °

$$\lambda_R := 35.3$$

$$\varphi_R := 48.2$$

Декартові координати м.Запоріжжя у геоцентричній інерційній (рухомій) системі координат

$$xR := Rz * \cos\left(\varphi R * \frac{\pi}{180}\right) * \cos\left(\lambda R * \frac{\pi}{180}\right)$$

$$yR := Rz * \cos\left(\varphi R * \frac{\pi}{180}\right) * \sin\left(\lambda R * \frac{\pi}{180}\right)$$

$$zR := Rz * \sin\left(\varphi R * \frac{\pi}{180}\right)$$

Розрахунок сферичних координат місцеположення ШСЗ у локальній системі координат з центром в м.Запоріжжя

Похила дальність, $Hn(t,n)$, м

$$Hn(t, n) := \sqrt{(x(t, n) - xR)^2 + (y(t, n) - yR)^2 + (z(t, n) - zR)^2}$$

Кут місця, $\theta isz(t,n)$, °

$$\theta isz(t, n) := \left[\pi - \arccos \left[\frac{Rz^2 + Hn(t,n)^2 - (Rz + H)^2}{2 * Rz * Hn(t,n)} \right] \right] * \frac{180}{\pi}$$

Азимут $isz(t,n)$, °

$$\varphi \lambda(t, n) := [(\varphi(t, n) - \varphi R) + j * (\lambda(t, n) - \lambda R)] * \frac{180}{\pi}$$

$$\varphi isz(t, n) := \arg(\varphi \lambda(t, n))$$

ВИЗНАЧЕННЯ СУПУТНИКОВОГО СУЗІР'Я

Поточний момент часу, tt , год

$$tt := 4 + \frac{1}{60} * 0 + \frac{1}{60 * 60} * 0$$

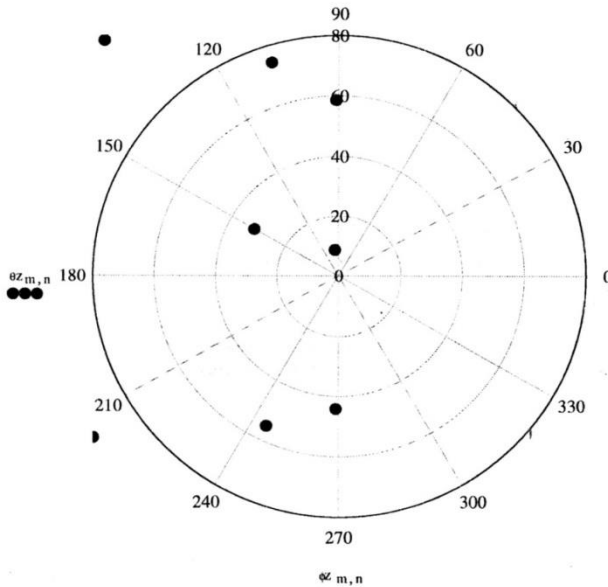
Кутові координати ШСЗ:

Кут місця, θ_z , °

$$\theta_{z_{m,n}} := \theta_{isz}(tt + m * 3, n)$$

Азимут φ_z , °

$$\varphi_{z_{m,n}} := \varphi_{isz}(tt + m * 3, n)$$



Примітка: ШСЗ розташовані по орбітах рівномірно із часовим рознесенням три години

Визначення кількості та положення ШСЗ у зоні радіовидимості

Номер орбіти L_m та номер ШСЗ
 L_n що знаходиться у зоні
 радіовидимості

$$TOL := 10^{-6}$$

$$L_m := \left| \begin{array}{l} m1 \leftarrow 0 \\ l \leftarrow 0 \\ \text{for } n \in 0..5 \\ \quad \text{for } m \in 0..3 \\ \quad \quad \text{if } \theta z_{m,n} \leq 80 \\ \quad \quad \quad \left| \begin{array}{l} m1 \leftarrow m \\ L \leftarrow m1 \\ l \leftarrow l + 1 \end{array} \right. \\ \quad \quad \quad \vdots \\ \quad \quad \quad L^T \end{array} \right|$$

$$L_n := \left| \begin{array}{l} n1 \leftarrow 0 \\ l \leftarrow 0 \\ \text{for } n \in 0..5 \\ \quad \text{for } m \in 0..3 \\ \quad \quad \text{if } \theta z_{m,n} \leq 80 \\ \quad \quad \quad \left| \begin{array}{l} n1 \leftarrow n \\ L \leftarrow n1 \\ l \leftarrow l + 1 \end{array} \right. \\ \quad \quad \quad \vdots \\ \quad \quad \quad L^T \end{array} \right|$$

Кількість НШСЗ у зоні радіовидимості

$$\text{last}(L_n) + 1 = 6$$

$$I := 0..\text{last}(L_n)$$

Відомі декартові координати місцеположення ШСЗ у
 геоцентричній інерційній (рухомій) системі координат

$$X_{Lm_I, Ln_I} := x(tt + Lm_I *, Ln_I)$$

$$Y_{Lm_I, Ln_I} := y(tt + Lm_I *, Ln_I)$$

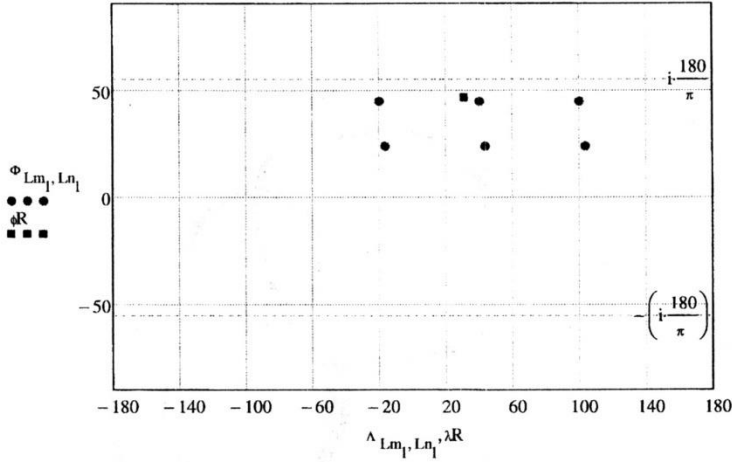
$$Z_{Lm_I, Ln_I} := z(tt + Lm_I *, Ln_I)$$

Розрахунок довготи $\lambda(t,n)$ та широти (t,n) підсупутникової точки

$$\wedge_{Lm_I, Ln_I} := \lambda(tt + Lm_I *, Ln_I)$$

$$\Phi_{Lm_I, Ln_I} := \varphi(tt + Lm_I * 3, Ln_I)$$

Візуалізація підсупутникових точок ШСЗ на залежності широти від довготи із зазначенням місцезположення м.Запоріжжя



Відомі моменти часу надходження радіосигналів від ШСЗ, сек

$$\Delta T_{Lm_I, Ln_I} := (Hn(tt + Lm_I * 3, Ln_I)) * (3 * 10^8)^{-1}$$

Розрахунок похилої дальності

$$Hnak_{Lm_I, Ln_I} := Hn(tt + Lm_I * 3, Ln_I)$$

$$\theta isz_{Lm_I, Ln_I} := \theta isz(tt + Lm_I * 3, Ln_I) * \frac{\pi}{180}$$

$$R_{Lm_I, Ln_I} := Hnak_{Lm_I, Ln_I} * \sin(\theta isz_{Lm_I, Ln_I})$$

