

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни «Радіотехнічні системи навігації»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***173 Авіоніка  
(Авіоніка)***

**за темою № 7 - Супутникові радіонавігаційні системи**

**Кременчук 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.23 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.23 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.23 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1

**Розробник:** викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, спеціаліст вищої категорії, викладач-методист  
Стущанський Ю.В.

**Рецензенти:**

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Інженер з технічного обслуговування, ремонту та діагностики авіаційної техніки ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Калінін О.В.

### План лекції

1. Загальні відомості про супутникові системи навігації
2. Функції бортового обладнання супутникової навігації.
3. Методи навігаційних вимірювань

### Рекомендована література:

#### Основна література:

1. В.П. Харченко, І.В. Остроумов. Авіоніка. Навчальний посібник. К.: НАУ, 2013.-272с.
2. Авіаційні радіоелектронні системи / О.О.Чужа, О.Г. Ситник, В.М. Хімін, О.В. Кожохіна. – К.:НАУ, 2017. – 264с.
3. В.О. Рогожин. Пілотажно-навігаційні комплекси повітряних суден. / В.О. Рогожин, В.М. Синеглазов, М.К. Філяшкін. Підручник. – К.: НАУ, 2005. – 316с.
4. А.В.Скрипець.Теоретичні основи експлуатації авіаційного обладнання. Навч. посіб. / А.В. Скрипець. – К.:НАУ, 2003. – 396с.
5. А.П.Бамбуркін, В.Н.Неделько, М.І.Рубец. Аеронавігаційні радіотехнічні системи. Навчальний посібник/ Під.ред. М.І.Рубця — Кіровоград. Вид-во ГЛАУ, 2002.- 520с.
6. В.П. Харченко. Системи зв'язку та навігації./ В.П. Харченко, Ю.М. Барабанов, М.А. Міхалочкін/ Навчальний посібник – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 216 с.
7. Л.М. Логачова. Поширення земних радіохвиль та мобільний зв'язок / Л. М. Логачова, Т. І. Бугрова / Навчальний посібник.— Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 236 с.

#### Допоміжна література:

1. П.В.Олянюк, Авіаційне радіообладнання. Підручник для ВУЗів. М: Транспорт 1989р. – 318 с.
2. Конспекти лекцій з базової підготовки технічного персоналу згідно вимог Part-66, Part-147 (Модуль 3, 4, 5, 13, 14).

#### Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. Системи індикації ПС. <https://studfiles.net/preview/6810198/page:28/>
2. Бортова система попередження зіткнень  
[http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/TM058196.htm](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/TM058196.htm)
3. HELLI — TAWS [http://www.fcs-modification.com/?go=news&n=6&new\\_language=0](http://www.fcs-modification.com/?go=news&n=6&new_language=0)

## Текст лекції

### 1. Загальні відомості про супутникові системи навігації

Проблема найбільш точного визначення координат місцеположення літака та інших навігаційних елементів існувала до запуску першого штучного супутника Землі (ШСЗ) 7 жовтня 1957 р. Ця дата ознаменувала нову еру не тільки в освоєнні космічного простору, а і в багатьох «земних» сферах науки, в тому числі й навігації.

З'явилася можливість розв'язання завдань навігаційного забезпечення морських та інших рухомих об'єктів.

Натепер найбільшого поширення набули супутникові радіонавігаційні системи (СРНС) ГЛОНАСС/GPS (російської та американської розробок).

Загальну структурну схему СРНС показано на рис.1. Вона містить чотири навігаційні ШСЗ, які використовуються у навігаційному сеансі, і технічні засоби командно-вимірювального комплексу (КВК).

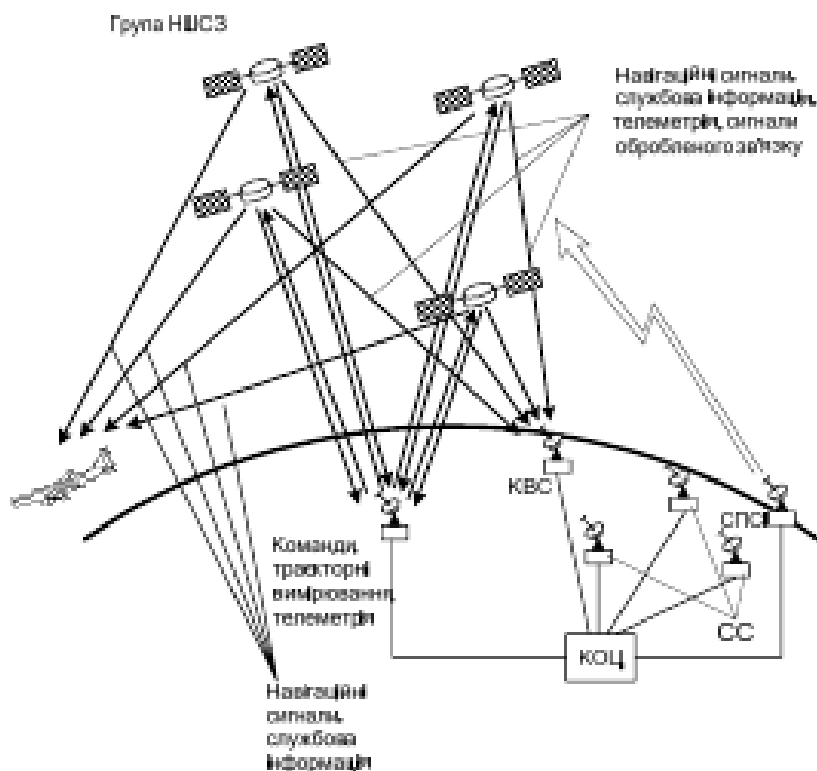


Рисунок 1 – Загальна структурна схема СРНС

До складу КВК входять: координаційно-обчислювальний центр (КОЦ); чотири станції спостереження (СС) за навколоземними ШСЗ (НШСЗ), контрольно-вимірювальна станція (КВС) і станція передавання службової інформації (СПСІ). Станції спостереження призначені для пасивних траєкторних вимірювань орбітальних параметрів усіх НШСЗ. Вони розташовані на Алясці, у Каліфорнії, на Гавайських островах і на острові

Гуам. Дані від СС транслюються на КОЦ, КВС здійснює телеметричний контроль за роботою бортових систем НШСЗ, виконує запитувальні траєкторні вимірювання.

Контрольно-вимірювальна станція обмінюється інформацією з КОЦ. Станція передавання службової інформації передає на борт кожного НШСЗ масив службової інформації, підготовлений у КОЦ, який організовує роботу усіх засобів і керує ними.

Об'єктами навігації системи NAVSTAR є: ПК, морські надводні судна, космічні апарати та ін. Очікувана похибка визначення просторових координат ПК за допомогою СРНС NAVSTAR становить приблизно 10 м, а визначення швидкості – близько 0,3 м/с.

За допомогою апаратури ШСЗ передається ефемеридна інформація, яка приймається бортовим приймачем-індикатором. У бортовому приймачі-індикаторі здійснюються навігаційні визначення дальності до ШСЗ будь-яким методом: далекоміром, доплерівським вимірювачем.

Інформація, яка приймається на борту літака, про параметри ШСЗ, зокрема про час, спільно з вимірюваними дальностями до трьох або чотирьох ШСЗ перетворюється пристроєм зв'язку – інтерфейсом для обчислення, де визначаються поточні координати місцеположення літака і повний вектор стану ПК (координати, курс, швидкість тощо).

Супутникова радіонавігаційна станція працює у діапазоні таких дециметрових хвиль:

- ☐ 150...400 МГц і «Транзит»;
- ☐ 1200...1500 МГц і «Навстар».

З увімкненням приймача GNSS він починає приймати навігаційні сигнали від ШСЗ. Крім того, із ШСЗ приймається і завантажується альманах. Альманах GNSS містить точну інформацію про кожний ШСЗ, зокрема його положення у певний час. За відомими координатами ШСЗ на певний час доби з використанням рівняння траєкторії руху ШСЗ розраховується точне положення ШСЗ на поточний час. Таким чином, приймач GNSS отримує актуальну інформацію про положення кожного ШСЗ.

Дальність від ШСЗ до користувача визначається шляхом вимірювання часу проходження навігаційного сигналу. Кожний із ШСЗ у строго визначений час випромінює певний навігаційний сигнал. Приймач GNSS «знає» час, коли сигнал на ШСЗ буде випромінений. У цей самий час приймач за допомогою вбудованого годинника генерує аналогічний навігаційний сигнал і подає його на лінію затримки. Після прийняття навігаційного сигналу від ШСЗ прийнятий сигнал порівнюється із затриманим через обчислення авто кореляційної функції. У випадку, коли

обидва сигнали будуть порівнюватись в один і той же час, значення авто кореляційної функції дорівнюватиме одиниці. Водночас від лінії затримки отримується час  $t$ , за який навігаційний сигнал від ШСЗ надійшов до приймача.

Дальнометрія заснована на обчисленні відстані з тимчасової затримки поширення радіосигналу від супутника до приймача. Якщо знати час поширення радіосигналу, то пройдений ним шлях легко обчислити, просто помноживши час на швидкість світла.

Кожен супутник системи GPS безперервно генерує радіохвилі двох частот -  $L1 = 1575.42\text{МГц}$  і  $L2 = 1227.60\text{МГц}$ . Потужність передавача становить 50 і 8 Ватт відповідно. Навігаційний сигнал являє собою фазовоманіпульований псевдовипадковий код PRN (Pseudo Random Number code). PRN буває двох типів: перший, C / A- код (Coarse Acquisition code - грубий код) використовується в цивільних приймачах, другий P- код (Precision code - точний код), використовується у військових цілях, а також, іноді, для вирішення завдань геодезії і картографії. Частота  $L1$  модулюється як C / A, так і P- кодом, частота  $L2$  існує тільки для передачі P- коду. Крім описаних, існує ще й Y -код, що представляє собою зашифрований P- код (у воєнний час система шифровки може мінятися).

Період повторення коду досить великий (наприклад, для P- коду він дорівнює 267 дням). Кожен GPS- приймач має власний генератор, що працює на тій же частоті і модулюючий сигнал по тому ж закону, що і генератор супутника. Таким чином, за часом затримки між однаковими ділянками коду, прийнятого з супутника і згенерованого самостійно, можна обчислити час поширення сигналу, а, отже, і відстань до супутника.

Оскільки внутрішній годинник у приймачі навігаційних сигналів не може точно визначити час для синхронізації, то, визначаючи дальність, необхідно враховувати похибку годинника користувача.

Відповідно до цього для визначення місцеперебування користувача необхідно приймати сигнали не менше ніж від чотирьох навігаційних ШСЗ.

Точність позиціонування GNSS дуже залежить від числених похибок. Одні з них пов'язані з геометрією розташування ШСЗ над користувачем та локальних похибок, зумовлених проходженням радіосигналу через атмосферу.

Одним зі шляхів зменшення впливу цих похибок є застосування локальних станцій визначення диференціальних поправок GPS (Differential Global Positioning System – DGPS). На сьогодні GPS розвиває мережу функціональних доповнень до GNSS, що забезпечують користувача повідомленнями про похибки GNSS у певному регіоні.

У США створюється та розвивається мережа функціональних доповнень Wide Area Augmentation System (WAAS) [60] та Local Area Augmentation System (LAAS) у Європі – European Geostationary Overlay System (EGNOS), в азіатсько-тихоокеансь-кому регіоні – Multifunction transport Satellite System (MTSAS)

Станція диференціальних поправок розміщується на земній поверхні з точно відомими координатами. Приймач GNSS, розміщений на станції, визначає місцеположення. Розраховуючи різницю між точним

місцеположенням та координатами, отриманими за допомогою GNSS на заданий час, визначають поправки, які передаються користувачу через супутники зв'язку.

Диференціальні поправки приймаються приймачем GNSS через ту саму антену, що й сигнали від навігаційних ШСЗ.

## **2. Функції бортового обладнання супутникової навігації.**

Сучасне навігаційне обладнання GNSS розраховує координати місцеположення за результатами оцінювання координат від двох GNSS: GPS і ГЛОНАСС з подальшим визначенням більш точного положення.

Бортове обладнання GNSS виконує такі основні функції:

- визначення координат ПК;
- обчислення географічних координат місцеположення;
- оцінювання геодезичної висоти польоту ПК;
- визначення трьох складових вектора швидкості ПК;
- визначення шляхового кута;
- обчислення шляхової швидкості ПК;
- забезпечення системи ПК точним часом UTC;
- індикацію координат.

Обладнання GNSS дуже часто інтегрується з іншими системами ПК такими, як FMS (RocwellColins – FMS-5000; Universal Avionics – UNS-1Ew, UNS-1Fw, UNS-1Lw; Honeywell – GNS-XLS), чи з індикатором повітряної обстановки для легкої авіації. Деякі виробники бортового обладнання GNSS інтегрують базу аеронавігаційної інформації у приймач GNSS і забезпечують

можливість програмування плану польоту ПК. Це дає змогу надавати пілоту інформацію про величини відхилення ПК від заданої траєкторії руху та вказувати на аеронавігаційні засоби, розміщені поблизу ПК (СН-3301).

Коли є різні навігаційні системи, сама собою напрошується думка про їх спільне використання в цілях реалізації найкращих характеристик кожної з них. Очевидний варіант для морехідної навігації - поєднання систем "Омега" і "Лоран-С". Перша з них забезпечує глобальне охоплення, а друга - більш точні дані там, де це можливо, тобто поблизу узбережжя, де і потрібно більш точна навігація. Найбільш досконалою в даний час видається комбінація інерціальної навігаційної системи з супутниковою системою GPS. Тільки ІНС здатна відстежувати маневри високошвидкісного літака і безперервно виводити на дисплей змінюються значення координат, швидкості і орієнтації.

Дані ж системи GPS можна було б використовувати для контролю за накопиченням помилки інерціальної системи, що дозволило б такої

комбінованої навігаційній системі точно вказувати координати і швидкість за тривалі проміжки часу і стабілізувати свідчення ІНС по висоті.

### 3. **Методи навігаційних вимірювань**

**Кутомірний метод.** За допомогою бортової апаратури вимірюється кутове положення ШСЗ (висота  $h$  і азимут). Ці кутові навігаційні параметри формуються за напрямом надходження радіохвилі від НШСЗ і характеризують його положення відносно спостерігача. За даними кутових величин НШСЗ, ефемеридної інформації та часу визначаються координати споживача у геоцентричній системі координат.

**Далекомірний метод.** Вимірюються похилі дальності від літального апарата до декількох НШСЗ в один і той же момент часу або до одного ШСЗ у різні моменти часу. Кожній виміряній дальності Двим у просторі відповідає поверхня положення спостерігача – сфера, у центрі якої перебуває НШСЗ.

**Псевдодалекомірний метод.** Від далекомірного методу відрізняється тим, що разом з трьома дальностями до трьох ШСЗ вимірюється дальність до четвертого ШСЗ і поправка до бортових годинників на літаку.

**Різницево-далекомірний метод.** Вимірюються різниці дальностей до двох ШСЗ в один і той же момент часу. При цьому формується поверхня положення, яка є гіперболоїдом обертання з ШСЗ у фокусі.

**Доплерівський метод.** Доплерівським методом вимірюють доплерівський зсув частоти. Доплерівська частота пропорційна відносній швидкості ШСЗ і літака. Випромінювання коливання частотою  $f_0$  з ШСЗ у точку приймання надходить з доплерівським зсувом.

**Диференціально-доплерівський метод.** Суть його полягає у визначенні максимальної зміни доплерівської частоти, тобто похідної від виразу для дальності між ШСЗ та ПК. Максимальною зміна буде на траверзі відносно ШСЗ.

**Інтегрально-доплерівський метод.** За фіксований проміжок часу  $\Delta t$  відбувається інтегрування доплерівської частоти, яка пропорційна швидкості ПК. Цей метод аналогічний різницеводалекомірному методу.

**Диференціальний метод.** Супутникові навігаційні системи дозволяють отримати координати з точністю 10...15 м. Але для багатьох задач, особливо для навігації у містах, потрібна більш висока точність.

Один з основних методів збільшення точності визначення місцеперебування об'єкта ґрунтується на застосуванні відомого у радіонавігації методу диференціальних вимірювань.

Диференціальний метод DGPS (Differential GPS) дозволяє встановити координати з точністю до трьох метрів у динамічній навігаційній ситуації і до одного метра у стаціонарних умовах. Диференціальний метод реалізується за допомогою контрольного GPS-приймача, який називається опорною станцією. Вона розташовується у пункті з відомими координатами у тому ж



районі, що й головний GPS-приймач. Порівнюючи відомі координати (отримані в результаті прецизійної геодезичної зйомки) з виміряними, опорна станція обчислює поправки, які передаються споживачам по радіоканалу у чітко обумовленому форматі. Апаратура споживача приймає від опорної станції диференціальні поправки і враховує їх під час визначення місцеперебування споживача. Результати, отримані за допомогою диференціального методу, значною мірою залежать від відстані між об'єктом і опорною станцією. Застосування цього методу найбільш ефективно тоді, коли домінують систематичні помилки, зумовлені зовнішніми (щодо приймача) причинами. За експериментальними даними опорну станцію рекомендується розміщувати не далі 500 км від об'єкта.

На сьогодні наявна велика кількість широкозонних, регіональних та локальних диференціальних систем. Широкозонні – це, наприклад, такі системи, як американська WAAS, європейська EGNOS і японська MSAS. Ці системи використовують геостационарні супутники для передавання поправок усім споживачам, які перебувають у зоні покриття. Регіональні системи призначені для навігаційного забезпечення окремих ділянок земної поверхні. Зазвичай регіональні системи використовують у великих містах, на транспортних магістралях і судноплавних річках, у портах, на березі моря та океану. Діаметр робочої зони регіональної системи становить 500 ... 2000 км. Вона може мати у своєму складі одну чи більше опорних станцій. Локальні системи мають максимальний радіус дії – 50 ... 220 км. Вони включають морські, авіаційні та геодезичні локальні диференціальні станції.

Розвиток супутникової навігації зв'язаний з модернізацією обох супутникових систем GPS і ГЛОНАСС для збільшення точності навігаційних визначень, покращання сервісу, який надається споживачам, збільшення терміну експлуатації і надійності бортової апаратури супутників, поліпшення сумісності з іншими радіотехнічними системами і розвитку диференціальних підсистем. Загальні напрями розвитку систем GPS і ГЛОНАСС збігаються. Удосконалювати систему ГЛОНАСС передбачається на базі супутника нового покоління ГЛОНАСС-М. Цей супутник буде мати збільшений ресурс експлуатації. Аналогічне рішення про модернізацію системи GPS було прийнято в США.