

СИГНАЛИ GPS ЯК ОБ'ЄКТИ РАДІОПОДАВЛЕННЯ В ЗАДАЧАХ ОБ'ЄКТОВО-ТЕРИТОРІАЛЬНОГО ЗАХИСТУ

Розглянуто навігаційні сигнали GPS в якості об'єкта радіоподавлення, яке здійснюється для вирішення задач об'єктово-територіального захисту, алгоритми пошуку і захвату навігаційного сигналу.

Ключові слова: система глобального позиціонування, супутникові радіонавігаційні системи, навігаційний сигнал, сигнали GPS, точність позиціонування, завадозахищеність, радіоподавлення.

Вступ

Супутникові радіонавігаційні системи (СРНС) призначені для позиціонування, точного визначення тривимірних координат (широти, довготи, висоти над рівнем моря) об'єкта, оснащеного спеціальним навігаційним приймачем, а також його швидкості, напрямку руху і поточного часу [1].

Принцип визначення свого місця на земній поверхні в глобальній системі позиціонування полягає в одночасному вимірі відстані до декількох навігаційних супутників (не менше чотирьох) з відомими параметрами їх орбіт на кожний момент часу і обчисленні за вимірними відстанями своїх координат за допомогою навігаційної апаратури споживача. Навігаційна апаратура споживача складається з навігаційних приймачів і пристроїв обробки сигналів, що дозволяють забезпечити обчислення власних координат, швидкості і часу.

Можливість визначення параметрів руху штучного супутника Землі за результатами вимірювань доплерівського зсуву частоти сигналу, випромінюваного цим супутником, експериментально підтвердила група вчених під керівництвом В.А. Котельникова в 1957 році. При цьому була встановлена можливість розв'язання *оберненої задачі* – знаходження координат приймача за вимірним доплерівським зрушенням частоти випромінюваного супутником сигналу, якщо параметри руху і координати цього супутника відомі.

У 1974 році армія США вивела на орбіту перший супутник нової в той час системи навігації NAVSTAR, яку пізніше перейменували в Global Positioning System (GPS). В середині 1980-х технологію GPS дозволили використовувати цивільним кораблям і літакам, але протягом тривалого часу їм було доступне в рази менш точне позиціонування, ніж військовим. Двадцять четвертий супутник GPS, останній з необхідних для повного покриття поверхні Землі, запустили в 1993 році.

Початком масштабного застосування GPS можна вважати операції США (НАТО) на Близькому сході на початку 90-х років. Супутникова навігація стала базисом для високоточної зброї.

В інтересах оборони поряд з розвитком власних СРНС актуальним є створення ідеології техніки протидії СРНС супротивної сторони. Протидія реалізується засобами радіоподавлення в інтересах захисту цивільних об'єктів (населених пунктів, промислових підприємств, електростанцій, мостів, аеродромів тощо), а також військових об'єктів від засобів розвідки і ураження, які вирішують завдання свого місцезнаходження і наведення зброї з використанням засобів супутникової навігації. Мета протидії – ускладнення вирішення завдань визначення своїх координат і параметрів руху небезпечними об'єктами супротивної сторони.

Про протидію високоточної зброї шляхом постановки завад приймачам супутникової навігації стало відомо з конфлікту на Балканах, коли вперше було масово застосовано високоточні авіаційні бомби JDAM (Joint direct attack munition) з GPS-наведенням. Таке озброєння залежить як від точності системи вимірювання, що використовується для визначення місцезнаходження, так і від точності визначення координат цілі, яка критично залежить від розвідувальної інформації. В другій половині 90-х років вводиться концепція

«навігаційної війни» (NAVWAR – Navigation War), розробляються технічні вимоги до модулів GPS (GRAM), впроваджується модернізований криптостійкий сигнал P(Y)-код, створюються перші цифрові адаптивні антенні решітки з підвищеною завадостійкістю для захисту сигналів GPS.

В даний час експлуатуються дві глобальні супутникові радіонавігаційні системи: американська GPS і російська ГЛОНАСС. Крім того, з 2005 року розгортаються і вводяться в експлуатацію європейська GALILEO і китайська COMPASS. Принципи побудови і функціонування підсистем, що входять до складу глобальних СРНС, багато в чому аналогічні, що відкриває можливість їх спільного використання.

В рамках даної публікації в якості об'єкта радіоподавлення для вирішення задач об'єкто-територіального захисту розглядаються сигнали супутникової радіонавігаційної системи NAVSTAR GPS.

Організація доступу в СРНС

В СРНС GPS передбачено три основних рівня обслуговування – служба точного позиціонування, служба стандартного позиціонування і диференційний режим:

- служба точного позиціонування дозволяє отримувати точне визначення складових вектора швидкості і координат споживача і доступна лише військовим споживачам. В даному режимі використовуються захищені сигнали P (Y) і M коди.

- служба стандартного позиціонування доступна всім користувачам системи GPS і передбачає два режими з селективним доступом (з впровадженням додаткових навмисних помилок в значенні ефемерид навігаційних супутників Землі) і без нього. В стандартному режимі використовуються сигнали C/A, L1C, L2C і L5 коди.

- диференційний режим використання системи базується на виключенні різного роду систематичних похибок при спільній обробці результату навігаційного визначення в навігаційній апаратурі і апаратурі опорної станції передачі даних.

Характеристики сигналів супутникової радіонавігаційної системи GPS

Навігаційні супутники Землі СРНС GPS випромінюють навігаційні сигнали на частотах 1575.42 МГц (L1), 1227.6 МГц (L2) і 1176.45 МГц (L5) [2].

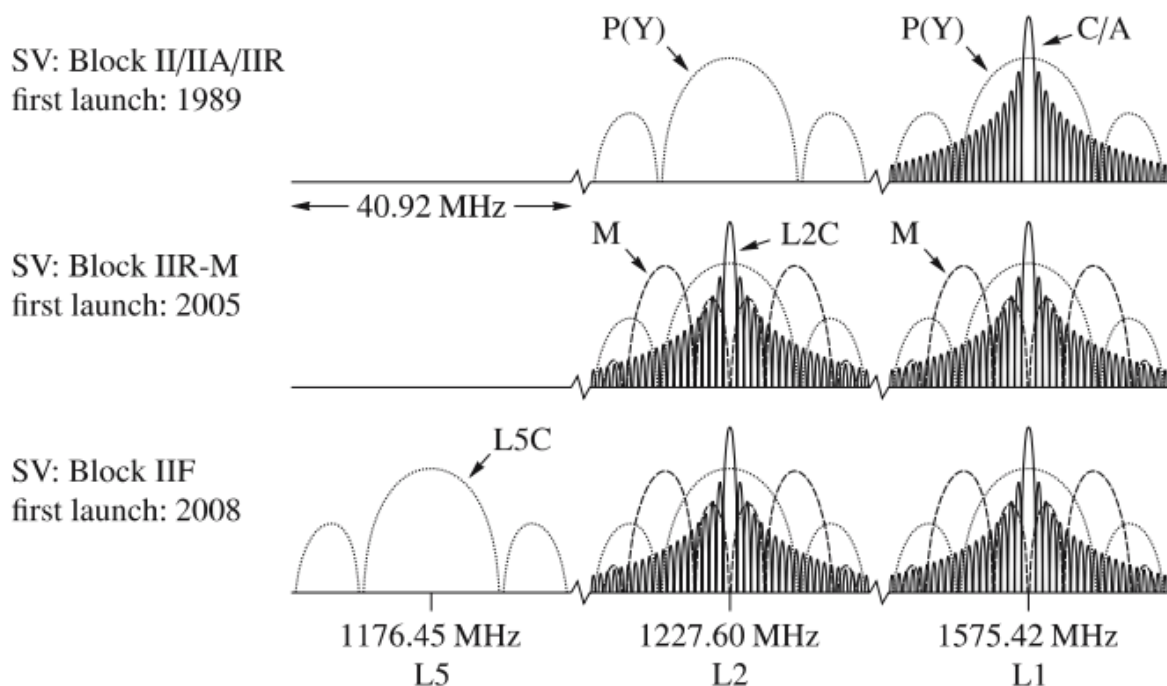


Рис. 1. Спектральні густини потужності сигналів GPS [2]

Для поділу сигналів з різних навігаційних супутників використовується кодове розділення сигналів у всіх частотних піддіапазонах, при цьому фаза несучого коливання модулюється своїм унікальним далекомірним кодом, сформованим на основі M-последовностей [2]. Всі сигнали, що випромінюються мають праву кругову поляризацію.

Спектральні густини потужності сигналів GPS наведено на рис.1.

На частоті L1 передаються чотири сигнали:

Сигнал стандартної точності C/A

Сигнал стандартної точності C/A доступний для використання всіма споживачами. Стандартний C/A код є кодом з частотою проходження символів 1.023 МГц і періодом повторення 1 мс. C/A додатково модулюється службовою інформацією. C/A код має бінарну фазову модуляцію (BPSK), принцип якої полягає в наступному: при переході далекомірного коду з «0» в «1», фаза синусоїдального сигналу несучої частоти змінюється на 180°. Принцип формування C/A коду (рис.2) докладно викладений в [2].

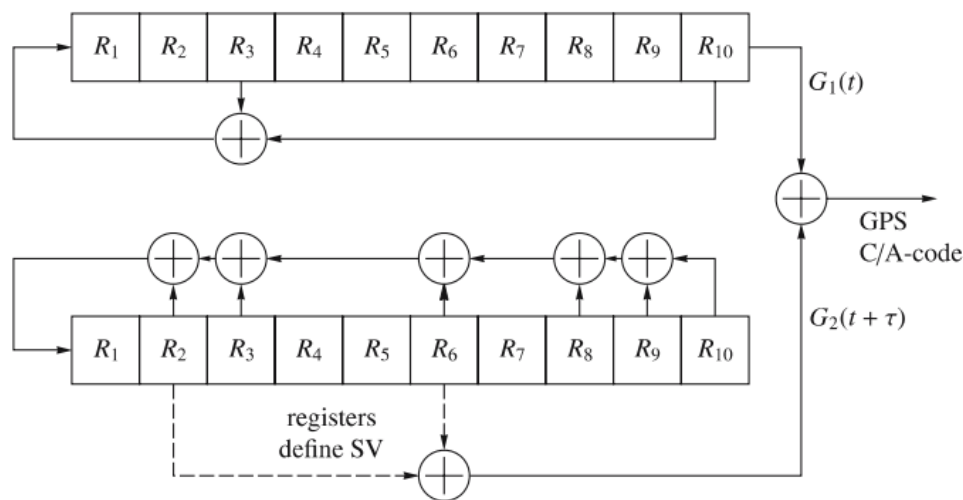


Рис.2. Формування C/A коду [2]

Сигнал передачі службової інформації являє собою двійкову послідовність з тактовою частотою 50 Гц. C/A код є основним сигналом для захвату P(Y) коду, який випромінюється в квадратурі з ним.

Захищений сигнал високої точності P(Y)

Високоточний сигнал формується за допомогою дуже довгого далекомірного коду (P-коду) і, аналогічно C/A коду, має бінарну фазову модуляцію. P-код має високу частоту слідування символів далекомірного коду рівну 10.23 МГц. Реальна довжина P-коду становить один тиждень, тому що щотижня відбувається скидання генераторів в початковий стан. В системі GPS реалізовано закриття прийому P-коду для цивільних споживачів. Для цього введено спеціальний зашифрований Y-код, який представляє собою закриття P-коду за допомогою множення на невідомий W-код. Таким чином, захоплення P(Y) коду можливе тільки для ліцензованих споживачів, що володіють спеціальним ключем, який дозволяє забезпечити захист навігаційної апаратури споживачів від дезінформуючих завад (anti-spoofing).

Для захвату P-коду використовується спеціальна інформація (Z-відліки) в складі службової інформації навігаційного повідомлення в формі ключового слова HOW, і при прийомі C/A коду використовується як апріорна інформація про фазу P-коду для зменшення часу пошуку. Коли пошук і захват C/A коду ускладнений або неможливо його захопити через

значну зашумленість ефіру, захват Р-коду можливий за допомогою спеціальних блоків швидкого пошуку сигналу, якщо відомий точний час системи GPS в навігаційній апаратурі споживачів. Р(Y) код також модулюється службовою інформацією з тактовою частотою 50 Гц [2].

Модернізований військовий сигнал М

Модернізований військовий сигнал (М-код) розроблений для військового використання і, можливо, замінить сигнал Р(Y). М-код має модуляцію з цифровою несучою (BOCsin (10,5)). Цифрова несуча – меандр, який модулює радіосигнал, вже модульований далекомірним кодом.

М код забезпечує більшу завадозахищеність, ніж Р (Y) код. Перевага М коду полягає в захищеності і спектральній ізоляції від цивільних сигналів (С/А і L1С кодів), а також в тому, що він не потребує попередньої синхронізації з С/А-кодом. Частота проходження символів далекомірного коду становить 5.115 МГц, а частота модулюючого меандра 10.23 МГц.

Захват М коду може проводитись таким чином [3]:

- по службовій інформації, отриманій з навігаційного повідомлення, через С/А або Р(Y);
- шляхом роздільного некогерентного накопичення, використовуючи модуляцію BOCsin (10,5);
- шляхом прямого пошуку за допомогою блоків швидкого пошуку.

Для серії навігаційних супутників Землі BlockIII і пізніх модифікацій потужність М-коду планується збільшувати в обмеженому регіоні шляхом використання вузькоспрямованих антенних систем, що дозволить збільшити мінімальну прийнятну потужність М-коду до мінус 138 дБВт [3].

Цивільний комерційний сигнал L1С

Цивільний сигнал L1С складається з 2 компонент: L1Ср пілотний сигнал з часовим мультиплексуванням BOC (1,1) і BOC (6,1), позначається як TMBOC, без модуляції навігаційним повідомленням і сигнал L1Cd з модуляцією BOC (1,1), який модулюється навігаційним повідомленням. Далекомірні коди L1Ср і L1Cd є періодичними послідовностями з періодом 10 мс і символною швидкістю 1.023 МГц. Довжина кодів складає 10230 символів, що відповідає періоду повторення 10 мс. Ці коди відносяться до модифікованих кодів Вейла.

Модуляція пілотного сигналу L1Ср являється TMBOC (6,1,1/11) [3]. При цьому чергування типів модуляції реалізується шляхом зміни частоти цифрової несучої, де кожний період з 33-х біт далекомірного коду модулюється несучою так, що біти з номерами 1, 5, 7 і 30 модулюються згідно із законом BOC (6,1), а усі інші біти згідно із законом BOC (1,1). Таким чином, 1/11 енергії радіосигналу L1Ср відводиться на модуляцію BOC (6,1), а 10/11 на модуляцію BOC (1,1). Компонента BOC (6,1) використовується для підвищення точності вимірів фази далекомірного коду в умовах багатопроменевого поширення сигналу і, у ряді випадків, нею можна нехтувати. Друга компонента L1Cd має звичайну модуляцію BOC (1,1). При цьому 75% енергії від загального сигналу L1С відводиться на пілотну компоненту L1Ср, а інші 25% – на сигнал з навігаційними даними L1Cd.

Алгоритми обробки навігаційного сигналу

Первинна обробка навігаційного сигналу зазвичай містить наступні операції:

- формування опорних сигналів, що відповідають далекомірним кодам супутників;
- кореляційну обробку сигналів, що приймаються;
- пошук сигналів супутників по затримці і частоті, захват на стеження і стеження за затримкою далекомірних кодів, частотою і фазою прийнятих сигналів;
- формування оцінок псевдодальності, псевдодоплерівської частоти і псевдофази;
- виділення навігаційних даних, що містяться в навігаційних супутниках;

- формування оцінок величини відношення сигнал/шум;
 - прив'язку шкали часу споживача до системної шкали часу СРНС.
- Вторинна обробка навігаційного сигналу припускає:
- декодування навігаційної інформації (телеметрії, альманахів і ефемерид);
 - формування оцінок координат носія навігаційної апаратури споживача і складових вектора його швидкості;
 - комплексування навігаційної апаратури споживача з іншими засобами навігації (наприклад, з інерціальними);
 - обмін інформацією із споживачем.

Алгоритми пошуку і захвату навігаційного сигналу

Пошук і захват навігаційного сигналу на супровід схемами стеження за фазою, частотою і затримкою огинаючої далекомірного коду багато в чому залежить від апріорної інформації про своє місце розташування, цілісності СРНС і продуктивності навігаційної апаратури споживача.

У режимі пошуку використовуються квадратурні складові I_p , Q_p , а задача пошуку сигналу в елементарному осередку пошуку вирішується у відповідності з алгоритмом:

$$I_p^2 + Q_p^2 \geq h, \quad (1)$$

де h – поріг, вибраний з умови забезпечення заданої вірогідності правильного виявлення (D) і вірогідності помилкової тривоги (F). Зона пошуку сигналу розбивається на множину осередків, кожному з яких відповідає сигнал зі своїм поєднанням частоти і затримки огинаючої далекомірного коду. Крок пошуку зазвичай дорівнює половині тривалості символу далекомірного коду. Крок пошуку по частоті залежить від часу когерентного накопичення сигналу в кореляторі, тому кількість каналів пошуку по частоті пропорційна часу когерентного накопичення сигналу.

Види пошуку можна розділити залежно від способу перегляду зони пошуку на паралельний, послідовний і паралельно-послідовний. Нині поширеною практикою є створення спеціальних блоків пошуку. З появою блоків пошуку відбувся поділ різновидів каналів кореляторів.

Традиційний канал корелятора, призначений для стеження за сигналом, потребує досить велику кількість ресурсів для реалізації. Тому каналів супроводу в приймачах зазвичай небагато, від декількох десятків до пари сотень. Канали блоку пошуку побудовані інакше. Управління кожним окремим каналом блоку пошуку неможливе. Усі канали блоку пошуку налаштовуються на аналіз певної області по затримці і частоті, параметри опорних сигналів в каналах блоку пошуку взаємозв'язані. Це дозволяє застосувати різні схеми спрощення алгоритму і істотно заощадити на апаратних ресурсах.

В результаті кількість каналів корелятора в апаратних блоках пошуку виявляється істотно більшою, ніж каналів супроводу. Це дозволяє реалізувати паралельний або близький до нього послідовно-паралельний пошук сигналу. Таким чином, модуль прийому і обробки навігаційних сигналів реалізується у вигляді мікроборки, до складу якої входять: навігаційний процесор з каналами стеження, блок швидкого пошуку сигналів, оперативний і постійний запам'ятовуючий пристрій.

Найбільш поширені блоки пошуку:

- послідовний на кореляторах, що використовуються для стеження за параметрами навігаційних сигналів. Використання кореляторів з 3, 5, 7 гілками дозволяє збільшити швидкість аналізу осередків в пропорційне число разів. Зазвичай число кореляторів для стеження не перевищує 100 – 200 шт.

- паралельний пошук на паралельних кореляторах – блоки швидкого пошуку. Сучасні блоки швидкого пошуку сигналів мають кількість еквівалентних кореляторів понад 1 млн.

Час накопичення фрагмента навігаційного сигналу

Традиційне завдання пошуку сигналу передбачає, що необхідно провести пошук в певній області частоти і затримки огинаючої сигналу із заданим відношенням сигнал/шум. З точки зору чутливості, характеристики алгоритму пошуку залежать від часу накопичення сигналу в кореляторі. Для підвищення чутливості, а, отже, і завадостійкості приймача, використовують наступні способи збільшення відношення сигнал/шум:

- некогерентне підсумовування, полягає в некогерентному підсумовуванні відліків сигналу I і Q . При збільшенні тривалості некогерентного накопичення в два рази виграш по відношенню сигнал/шум складає 2 дБ. Але крок пошуку по частоті в цьому випадку не змінюється, тому кількість каналів пошуку по частоті збільшувати не потрібно.

$$\sum_{i=1}^N I_i^2 + Q_i^2 \geq h, \quad (2)$$

- когерентно-некогерентне, полягає у збільшенні часу когерентного накопичення з подальшим некогерентним підсумовуванням вихідних відліків сигналу I і Q . При збільшенні тривалості когерентного накопичення в два рази виграш по відношенню сигнал/шум складає 3 дБ. Проте в той же час крок пошуку по частоті при цьому скорочується в два рази. Таким чином, кількість каналів пошуку необхідно збільшити в два рази, що збільшує час пошуку.

$$\sum_{i=1}^N (\sum_{i=1}^{Mk} I_i^2 + \sum_{i=1}^{Mk} Q_i^2) \geq h \quad (3)$$

- когерентне накопичення шляхом прямого збільшення часу накопичення. У системах GPS і Galileo наявна модуляція навігаційним повідомленням, яка не дозволяє накопичувати сигнал на тривалості більше, ніж тривалість символу навігаційного повідомлення (зазвичай 20 мс). Проте, якщо в попередньому сеансі прийому навігаційна інформація була отримана повністю, то можна передбачити моменти часу, коли очікується наступна зміна символу навігаційного повідомлення, і шляхом інверсії вхідного сигналу накопичувати когерентно на тривалішому інтервалі часу.

Висновки

В сучасних умовах, коли в складі навігаційної апаратури споживачів СРНС застосовуються ефективні засоби завадозахищеності, актуальною задачею є вдосконалення методів радіоподавлення сигналів GPS і навігаційної апаратури споживачів.

Основними завданнями протидії навігаційній апаратурі споживачів СРНС є:

- протидія супутниковій навігації небезпечних об'єктів (терористів, розвідувальних і ударних безпілотних літальних апаратів тощо);
- захист об'єктів від засобів розвідки і ураження, які використовують навігаційні засоби СРНС (об'єктовий захист);
- захист території (створення протяжних суцільних зон радіоподавлення з метою захисту певної кількості об'єктів).

Список літератури:

1. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. / В.С. Яценков – М: Горячая линия-Телеком, 2005. – 272 с.
2. Hofmann-Wellenhof, B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more. / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtegger, E. Walse – SpringerWeinNewYork, 2008. – 516 p.
3. Interface Specification IS-GPS-200 (Updated Apr 2018) (URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/>), [Электронный ресурс], доступ: свободный (дата обращения 12.03.2019).