

1. Загальні принципи побудови радіонавігаційних систем

Під *радіонавігацією* розуміють область науки та техніки, яка охоплює радіотехнічні методи та засоби отримання інформації про положення та рух, а також керування рухомими об'єктами.

Радіонавігаційні РТС призначені для інформаційного забезпечення точного переміщення рухомого об'єкта за визначеною траєкторією та його точного виводу до заданого пункту в призначений час оптимальним для даних умов способом.

При вирішенні навігаційних задач переміщення об'єкта повинно виконуватись за визначеною траєкторією. Проекцію траєкторії польоту на земну поверхню називають *лінією шляху*. Траєкторія складається із сукупності точок, у яких послідовно повинен знаходитись об'єкт. Точку, у якій знаходиться рухомий об'єкт, називають його *місцезнаходженням (МЗ)* [9].

Геометричну величину або її похідну за часом, яка використовується для визначення МЗ та швидкості об'єктів, називають *радіонавігаційним параметром (РНП)*. Як РНП виступає відстань, сума чи різниця відстаней, кут чи швидкість. Геометричне місце точок, що відповідають одному й тому ж значенню РНП в просторі, називається *поверхнею*, а на площині – *лінією положення*.

Сукупність радіоелектронної апаратури, яка дозволяє визначити РНП, називають *радіонавігаційним пристроєм. Радіонавігаційною системою (РНС)* називається сукупність взаємозв'язаних бортових та наземних радіотехнічних засобів, яка призначена для здійснення самостійного виміру навігаційних параметрів при сумісній з наземними засобами роботі.

Класифікація та коротка характеристика основних типів РНС подана у табл. 6.

Таблиця 6

Класифікація та характеристика основних типів РНС

| Ознака | Тип РНС | Коротка характеристика |
|----------------------------------|-------------|--|
| Тип радіонавігаційних вимірювань | Частотні | Проводять вимір частоти Доплера для визначення РНП |
| | Фазові | Здійснюють вимір поточної фази сигналів для визначення РНП |
| | Амплітудні | Для визначення РНП вони використовують амплітуду прийнятих сигналів. Вони проводять вимір за максимумом, мінімумом, різницею та відношенням амплітуд прийнятих сигналів. |
| | Кореляційні | Для визначення РНП використовують вимір взаємкореляційної функції шумоподібних сигналів |
| | Часові | Для визначення РНП використовують часові параметри сигналів |

| Ознака | Тип РНС | Коротка характеристика |
|---------------------------|----------------------------|---|
| Функціональне призначення | Приземлення | Призначені для забезпечення приземлення літальних апаратів |
| | Причалювання та стикування | Використовуються при стикуванні та причалюванні космічних апаратів |
| | Місцевизначення | Для визначення МЗ ОС використовується метод розрахунку шляху, який полягає в інтегруванні похідних вектора швидкості. |
| | | Використовуються оглядно-порівняльні методи визначення МЗ ОС. Вони полягають у порівнянні зображень місцевості та вимірів полів Землі з відповідними картами та полями |
| | | У позиційних РНС МЗ ОС визначається як точка перетину ліній або поверхонь положення. Для визначення ліній чи поверхонь положення використовуються виміри дальностей, різниць дальностей, кутів, суми дальностей |

Продовження табл. 6

| Ознака | Тип РНС | Коротка характеристика |
|--|-----------------------------|--|
| Функціональне призначення | Попередження зіткнення | Застосовуються в місцях з інтенсивним рухом об'єктів та поблизу аеродромів для попередження їх зіткнень |
| | Управління повітряним рухом | Використовуються як складові систем управління для забезпечення управління повітряними літальними апаратами |
| Радіонавігаційний параметр, який вимірюється | Далекомірні | Для визначення МЗ ОС використовують як РНП дальність. Поділяються на далекомірні РНС без відповідача, з відповідачем, радіовисотоміри. У РНС без відповідача визначення дальності проводиться без сигналу запиту від ОС. Якщо відповідний сигнал формується тільки при отриманні запитного сигналу від ОС, то такі РНС є далекомірними з відповідачем. У радіовисотомірах як РНП виступає подвоєна висота літального апарату над поверхнею Землі |
| | Сумарно-далекомірні | Для визначення МЗ ОС використовують як РНП суму дальностей |

Продовження табл. 6

| Ознака | Тип РНС | Коротка характеристика |
|--------|-----------------------|---|
| | Кутомірні | У радіопеленгаторній РНС на борту ОС знаходиться <i>радіопеленгатор</i> зі спрямованою ДСА. ОС визначається напрямком на джерело електромагнітного випромінення (ЕМВ), яке називається <i>радіомаяком</i> . Радіомаяк має не спрямовану ДСА |
| | | У радіомаячній РНС спрямованою є антена радіомаяка. Пеленгатор ОС має неспрямовану ДСА |
| | | Радіогоризонти визначають кути відхилення осей літального апарату від визначених зірок за випроміненням останніх. |
| | Вимірювання швидкості | Для визначення МЗ ОС використовують як РНП складові вектора швидкості. |
| | Комбіновані | Для визначення МЗ ОС використовують декілька видів РНП, наприклад, виміри кутів та дальності, кутів та різниць дальностей та інше |

Закінчення табл. 6

| Ознака | Тип РНС | Коротка характеристика |
|-----------------------------------|----------------------|---|
| Місцерозташування опорних станцій | Космічного базування | Використовуються як опорні станції, відносно яких проводяться виміри ШСЗ |
| | Наземного базування | Всі опорні станції, відносно яких проводяться виміри, знаходяться на поверхні Землі |
| Дальність дії | Ближньої навігації | Дальність дії до 500 км |
| | Дальньої навігації | Дальність дії до 10000 км |
| | Глобальні | Дальність дії більше за 10000 км |
| | Космічні | Дальність дії виходить за межі планети Земля |

Визначення МЗ в РНС може бути виконано за поверхнями та лініями положення. В просторі МЗ об'єкта знаходиться як точка перетину трьох поверхонь положення, кожна з яких відповідає вимірюваному параметру (на площині – двох). Розглянемо принципи побудови основних типів РНС.

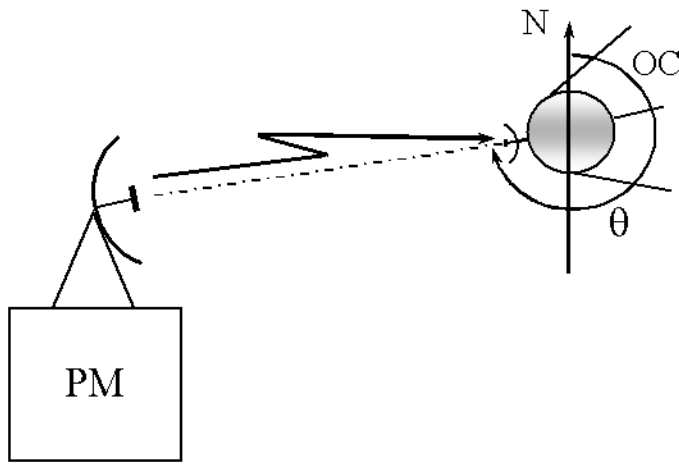


Рис. 26. Структура кутомірної (беззапитної) РНС :
 θ – кут (азимут), який відраховується від напрямку на Північ (N)

Апаратура РНС може розміщуватись в одному пункті або в декількох опорних точках, які називають *радіонавігаційними точками* (РНТ). Апаратура може знаходитись як на Землі, так і на борту літального апарата. В останньому випадку кажуть про рухому РНТ. Відстань

між РНТ чи рознесеними антенами називають **базою**. На рис. 26 зображена беззапитна РНС, у якої РНТ (радіомаяк) знаходяться на поверхні Землі. При цьому визначення РНП здійснюється за сигналом, який випромінює радіомаяк (PM). В окремих системах PM здійснює постійне випромінювання, таким чином здійснюється *беззапитна система* (рис. 26). В тому випадку, коли PM випромінює сигнал-відповідь (СВ) тільки при прийнятті сигналу-запиту (СЗ) від об'єкта, реалізується *РНС запитом (запитно-відповідна)* (рис. 27). Визначення параметрів здійснюється радіонавігаційною апаратурою, яка знаходиться на борту об'єкта (OC на рис. 26 та рис. 27). Беззапитні системи характерні для кутомірних РНС. При цьому відбувається визначення *пеленгу* об'єкта (кута θ між опорним напрямком та напрямком на OC рис. 26 та рис. 27). На рис. 26 показано визначення пеленгу у точці знаходження OC. У цьому випадку пеленг вважається *зворотним*. На рис. 27 показано визначення пеленгу OC в точці знаходження PM. Такий пеленг називається *істинним*. Відлік пеленгу проводиться відносно обраного опорного напрямку. За такий напрямок звичайно обирають напрямком на північ (N). Пеленг визначається часовим чи фазовим методом, які детально будуть розглянуті далі.

Наявність активного сигналу відповідача характерно для далекомірних РНС. У таких РНС корисна інформація знаходиться в часі запізнення приходу відповідного сигналу відносно часу його випромінювання. Відповідач у цьому випадку ретранслює (перевипромінює) з визначеною затримкою прийнятий запитний імпульс (СЗ). Час затримки відомий запитнику. Такі системи називають *часовими*.

В кутомірно-далекомірних РНС (рис. 27) відбувається визначення

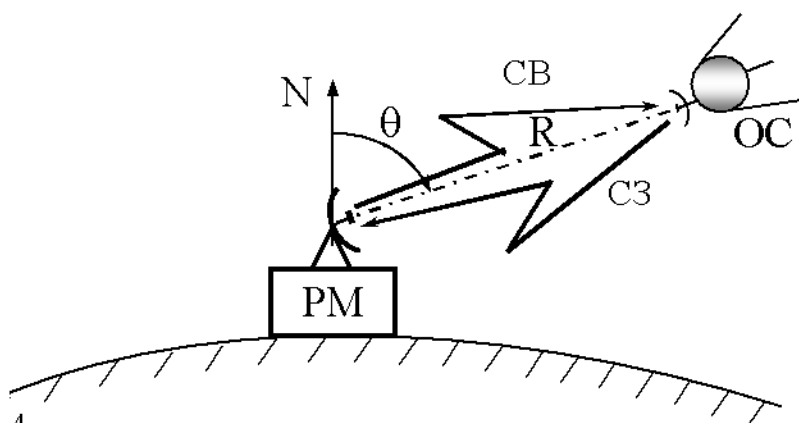


Рис. 27. Структура запитно-відповідної РНС

пеленгу θ та дальності (R). Така система найчастіше використовує запитно-відповідний принцип роботи для визначення дальності та беззапитний – кутової координати.

При реалізації різницево – далекомірного

методу (рис. 28) як РНП виступає різниця дальностей, яка знаходиться за виміром різниць часів запізнення сигналів від двох РНТ. Геометричним місцем точок у таких системах є гіпербола (на рис. 28) показані дві гіперболи: $\Delta R_{12} = \text{const}$ та $\Delta R_{23} = \text{const}$, де $\Delta R_{12} = R_2 - R_1$, $\Delta R_{23} = R_3 - R_2$) на площині чи гіперболоїд обертання – для простору. МЗ ОС визначається як точка перетину гіпербол чи трьох гіперболоїдів.

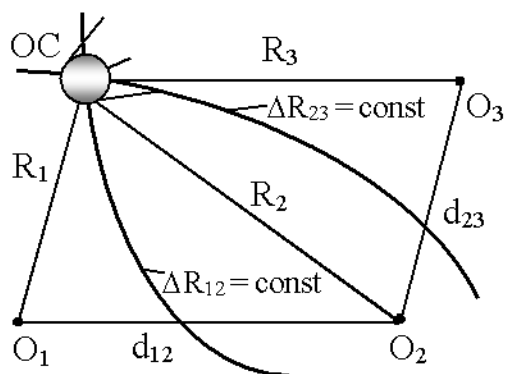


Рис. 28. Розташування РНТ у різницево-далекомірній РНС

дозволяє отримати лінію положення на земній поверхні $\Delta R_{12} = \text{const}$. Для знаходження об'єктів необхідна друга пара станцій O_2, O_3 , яка дозволяє отримати другу лінію положення $\Delta R_{23} = \text{const}$. База другої пари d_{23} повинна бути розташована під кутом до бази d_{12} першої пари. Станцію O_2 називають головною, оскільки вона є загальною і синхронізує роботу двох інших станцій O_1 та O_3 , які називають провідними.

У системах ближньої навігації використовується кутомірний, далекомірний та кутомірно - далекомірний методи визначення координат об'єктів. Вони складаються з мережі РМ на Землі та бортового обладнання, що дозволяє виділити інформацію на борту об'єкта відносно РМ.

Системи дальньої навігації забезпечують дальню навігацію споживачів і засновані на різницево – далекомірному методі навігаційних визначень.

В супутникових РНС вимірюються навігаційні параметри (дальність, радіальна швидкість, кутові координати), які є функціями різниці координат навігаційного штучного супутника Землі (ШСЗ) та об'єкта. Особливістю будь-якої супутникової РНС є двоетапність її роботи.

На першому етапі за даними траєкторних вимірів для фіксованого моменту часу визначаються початкові параметри орбіти навігаційного ШСЗ та прогнозується його рух. **На другому етапі** за допомогою бортової ЕОМ споживача визначається його МЗ та вектор швидкості (рис. 29).

Вимірювання дальності та радіальної швидкості у сучасних супутникових РНС проводиться беззапитним методом. При цьому проводиться оцінка часу розповсюдження сигналу, що випромінюється ШСЗ, та доплерівського зсуву частоти сигналу, що приймають. Реалізація цих методів вимагає синхронізації бортових еталонів частоти і часу навігаційних ШСЗ між собою.

До складу сигналу, що випромінюється ШСЗ, входять дані про параметри руху навігаційного ШСЗ – орбіти (по поверхні Землі – ефемериди). На основі

цих даних споживач визначає координати ШСЗ у момент випромінення.

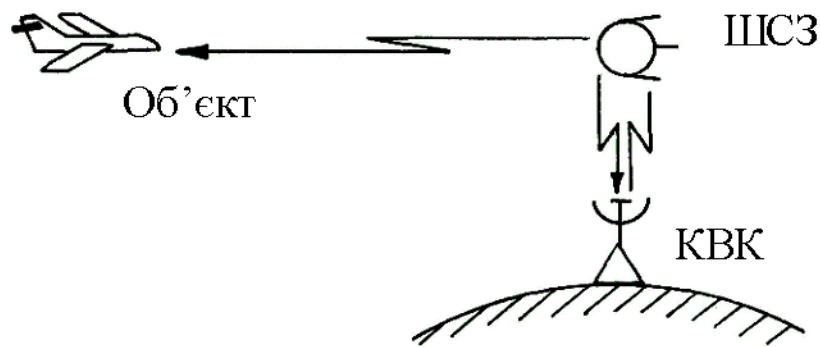


Рис. 29. Принцип роботи супутникової РНС

Синхронізація бортового годинника та еталонів частоти навігаційних ШСЗ здійснюється наземним командно-вимірювальним комплексом (КВК). Отримані параметри траєкторії руху ШСЗ передаються за лініями зв'язку на його борт у запам'ятовувальний пристрій ЕОМ. Звідти дані у складі радіонавігаційного сигналу (НГС) передаються споживачам. Радіонавігаційний пристрій об'єкта, який знаходиться в зоні прямої видимості ШСЗ, приймає НГС, вимірює його параметри, виділяє ефемеридну інформацію за допомогою бортової ЕОМ та визначає МЗ об'єкта.

2. Методивизначення місцезнаходження об'єктів

Методи визначення місцезнаходження об'єктів можна поділити на такі:

1. *Оглядно-порівняльні* (візуальне орієнтування; порівняння телевізійних, радіолокаційних та інших зображень місцевості з відповідними картами; кореляційно – екстремальні – за фізичними полями Землі).
2. *Позиційні* (методи ліній або поверхонь положення).
3. *Методи обчислення шляху* (доплерівські, інерційні, повітряні та їх комбінації).

Оглядно-порівняльні методи оснований на визначенні структури будь-якого фізичного поля, характерного для даної місцевості, і порівнянні параметрів цього поля з параметрами, які були введені в запам'ятовуючий пристрій РТС.

Перевагами даних методів є автономність, слабкий вплив перешкод, відсутність помилок, що накопичуються при визначенні МЗ ОС. *До недоліків* можна віднести неможливість визначення місцезнаходження при поганих метеоумовах і безорієнтованій місцевості, а також демаскування РТС у випадку використання випромінювача.

Позиційні методи засновані на визначенні МЗ ОС шляхом засічок, які представляють собою точку перетину двох та більше ліній (поверхонь) положення відносно відомих точок. При невеликій висоті ОС, коли $R_{oc} > 10 H$, де H – висота ОС над поверхнею Землі, визначення МЗ зводять до площинного випадку.

До переваг позиційних методів відноситься те, що визначення МЗ

проводиться без знання шляху, який пройшов ОС до цього. Недоліками методів є дискретність у фіксації МЗ ОС та можливість визначення координат тільки у робочій зоні РТС, тобто – неавтономність.

Обчисленням шляху називають метод визначення координат МЗ ОС, заснований на обчисленні шляху, який пройдено, відносно відомого початкового положення ОС. При цьому шлях, який пройшов ОС, обчислюється двократним інтегруванням прискорення чи однократним – швидкості за часом, які повинні бути відомі.

Перевагами методу є простота, незалежність від метеоумов та орієнтирів (автономність). До недоліків можна віднести зростання помилок визначення МЗ ОС у часі.

2.1. Позиційні методи визначення МЗ ОС

Далекомірний метод

Для визначення необхідно отримання 3-х вимірювань параметрів чи у один, чи у різні моменти часу – для простору, двох – для площини. При цьому, геометричне місце точок, які відповідають однаковим значенням параметра, називають поверхнею положення – для простору чи лінією положення – для площини.

Далекомірний метод заснований на вимірюванні 3-х дальностей R_i від ОС до трьох точок з відомими координатами. У радіонавігації як третя дальність може бути використана висота польоту ОС (рис. 30).

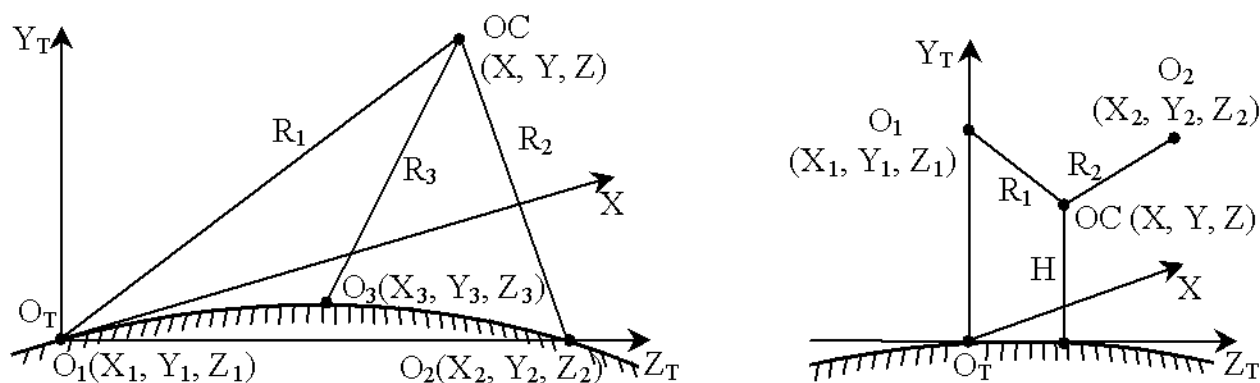


Рис. 30. Визначення МЗ ОС далекомірним методом

Координати ОС у прямокутній СК визначаються як результат рішення системи з трьох рівнянь

$$R_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2}, \quad i = \overline{1,3},$$

де X_i, Y_i, Z_i – відомі координати опорних точок.

Поверхні положення представляють собою три сфери радіусом R_i з центрами у опорних точках O_i . Лінії положення на площині – кола (рис. 31). Як опорні точки використовуються РЛС чи радіомаяки, які можуть знаходитися як на поверхні Землі, так і на рухомих об'єктах. Відстань між опорними точками називається **базою**.

Сутність радіотехнічного методу виміру відстані між точками полягає у

вимірі часу запізнення сигналів між цими точками. За часом запізнення, який виміряно, та відомій швидкості розповсюдження радіохвиль визначається невідома відстань.

Перевагами методу є висока точність визначення МЗ, яка не залежить від відстаней до опорних точок. Застосуванням беззапитного методу виміру

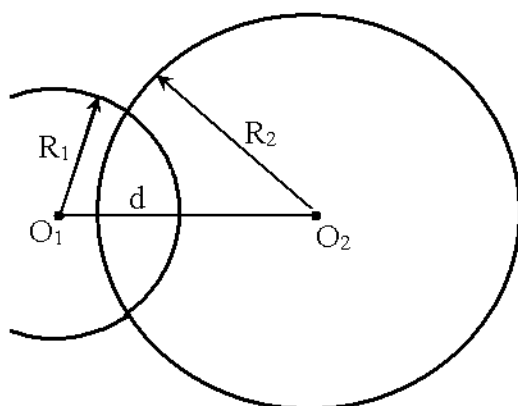


Рис. 31. Лінії положення далеко-
мірного методу визначення МЗ

дальності у радіонавігації володіє перевагою високої скритності РТС, оскільки бортове обладнання ОС не працює на випромінення, а тільки на прийом сигналу від радіомаяка. При цьому спостерігається необмежена пропускна здатність системи. Потужність наземної станції може бути обрана досить великою, у зв'язку з чим досягається досить велика дальність дії РТС. До недоліків методу можна віднести зниження пропускної здатності при використанні запитного та високі вимоги до відносної

нестабільності частоти при використанні беззапитного методів радіонавігації, а також неоднозначність у вимірюваннях. При беззапитному методі радіонавігації похибка виміру дальності значно залежить від синхронності роботи наземного радіомаяка та бортового опорного генератора ОС. За часом руху помилка у вимірі дальності за рахунок розбіжності частот генераторів зростає. Тому для зменшення цієї помилки проводиться їх періодична синхронізація та пред'являються високі вимоги до опорних генераторів (відносна нестабільність частоти повинна дорівнювати 10^{-9} - 10^{-10}). Одним з методів усунення цього недоліку є притягнення надлишкових вимірювань, які називають *квазідальностями*. Складається система рівнянь, у якій з'являється окрім невідомих дальностей, ще й невідомий час розсинхронізації. Рішення цих рівнянь дозволяє внести поправку у визначене МЗ. Такий підхід вимагає наявності додаткових радіомаяків у зоні видимості ОС. При застосуванні запитного методу виміру дальності помилка виміру дальності визначається в основному тільки нестабільністю частоти бортового опорного генератора і не залежить від часу польоту ОС. Це дозволяє значно знизити вимоги до стабільності генератора (відносна нестабільність має порядок 10^{-5}). До недоліків запитного методу виміру дальності у радіонавігації можна віднести: обмеження пропускної здатності РНС; погіршується скритність роботи системи; дальність дії обмежується можливостями бортового передавача; погіршення перешкодостійкості системи (через наявності каналів запиту та відповіді); збільшення ширини смуги пропускання (канали запиту та відповіді працюють на різних частотах).

Окрім перерахованих вище недоліків, як видно з рис. 31, лінії положення перетинаються у двох точках. Кожна з цих точок може відповідати МЗ ОС. Для усунення цього недоліку необхідно

застосовувати додаткові опорні точки. Це вимагає побудови надлишкових РЛС, що підвищує вартість РТС.

Різницево-далекомірний (гіперболічний) метод

Вимагає використання як параметри три різниці дальностей від ОС до 3-х опорних точок. При цьому координати ОС знаходяться з системи 3-х рівнянь

$$\Delta R_{ij} = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2} - \sqrt{(X_j - X)^2 + (Y_j - Y)^2 + (Z_j - Z)^2}.$$

Відомо, що геометричне місце точок, різниця відстаней яких до 2-х заданих точок (фокусів) є величиною постійною, є гіпербола. Тому лініями положення будуть гіперболи з фокусами у точках розташування приймальних пунктів, а поверхнею положення – гіперболоїд обертання. МЗ ОС на площині визначається як точка перетину гіпербол (рис. 32).

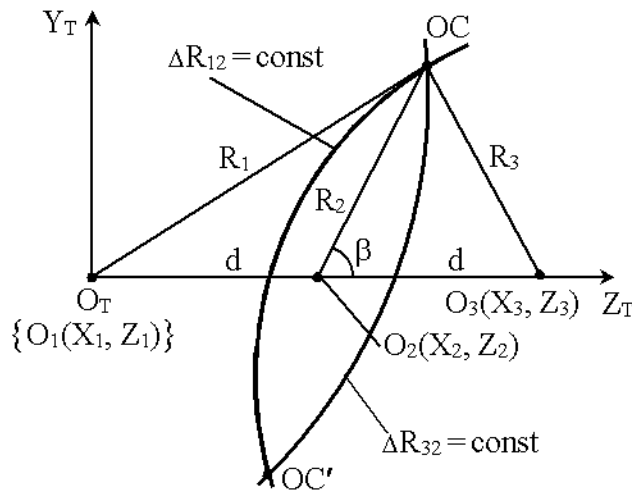


Рис. 32. Визначення МЗ ОС гіперболічним методом

Просторові координати ОС можуть бути визначені за допомогою 3-х виміряних різниць дальностей. Для цього достатньо мати три передавальні радіостанції. Сигнали, які вони випромінюють, зсунуті один відносно одного на величину бази (відстані між ними). Величину бази можна знайти, якщо координати цих передавальних станцій відомі. На ОС знаходиться спеціальний пристрій, який здійснює прийом цих сигналів та вимірювання інтервалів часу їх взаємного запізнення. Виміряні різниці часів пропорційні різниці відстаней. МЗ ОС знаходиться як

точка перетину 3-х просторових фігур – гіперболоїдів обертання.

Для забезпечення високої точності значення координат приймальні пункти необхідно розташовувати на взаємно перпендикулярних базах (d).

Розрахунок площинних сферичних координат ОС β_{oc} та R_{oc} розглянемо на прикладі, коли три приймальні пункти розташовані на одній прямій (рис. 32). У даній системі проводяться вимірювання різниць дальностей, тобто

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{12} &= R_1 - R_2; \\ \Delta R_{32} &= R_3 - R_2 \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

При використанні теореми косинусів отримаємо систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} R_1^2 &= d^2 + R_2^2 + 2dR_2 \cos \beta; \\ R_3^2 &= d^2 + R_2^2 - 2dR_2 \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

Щоб виразити через них сферичні координати, які треба знайти, перетворимо систему (6.2) до виду (підсумувавши та віднявши рівняння) :

$$\left. \begin{aligned} R_1^2 + R_3^2 &= 2(d^2 + R_2^2); \\ R_1^2 - R_3^2 &= 4dR_2 \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

При позначенні $\beta_{oc} = \beta$ та $R_{oc} = R_2$ (для площинного випадку), рішення системи (6.3) відносно невідомих β_{oc} та R_{oc} буде мати вигляд (з урахуванням виразів (6.1))

$$\left. \begin{aligned} R_{oc} &= \frac{2d^2 - \Delta R_{12}^2 - \Delta R_{32}^2}{2(\Delta R_{12} + \Delta R_{32})}; \\ \beta_{oc} &= \arccos \frac{\Delta R_{12}(d^2 - \Delta R_{32}^2) - \Delta R_{32}(d^2 - \Delta R_{12}^2)}{d(2d^2 - \Delta R_{12}^2 - \Delta R_{32}^2)} \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

Таким чином, у двовимірному випадку для визначення координат цілі необхідно не менш ніж три опорних точки, які створюють дві бази. Для просторового випадку мінімальне число баз дорівнює трьом.

До переваг методу відносять можливість використання слабкоспрямованих антен, а також високу точність оцінки МЗ ОС, яка наближається до далекомірної системи і не залежить від часу польоту ОС.

У радіонавігації великою перевагою методу є необмежена пропускна здатність. Пояснити це можна тим, що визначення МЗ проводиться на борту ОС беззапитним методом. Тому на борту ОС не треба мати власний передавач. Це дозволяє наземним станціям обслуговувати необмежену кількість ОС, які знаходяться у межах дальності дії системи.

Оскільки бортові елементи такої РНС не мають власних передавальних пристроїв, то перевагою методу є висока скритність визначення навігаційних параметрів.

Залежно від методу вимірювання часового зсуву сигналів, які приймаються ОС, розрізняють імпульсні, фазові та імпульсно – фазові різницево – далекомірні РНС, які будуть розглянуті у розділі 8.

Недоліком методу є неоднозначність визначення МЗ ОС. Вона виникає через причину парності функції $\cos\beta$:

$$\cos\beta = \cos(2\pi - \beta) = \cos(-\beta),$$

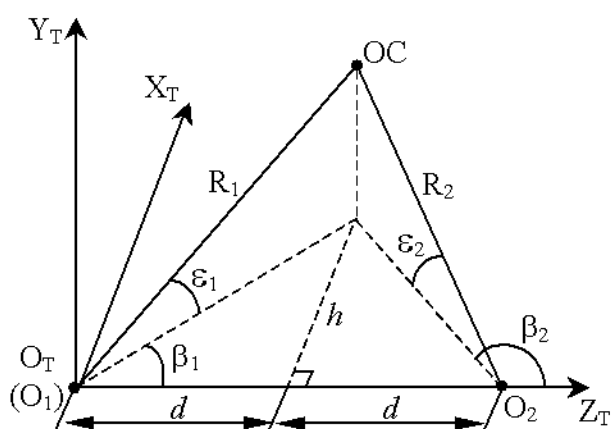
що відповідає другій точці перетину. Усунення цієї неоднозначності полягає у накладенні умови розташування 3-х пунктів не на одній прямій. Із збільшенням числа цілей число хибних перетинів збільшується. Ліквідація цього недоліку пов'язана з притягненням надлишкових вимірів. Для цього використовуються додаткові опорні точки чи покращуються спрямовані властивості антен.

Цей метод знайшов широке використання в дальній радіонавігації. При цьому вимірювання різниць відстаней проводиться ОС (споживачем), а як опорні точки використовуються радіомаяки. Для визначення просторових координат необхідна наявність, як мінімум, чотирьох опорних точок, у яких знаходяться передавальні станції. Одна з них є ведучою, яка синхронізує роботу інших трьох. У зв'язку з цим збільшується вартість системи, яка використовує

цей метод. При практичній реалізації фазових різницево – далекомірних РНС виникає складність, яка пов'язана з вирішенням двох технічних проблем: забезпеченням роздільного прийому сигналів від наземних станцій та розв'язання багатозначності фазових вимірювань.

Кутомірний (триангуляційний) метод

Він заснований на вимірюванні кутових напрямків на ОС з двох рознесених між собою опорних точок для площини і трьох – для простору. Зменшення числа опорних точок можливо за рахунок проведення у кожній вимір декількох кутових координат. Так, для визначення просторових координат ОС достатньо виміряти азимути β_1 та β_2 у двох площинах і кут місця ε – в одній.



МЗ ОС може бути знайдено і при вимірі двох кутів місця ε_1 та ε_2 у двох площинах і азимуту β – в одній (рис. 33). Лінією положення для кутів на площині є прямі, у просторі : площини – для азимутів та конуси – для кутів місця.

Знайдемо вирази для визначення МЗ ОС на площині у сферичній СК. Це буде можливо, якщо знайти вираз для

Рис. 33. Визначення МЗ ОС кутомірним методом

визначення дальності ОС, оскільки кут відомий за результатами виміру.

Для цього методу на площині справедливі наступні рівняння

$$\begin{aligned} R_1 \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 + R_2 \cos \varepsilon_2 \cos (180^\circ - \beta_2) &= d_1 + d_2 = d, \\ h = R_1 \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1 &= R_2 \cos \varepsilon_2 \sin (180^\circ - \beta_2). \end{aligned} \quad (6.5)$$

Якщо виразити з (2.32) $R_2 \times \cos \varepsilon_2$ через відомі ε_1 , β_1 та $R_1 = R_{oc}$, яку шукаємо, то отримаємо

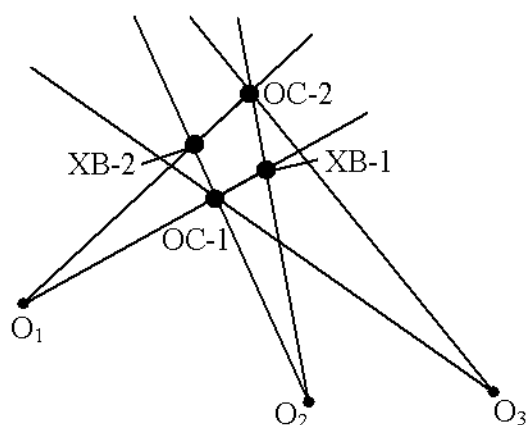
$$R_{oc} = \frac{d}{\cos \varepsilon_1 (\cos \beta_1 - \sin \beta_1 \operatorname{ctg} \beta_2)},$$

двома іншими координатами ОС є виміряні кути $\beta_1 = \beta_{oc}$ та $\varepsilon_1 = \varepsilon_{oc}$.

Перевагами кутомірного методу є можливість незалежного огляду у кожному з пунктів приймання (опорних) точках.

До недоліків даного методу відноситься те, що неодноразовість пеленгації може призвести до помилок вимірювання координат. Як правило, у РТС з найбільшою точністю вимірюється дальність, а кутові координати – значно гірше. При використанні найменш точних замірів точність визначення МЗ ОС значно гірше попередніх методів. Крім того, при збільшенні дальності до ОС лінійні помилки виміру кутової координати збільшуються.

У зв'язку з обмеженням точності визначення МЗ даним методом мова йде не про лінії та поверхні положення, а про області положення. Тому й МЗ визначається не точкою, а областю. По



мірі віддалення від опорних точок розміри області збільшуються. Вони тим більше, чим вище задана ймовірність правильного визначення МЗ ОС. Тому для уточнення МЗ ОС використовуються надлишкові виміри. Найбільші потенційні точності вимірювання при притягненні надлишкової інформації можуть бути досягнуті за рахунок статистичного аналізу. Обробка при цьому ускладню-

Рис. 34. Виникнення неоднозначності у визначенні МЗ ОС кутомірним методом

ється. Завдання ще більше ускладнюється у радіолокації, коли існує безліч ОС. На рис. 34 наведено випадок, коли у РЗ радіолокатора, який використовує кутовий метод визначення МЗ ОС, у складі 2-х приймальних пунктів прийому (т. O_1, O_2) знаходиться два ОС (ОС-1 та ОС-2). Окрім правильних, виникають ще й хибні відмітки (ХВ-1 та ХВ-2).

Складним також є завдання боротьби з хибними пеленгами, які створюються за рахунок дії перешкод за боковими пелюстками ДС приймальних антен пунктів прийому. У таких випадках необхідно збільшувати число пунктів прийому (т. O_3 на рис.34).

Тому даний метод знайшов застосування, в основному, у системах ближньої радіонавігації, де невеликі дальності, а значить, і досить точні виміри координат. В радіолокації його застосовують один чи більше кутових вимірів поряд з високоточними вимірами для зменшення числа позицій.

У радіонавігації існує два варіанти побудови кутомірних систем: радіопеленгаторний та радіомаячний.

У радіопеленгаторній системі спрямованою є антена приймача (радіопеленгатора (РП)), а передавач (радіомаяк) має неспрямовану антену. Радіопеленгатор представляє собою радіоприймальний пристрій, який призначений для виміру напрямку приходу радіохвиль. Джерелами радіохвиль виступають наземні та бортові радіопередавачі, а також джерела теплового радіовипромінювання у вигляді земних та космічних тіл. Кут, який характеризує напрямок на ОС, називається *пеленгом*. Якщо РМ та РП знаходяться у одній ПМГ, то пеленг відраховується від географічного меридіану, тобто від напрямку на північ. Такий пеленг називається *істинним*. Визначення напрямку проводиться у місці розташування РП, який може знаходитися на поверхні Землі чи на ОС. Для першого варіанту системи вимірне значення пеленга передають на борт ОС. У другому – вимір пеленга проводиться безпосередньо на ОС.

Радіомаячна система вимагає спрямовану антену на РМ та неспрямовану – на РП. РП знаходиться на ОС. У такій системі вимірюється кут на ОС у точці розташування РМ, який називається *зворотним пеленгом*. Часто використовують РМ з двома антенами – рухомою та нерухомою. Рухома антена обертається навкруги осі. У момент збігання антени з опорним напрямком (напрямком на північ) неспрямована антена РМ випромінює нульовий (північний) сигнал. ОС приймає цей сигнал і формує початок відліку пеленга. При фіксації моменту надходження імпульсів від антени, що рухається, та відомій її кутовій швидкості обертання, можна знайти значення зворотного пеленга. Його значення буде пропорційне часу між прийомом нульового сигналу та сигналу у момент пеленга. У цьому випадку приймач значно спрощується, що є дуже важливим при його розташуванні на борту ОС.

Кутомірно-різничево-далекомірний метод

Даний метод є комбінацією двох однойменних, які були розглянуті вище.

При його використанні достатньо мати два пункти прийому для визначення просторових координат (рис. 35). В одному з пунктів використовується гостроспрямована антена (точка O_1). Результатами вимірювань є кутові координати ε_1, β_1 ОС у точці O_1 і різниця відстаней $\Delta R_{12} = R_1 - R_2$.

МЗ ОС визначається як точка перетину площини чи конуса та гіперболоїда.

Завдання полягає у визначенні дальності $R_1 = R_{oc}$. Для цього з прямокутного трикутника $O_1ЦОС$ визначимо висоту

$$h = R_1 \sin \varepsilon_1, \quad (6.6)$$

а з трикутника $O_2ОСЦ$

$$R_2^2 = h^2 + O_2Ц^2. \quad (6.7)$$

За теоремою косинусів

$$\left. \begin{aligned} O_2Ц^2 &= d^2 + R_1^2 \cos^2 \varepsilon_1 - \\ &- 2dR_1 \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 \end{aligned} \right\} \dots \quad (6.8)$$

При підставленні виразів (6.6) та (6.7) у (6.8) отримаємо

$$R_2^2 = R_1^2 \sin^2 \varepsilon_1 + d^2 + R_1^2 \cos^2 \varepsilon_1 - 2dR_1 \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1. \quad (6.9)$$

При врахуванні того, що $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$ отримаємо

$$R_1^2 - R_2^2 + d^2 - 2dR_1 \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 = 0.$$

При розкритті виразу для різниці квадратів ($R_1^2 - R_2^2$) та при заміні R_2 через ΔR_{12} , отримаємо розв'язання рівняння (6.9) при $R_{oc} = R_1$ у вигляді

$$R_{oc} = \frac{\Delta R_{12}^2 - d^2}{2[\Delta R_{12} - d \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1]}. \quad (6.10)$$

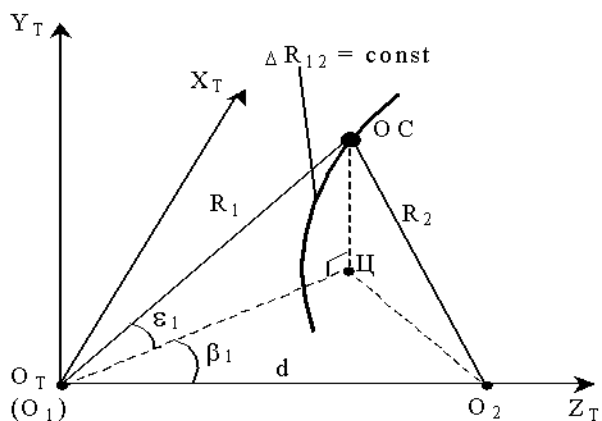


Рис. 35. Визначення МЗ ОС кутомірно – різницево – далекомірним методом

У зв'язку з тим, що даний метод є комбінацією двох розглянутих, то його перевагами є мінімізація числа приймальних позицій при ототоженні інформації (відповідність вимірювань цілям). Однак точність менша, ніж різницево–далеко–мірного, що і є недоліком цього методу. Тому цей метод знайшов застосування у системах ближньої навігації.

2.2. Точність визначення координат об'єктів спостереження позиційними методами

МЗ ОС позиційним методом визначається як точка перетину двох чи більше ліній положення. Похибки, що з'являються при визначенні кожної лінії положення, приводять до того, що обчислене МЗ об'єкта відрізняється від справжнього.

Вважається, що похибки вимірювань, згідно з центральною граничною теоремою, мають гауссівський закон розподілу. При цьому основною мірою точності є середньоквадратичне значення відхилення (СКВ) похибки вимірювання параметру. На практиці точність РТС часто характеризують граничною похибкою, яка характеризує область, всередині якої 99,7 % всіх вимірів мають значення, що не перевищує 3σ .

Похибка визначення лінії положення будь-якого позиційного методу оцінюється відрізком нормалі ℓ між лініями (поверхнями) положення, що відповідають істинному та виміряному значенням РНП.

Рівняння РНП у прямокутній СК буде мати вигляд: $p = p(x, y, z)$ – в просторі і $p = p(x, z)$ – на площині. Таким чином, є дво- або тривимірні скалярні поля параметра p . В межах робочих зон функція $p(x, y, z)$ ($p(x, y)$) неперервна і диференційована. Тому вимірювання скалярного поля параметра p зручно описати градієнтом, який є вектором, що показує напрямок його найшвидшого росту.

Якщо \vec{I} – одиничний вектор, спрямований вздовж нормалі до поверхні (лінії) положення в бік росту p , то скалярний добуток дорівнює $\vec{I} \times \text{grad} p = \partial p / \partial \ell$.

Модуль градієнта $g = |\text{grad} p| = |\partial p / \partial \ell|$ дозволяє зв'язати похибку вимірювання параметра Δp з похибкою фіксації поверхонь (ліній) положення $\Delta \ell$. Похибка виміру параметра Δp пов'язана з похибкою фіксації поверхні положення $\Delta \ell$ виразом

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta p}{g}.$$

Це рівняння показує, що з ростом точності вимірів і модуля градієнта поля збільшується точність визначення МЗ.

Для аналітично заданих функцій $p(x, y, z)$ ($p(x, y)$) модуль градієнта для поверхні положення

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2}$$

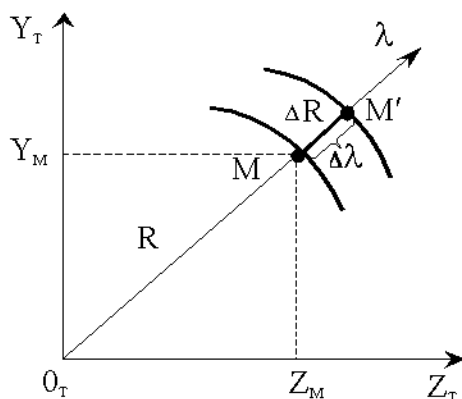
для ліній

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2} . \quad (6.11)$$

З використанням співвідношення (6.11), знайдемо похибку вимірювання ліній положення для основних методів МЗ.

Похибка визначення лінії положення далекомірним методом

У далекомірних системах вимірюється час запізнення сигналу τ_3 , що зв'язаний з параметром – дальністю співвідношенням $R=C\tau_3$ або $R=C\tau_3/2$ – для радіоліній I чи III родів відповідно.



При вимірюванні дальності лінії положення мають форму кіл радіусом R (рис. 36). РТС (РМ) розташована в т. O_T , а ОС в т. M . Знайдемо СКВ визначення лінії положення σ_λ при похибці вимірювання дальності ΔR . У сферичній місцевій СК

$$R = \sqrt{Y_M^2 + Z_M^2}, p=R.$$

Згідно з виразом (6.11) градієнт буде визначатися

Рис. 36. Похибка визначення лінії положення далекомірним методом

$g_R = \text{grad}R = 1$ і $\Delta\lambda = \Delta R$. При переході до СКВ похибок, отримаємо наступний вираз

$$\sigma_\lambda = \sigma_R = \frac{C\sigma_\tau}{2},$$

де σ_R – середньоквадратичне значення похибки (СКВ) вимірювань дальності (R), σ_τ – СКВ часової затримки сигналу τ_3 , C – швидкість розповсюдження радіохвиль.

Похибка визначення лінії положення кутомірним методом

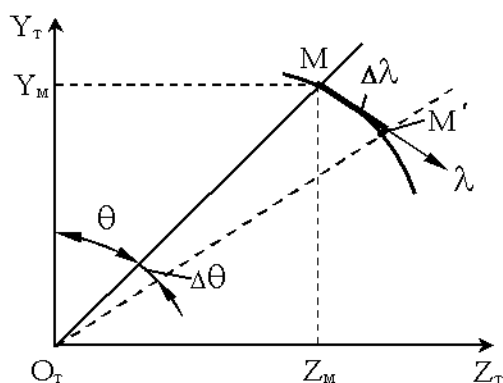


Рис. 37. Похибка визначення лінії положення кутомірним методом

В кутомірних РТС вимірюваним параметром є кут θ (рис.37), а похибка його вимірювання $\Delta\theta$. Лінією положення буде пряма $O_T M$. Знайдемо СКВ визначення лінії положення σ_λ . При $P = \theta = \arctg(Z_M/Y_M)$. З урахуванням виразу (6.11) отримуємо

$$g_\theta = |\text{grad } \theta| = \frac{1}{\sqrt{Z_M^2 + Y_M^2}} = \frac{1}{R}$$

Тоді

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\theta}{g_\theta} = R \Delta\theta \text{ і, відповідно,}$$

$$\sigma_\lambda = R \sigma_\theta$$

Звідти випливає, що в кутомірній РТС СКВ σ_λ при постійному значенні σ_θ пропорційна дальності R до ОС.

Похибка визначення лінії положення різницево-далекомірним методом

Різницево - далекомірні РТС визначають параметр у вигляді різниці відстаней $p = R_A - R_B = R_p$ (рис. 38) від ОС до двох опорних точок А та В з базою між ними d .

Тут лінія положення – гіпербола, а Ψ – кут, під яким із точки М, у якій розташований об'єкт, помітна база. З рис. 38 отримуємо вираз

$$R_p = \sqrt{\frac{(Z_M + d/2)^2 + Y_M^2}{R_A}} - \sqrt{\frac{(d/2 - Z_M)^2 + Y_M^2}{R_B}}$$

Тоді з урахуванням виразу (6.11) маємо

$$|\text{grad } R_p| = \sqrt{2 \left(1 - \frac{Z_M^2 + Y_M^2 - d^2/4}{R_A R_B} \right)} = \sqrt{2 \left(1 - \frac{R_A^2 + R_B^2 - d^2}{2 R_A R_B} \right)} \quad (6.12)$$

З трикутника АМВ $R_A^2 + R_B^2 - d^2 = 2 R_A R_B \cos \Psi$ (за теоремою косинусів $d^2 = R_A^2 + R_B^2 - 2 R_A R_B \cos \Psi$). Дане співвідношення підставимо у вираз (6.12) і отримаємо, при врахуванні тригонометричних перетворень,

$$|\text{grad } R_p| = \sqrt{2(1 - \cos \psi)} = 2 \sin(0,5 \psi)$$

Тоді лінійне зміщення лінії положення (гіперболи), викликане похибкою вимірювання різниці відстаней R_p ,

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta R_p}{2 \sin \Psi/2} \quad (6.13)$$

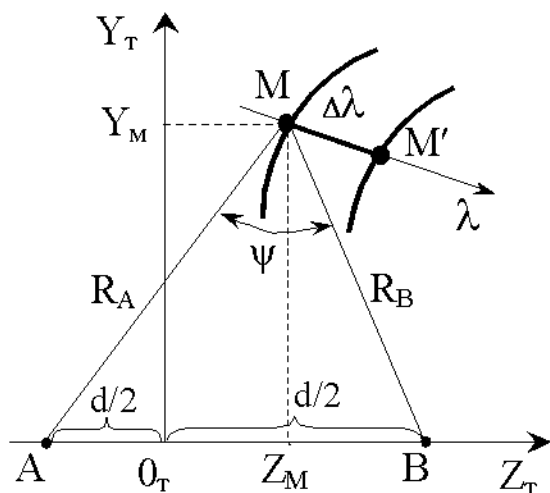


Рис. 38. Похибка визначення лінії положення різницево-далекомірним методом

В різницево-далекомірних РТС СКВ лінійного зміщення σ_ϵ залежить від помилок вимірювання часу затримки σ_τ і кута Ψ .

Максимальна точність досягається при $\Psi = \pi$ ($\sin \Psi/2 = 1$), тобто, коли об'єкт знаходиться безпосередньо над базою системи. При цьому $\sigma_\epsilon = C\sigma_\tau/2$ мінімальна і дорівнює СКВ далекомірної системи. При віддаленні об'єкта від бази похибка зростає обернено пропорційно $\sin \Psi/2$. Для одного і того ж віддалення ОС від центра бази похибка σ_ϵ тим менше, чим більша база РТС (відбувається зростання кута Ψ). При цьому мінімальне значення σ_ϵ спостерігається на нормалі до центру бази.

Отже, радіостанції необхідно розміщувати таким чином, щоб у робочій зоні системи кут Ψ був за можливістью більший.

2.3. Радіальна похибка визначення МЗ ОС позиційними методами

При використанні позиційного методу МЗ об'єкта визначається як точка перетину двох чи більше ліній положення різних сімейств. Похибки, які виникають при визначенні кожної лінії положення (які розглядалися раніше), призводять до того, що розраховане МЗ ОС відрізняється від справжнього.

Припущення, при яких буде розв'язуватись завдання визначення похибки

1. Будемо вважати, що ОС знаходиться на значних відстанях від наземних станцій, відносно яких визначається лінія положення.
2. Помилки визначення лінії положення набагато менше цих відстаней.
3. Тоді сімейство ліній положення, які відповідають різним значенням параметрів, що вимірюються, біля ОС, можна замінити відрізками паралельних прямих незалежно від форми ліній положення

Припустимо, що істинне значення положення ОС знаходиться в точці М перетину ліній положення АВ і CD (рис. 2.25). Прямі А'В' і С'D' визначають

З (6.33) тоді СКВ визначення гіперболи визначається співвідношенням

$$\sigma_\lambda = \frac{\sigma_{R_p}}{2 \sin \Psi/2},$$

де σ_{R_p} – СКВ вимірювань ΔR_p .

При врахуванні, що $\sigma_{R_p} = C\sigma_\tau$ отримаємо

$$\sigma_\lambda = \frac{C\sigma_\tau}{2 \sin \Psi/2}.$$

лінії положення з урахуванням похибок вимірювань, M' – розраховане з помилками МЗ ОС.

Лінії положення АВ і CD перетинаються під кутом α_M . Точки М і M' зміщені одна відносно іншої на відстань Γ , яка *називається радіальною помилкою*. Це значить, що *радіальна помилка характеризує* найкоротшу відстань між справжнім положенням ОС та тим, яке визначено за результатами вимірювань. Різниця між справжнім та визначеним МЗ ОС виникає через наявність у вимірах помилок. Якщо помилок не буде, то точки М та M' майже збіжаться. Вони можуть не збігатись повністю у зв'язку із наявністю методичних помилок, які визначаються кінцевою кількістю розрядів обчислювального засобу, на якому буде визначатися МЗ ОС.

Таким чином, завдання полягає у виводі виразів, за якими можна буде отримувати значення радіальної похибки для загального варіанту позиційного методу визначення МЗ ОС.

Виведення виразу для оцінки радіальної похибки

Величини $\Delta\ell_1$ і $\Delta\ell_2$ являють собою похибки визначення ліній положення АВ і CD.

Як впливає з рис. 2.25, $KM \perp C'D'$, $LM' \perp AB$. При позначенні $r_1 = M'F$ і $r_2 = MF$ маємо $r_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\sin \alpha_M}$ і $r_2 = \frac{\Delta\lambda_2}{\sin \alpha_M}$. З $\triangle M'M'F$ за теоремою косинусів знаходимо, що (при $\cos(180^\circ - \alpha_M) = -\cos \alpha_M$)

$$r^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2 \cos \alpha_M. \quad (2.65)$$

Тоді радіальна помилка визначення МЗ ОС для окремого виміру

$$r = \frac{\sqrt{\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_2^2 + 2\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2 \cos \alpha_M}}{\sin \alpha_M}. \quad (2.66)$$

Вираз (2.66) отримано з урахуванням рівняння $\angle \alpha_M = \angle KFM = \angle LFM'$, при використанні виразів для r_1, r_2 з формули (2.65). У зв'язку з випадковістю похибок $\Delta\ell_1$ і $\Delta\ell_2$ при переході до СКВ вираз для радіальної помилки визначення МЗ ОС буде мати вигляд

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{\lambda_2}^2 + \sigma_{\lambda_1}^2 + 2\sigma_{\lambda_1}\sigma_{\lambda_2}\rho \cos \alpha_M}}{\sin \alpha_M}, \quad (2.67)$$

де ρ – коефіцієнт взаємної кореляції похибок визначення ліній положення АВ і CD; σ_{ℓ_1} і σ_{ℓ_2} – середньоквадратичні значення помилок (СКВ) визначення відповідних ліній положення.

При незалежних вимірах ліній АВ і CD СКВ радіальної помилки можна визначити наступним чином:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{\lambda_2}^2 + \sigma_{\lambda_1}^2}}{\sin \alpha_M}. \quad (2.68)$$

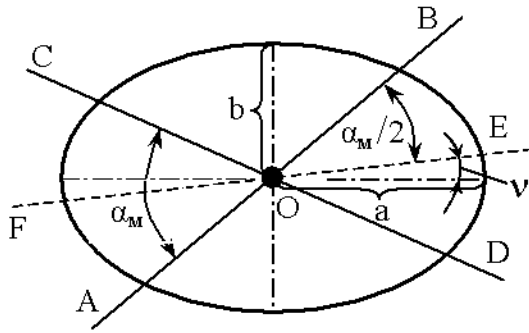


Рис. 2.26. Еліпс розсіювання помилок

пливає, що $\frac{\sigma_{\lambda_1}^2 - \sigma_{\lambda_2}^2}{\sigma_{\lambda_1}^2 + \sigma_{\lambda_2}^2} < 1$, а це доводить, що $\text{tg } 2v < \text{tg } \alpha_M$, тобто $v < \alpha_M/2$. За умовою, що σ_{ℓ_1} та σ_{ℓ_2} дорівнюють нулю, $|v| = \alpha_M/2$. Якщо $\sigma_{\ell_1} = \sigma_{\ell_2} = \sigma_\ell$, велика піввісь еліпса розсіювання збігається з лінією EF, тобто $v=0$, розмір півосей можна знайти за виразами

$$a = \sigma_\ell C_1 \sqrt{\frac{1}{1 - \cos \alpha_M}}; \quad b = \sigma_\ell C_1 \sqrt{\frac{1}{1 + \cos \alpha_M}}. \quad (2.71)$$

З аналізу виразу (2.71) випливає, що при $\alpha_M = \pi/2$ еліпс перетворюється на коло $a=b=\sigma_\ell C_1$.

Імовірність попадання розрахованого значення МЗ ОС в середину області (P_M), яка обмежена еліпсом заданих розмірів визначається

$$P_M = \iint_Q \omega(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2) d\Delta\lambda_1 d\Delta\lambda_2 = 1 - e^{-C_1^2/2}, \quad (2.72)$$

звідки розмір еліпса при заданій ймовірності буде визначатися

$$C_1 = \sqrt{-2 \ln(1 - P_M)}. \quad (2.73)$$

При $C_1 = 1,5 ; 2,0 ; 2,5 ; 3,0$ імовірність попадання визначеного МЗ ОС усередину відповідного еліпса розсіювання складає $P_M = 0,68; 0,86; 0,96; 0,989$.

3. Робочі зони радіонавігаційних систем

Для оцінки можливостей РНС і порівняння їх між собою використовують поняття робочої зони.

Робоча зона визначається наступними умовами.

1. Робоча зона (РЗ) обмежена максимально допустимою помилкою визначення МЗ ОС.

2. РЗ не може бути більшою, ніж дальність дії РНС.

Розглянемо робочі зони РНС, які використовують розглянуті позиційні методи визначення МЗ ОС.

Робоча зона далекомірної РНС

Побудову розглянемо для випадку далекомірної РНС, яка у своєму складі

При умові незалежності помилок $\Delta\ell_1$ та $\Delta\ell_2$ напрямком великої півосі а еліпса створює з лінією EF кут v , який визначається співвідношенням

$$\text{tg } 2v = \frac{\sigma_{\lambda_1}^2 - \sigma_{\lambda_2}^2}{\sigma_{\lambda_1}^2 + \sigma_{\lambda_2}^2} \text{tg } \alpha_M. \quad (2.70)$$

З аналізу виразу (2.70) ви-

має бортовий запитник і два наземних відповідачі. Відповідачі розміщені на відстані d .

При однаковості далекомірів, які використовуються, та за умовою $\sigma_{e1} = \sigma_{e2} = \sigma_e$ з урахуванням виразів (2.46) та (2.68) отримаємо

$$\sigma_{ГД} = \frac{\sigma_\lambda \sqrt{2}}{\sin \alpha_M} = \frac{C \sigma_\tau \sqrt{2}}{2 \sin \alpha_M} \quad (2.74)$$

Криву рівної точності, яка вимагається для побудови зовнішньої межі робочої зони, знайдемо з (2.74) при позначенні $\sigma_\tau = \sigma_{ГД}$ і знаходженні кута α_M

$$\sin \alpha_M = \frac{\sqrt{2} \sigma_R}{\sigma_{ГД}} = \text{const} \quad (2.75)$$

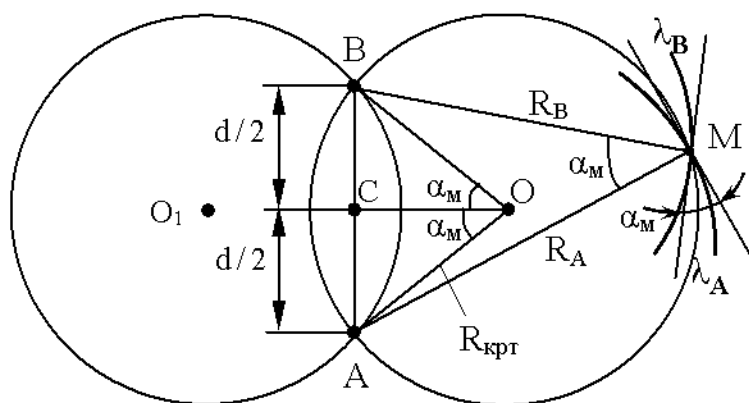


Рис. 2.27. Пояснення до побудови РЗ далекомірної РНС

кола буде мати вигляд

$$R_{\text{крт}} = \frac{d}{2 \sin \alpha_M} \quad (2.76)$$

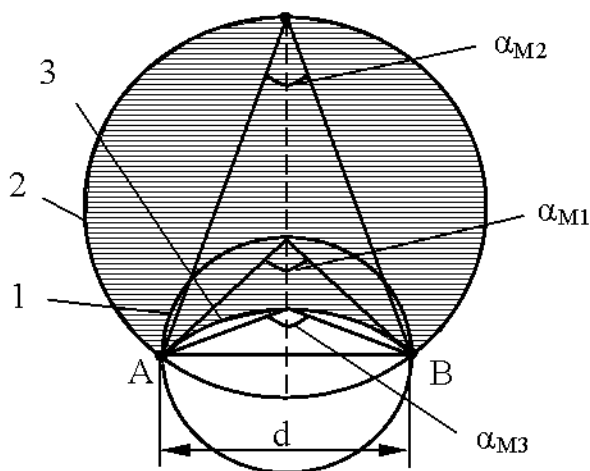


Рис. 2. 28. Робоча зона далекомірної РНС

Таким чином, криві рівної точності далекомірної РНС мають вигляд кіл, тобто ліній, в кожній точці яких кут між напрямками на відповідачі, що розташовані в т. А і В (рис.2.27), є величина постійна.

Відрізок d є хордою цих кіл. Центральний кут, що опирається на цю хорду, дорівнює $2\alpha_M$. З трикутника АОС вираз для радіуса цього

Через точки А і В можна провести друге коло рівної точності, яке обмежене максимальною дальністю дії відповідачів $R_{B\text{макс}}$ і $R_{A\text{макс}}$. Площа, яка обмежена цими колами, і буде РЗ РНС, у межах якої похибка визначення МЗОС не перевищує допустиму $\sigma_{ГД}$ (рис. 2.28).

Робоча зона розташована по обидві сторони від бази обраних відповідачів. Аналіз виразу (2.74) показує, що допустима радіальна помилка $\sigma_{ГД}$ досягає мінімального значення при $\alpha_M = \pi/2$ і набуває значення $\sigma_{ГД\text{мін}} = \sqrt{2} \sigma_R$. Цьому

випадку відповідає коло 1. При наближенні ($\alpha_M > \pi / 2$) чи віддаленні ($\alpha_M < \pi / 2$) від бази, які починаються з кола 1, помилка $\sigma_{ГД}$ збільшується. На рис. 2.28 $\sigma_{ГД} = 2\sigma_{ГД\text{мін}}$ відповідає колам 2 і 3.

Якщо задати $\sigma_{ГД} = 2\sigma_{ГД\text{мін}}$, то площа РЗ буде обмежена колами 2 і 3, яким

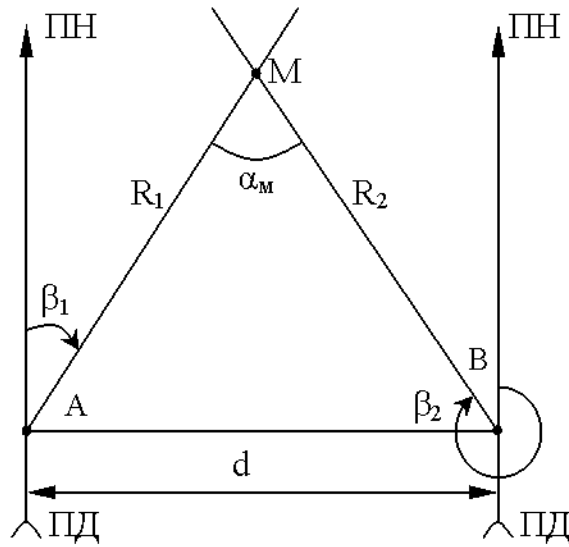


Рис. 2.29. Геометричні співвідношення у однобазовій кутомірній РНС

відповідають кути: $\alpha_M = 30^\circ$; $\alpha_M = 150^\circ$.

На великих відстанях, коли кут α_M стає дуже малим, похибка визначення МЗ далекомірною системою пропорційна відстані від радіомаяків до ОС ($\sin \alpha_M \approx \alpha_M = d/R$).

Аналіз РЗ далекомірної РНС показує [8], що для збільшення її площі необхідно обирати максимальний розмір бази, який може бути обмежений тільки дальністю дії радіодалекомірів ОС. Підвищення вимог до точності визначення МЗ при незмінній точності вимірів скорочує розміри РЗ.

Робоча зона кутомірної РНС

Побудову робочої зони кутомірної РНС розглянемо на прикладі бортового радіопеленгатора, який працює з двома наземними радіомаяками А і В (рис. 2.29). РМ розташовані в радіонавігаційних точках (РНТ), які рознесені на відстань d . На рис. 2.29 позначені: β_1, β_2 – істинні азимути ОС у РНТ; R_1, R_2 – дальності від ОС до РНТ А і В; α_M – кут, під яким лінії положення перетинаються; М – точка, у якій знаходиться ОС; ПН та ПД – північні та південні напрямки у місцях розташування РМ. При умові, що меридіани в точках М, А і В паралельні, та врахуванні, що $\sigma_{\lambda_1} = R_1 \sigma_{\beta_1}$; $\sigma_{\lambda_2} = R_2 \sigma_{\beta_2}$ та $\sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = \sigma_\theta$, згідно з виразом (2.47) отримаємо

$$\sigma_{Гк} = \frac{\sigma_\theta \sqrt{R_1^2 + R_2^2}}{\sin \alpha_M}. \quad (2.77)$$

Перетворення виразу (2.77) до більш зручного вигляду дає

$$\sigma_{Гк} = k d \sigma_\theta, \quad (2.78)$$

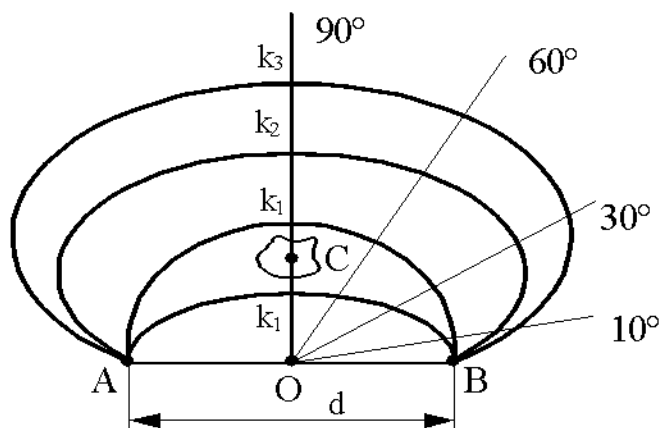
де $k = \frac{0,01745}{\sin \alpha_M} \sqrt{\left(\frac{R_1}{d}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{d}\right)^2}$ – коефіцієнт, для якого складаються

спеціальні таблиці, σ_θ° – похибка виміру куткової координати в градусах.

При цьому крива рівної точності знаходиться за виразом

$$k = \frac{\sigma_{Гд}}{d \sigma_\theta}. \quad (2.79)$$

На рис. 2.30 показані криві рівної точності кутомірної РНС, для різних k (зі збільшенням k іде зростання номера). В точці C спостерігається мінімальне значення помилки $\sigma_{\text{тк}}=0,01605d \sigma_{\theta}^{\circ}$. Кут $\alpha_{\text{мв}}$ який відповідає т. C , дорівнює $109^{\circ}28'$, а відрізок $OC=d/(2\sqrt{3})$.



Необхідно зазначити, що криві рівної точності кутомірної РНС мають складну форму і відрізняються від кіл, які спираються на базу як на хорду. На рис. 2.30 зображені половини РЗ кутомірної РНС. Другі половини є симетричними відносно лінії бази. До особливостей кутомірної РНС відноситься те, що площа обмежена ліні-

Рис. 2.31. Робоча зона кутомірної РНС

ями максимальної дальності, як правило, більша її РЗ. Тому для РЗ визначальною є нерівність $\sigma_{\text{тк}} < \sigma_{\text{тд}}$. Оптимальний розмір бази, при якому площа робочої зони такої РНС з двома точками прийому та однією базою, буде максимальною [8] при $k = 1/38$.

Якщо кутомірна система складається з трьох однакових радіопеленгаторів, які створюють дві бази, то точність системи регулюється підбором кута між базами. Однак загалом площа РЗ такої кутомірної системи у порівнянні з однобазовим варіантом підвищується приблизно у два рази. Найкращий кут між базами, при якому досягається мінімум помилки визначення МЗ ОС, досягає 60° , а оптимальний розмір знаходиться при $k = 1/45$.

Робоча зона кутомірно-далекомірної РНС

Особливістю таких систем є : різниця ліній положення; сполучення наземних станцій кутомірного та далекомірного каналів системи в одній точці і постійність кутів, під якими перетинаються лінії положення.

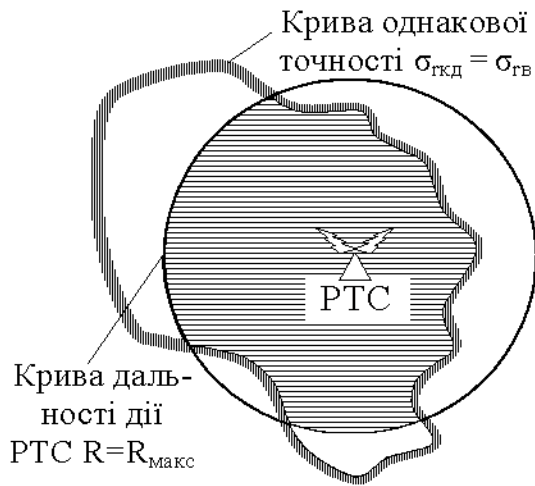


Рис. 2.31. Робоча зона кутомірно – далекомірної РНС

яка є колом радіуса R_d . Центр цього кола збігається з місцем розташування наземної станції (РТС). *Зовнішня межа РЗ кутомірно-далекомірної РНС* (рис. 2.31) утворюється після нанесення на карту кривих, що відповідають R_{\max} і R_B , як перетин межі загальної частини площин, що охоплюється цими кривими. *Внутрішня межа* визначається радіусом РЗ навколо наземних станцій, що обумовлена її технічними характеристиками (наприклад, ДС).

Площа РЗ знаходиться з виразу

$$S = \frac{\pi(\sigma_d^2 - \sigma_R^2)}{\sigma_\theta^2} \quad (2.82)$$

Робоча зона різницево-далекомірних РНС

МЗ ОС з використанням різницево-далекомірних систем (РДС) визначається як точка перетину ліній положення, кожна з яких представляє собою гіперболу, від двох пар наземних станцій. Дві бази утворюються трьома наземними радіостанціями, одна з яких називається ведучою, а решта – відомими. Таким чином, має місце два різницево – далекомірних пристрої з однаковими базами, які мають загальну опорну точку.

При незалежних похибках визначення ліній положення, згідно з виразом (2.68), з урахуванням (2.55), для радіальної помилки розрахунку МЗ ОС отримаємо СКВ різницево – далекомірної РНС у вигляді

$$\sigma_{r_{рд}} = \frac{c \sqrt{\sigma_{\tau_1}^2 \sin^2(\psi_1/2) + \sigma_{\tau_2}^2 \sin^2(\psi_2/2)}}{2 \sin \alpha_M \sin(\psi_1/2) \sin(\psi_2/2)} \quad (2.83)$$

При однаковості вимірювачів і рівнянні $\sigma_{\tau_1} = \sigma_{\tau_2} = \sigma_\tau$ отримаємо

$$\sigma_{r_{рд}} = \frac{c \sigma_\tau \sqrt{\sin^2(\psi_1/2) + \sin^2(\psi_2/2)}}{2 \sin \alpha_M \sin(\psi_1/2) \sin(\psi_2/2)} \quad (2.84)$$

З урахуванням використання 3-х станцій (рис. 2.32), які розташовані у точках С, А та В, кут α_M може бути виражений через кути Ψ_1 та Ψ_2 (з урахуванням, що

При побудові кривих рівної точності враховується, що $\sigma_{e1} = R \sigma_\theta$, $\sigma_{e1} = \sigma_R$, $\alpha_M = 90^\circ$ і врахуванні виразу (2.68) отримаємо

$$\sigma_{r_{кд}} = \sqrt{(R \sigma_\theta)^2 + \sigma_R^2} \quad (2.80)$$

При завданні $\sigma_{r_{кд}} = \sigma_{r_{д}}$ можна визначити криву рівної точності кутомірно - далекомірної системи у вигляді

$$R_d = \frac{\sqrt{\sigma_{r_{д}}^2 - \sigma_R^2}}{\sigma_\theta} = \text{const} \quad (2.81)$$

гіперболи ділять кути Ψ_1 та Ψ_2 навпіл).

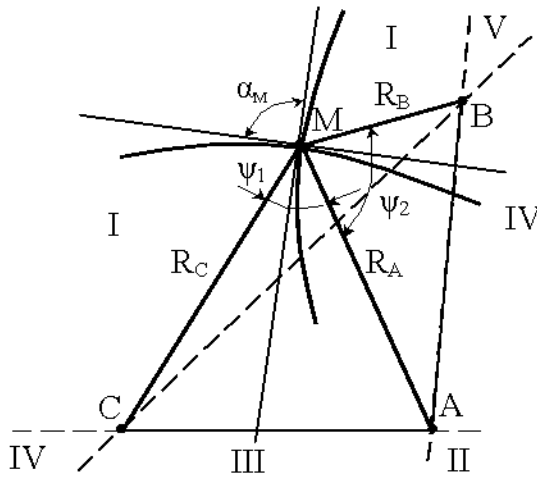


Рис. 2.32. Ділянки РЗ різницево-далекомірної РНС

При цьому для зон I та II:

$$\alpha_M = (\Psi_1 + \Psi_2) / 2 ;$$

III та VI :

$$\alpha_M = (\Psi_1 - \Psi_2) / 2 ;$$

IV та V :

$$\alpha_M = (\Psi_2 - \Psi_1) / 2 .$$

Для I та II зон, які є основними, можна записати

$$\sigma_{Грд} = \frac{c\sigma_\tau \sqrt{\sin^2(\Psi_1/2) + \sin^2(\Psi_2/2)}}{2 \sin((\Psi_1 + \Psi_2)/2) \sin(\Psi_1/2) \sin(\Psi_2/2)} . \quad (2.85)$$

При використанні того ж прийому, що і для кутомірної РНС (вираз (2.78)), перетворимо $\sigma_{Грд}$ до вигляду

$$\sigma_{Грд} = K_\Gamma c\sigma_\tau , \quad (2.86)$$

де $K_\Gamma = \frac{\sqrt{\sin^2(\Psi_1/2) + \sin^2(\Psi_2/2)}}{2 \sin[(\Psi_1 + \Psi_2)/2] \sin(\Psi_1/2) \sin(\Psi_2/2)} .$

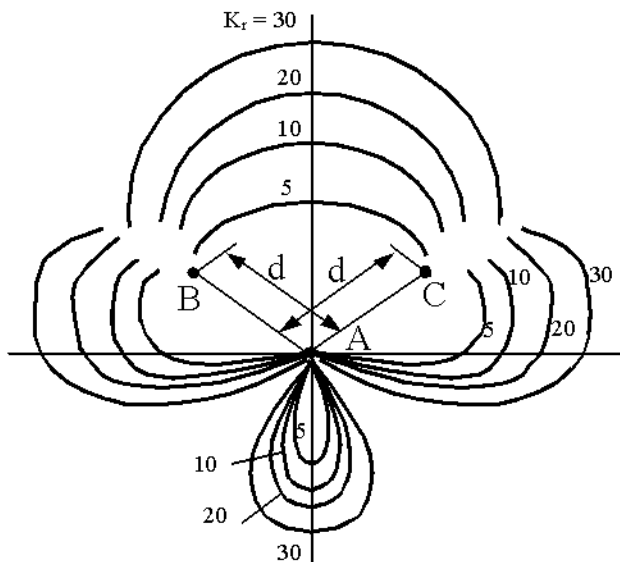


Рис. 2.33. РЗ різницево-далекомірної РНС

Крива рівної точності РДС будувється на основі співвідношення

$$K_\Gamma = \frac{\sigma_{Грд}}{C\sigma_\tau} . \quad (2.87)$$

Як видно з рис. 2.33, для різних значень K_Γ , найбільша точність спостерігається на базах РДС. При заданих $\sigma_{\tau 1}$ та $\sigma_{\tau 2}$ точність визначення МЗ ОС погіршується при віддаленні від станції за ростом похибок розрахунку ліній положення і зменшення кута α_M . У зв'язку із низькою точністю РДС не можуть застосовуватися для визначення МЗ ОС у напрямках, які є продовженням баз станцій, для яких Ψ_1 та Ψ_2

дорівнюють 0° або 360° , і в областях, де лінії положення йдуть паралельно, тобто $\alpha_M = 0$ або 180 .

Для отримання РЗ РДС з площі, що обмежена кривою рівної точності,

виключаються ділянки, у яких не забезпечується прийом сигналів однієї або декількох станцій системи. Так, виключаються райони, які виходять за межі дальності дії наземних станцій.

Кут між базами пристроїв впливає на величину та конфігурацію РЗ. Якщо задана достатньо низька точність визначення місця, то для отримання найбільшої РЗ вигідно розташовувати бази під кутом у 180° . Якщо ж треба реалізувати ще й найбільш можливу точність визначення місця, то оптимальні кути лежать у межах $60^\circ \dots 90^\circ$.

Різницево-далекомірні системи часто мають ще й третю провідну радіостанцію. Три бази розташовують за схемою “зірка” під кутами у 120° . Комбінацією відліків, при якій лінії положення перетинаються під кутом, що наближається до 90° , можливо отримати істотне збільшення розміру РЗ.

Коли допустима база системи дорівнює 1000 км і більше, вигідно розташовувати радіостанції систем у вершинах квадрата. Оскільки бази системи взаємно перпендикулярні, то забезпечується підвищення точності визначення місця всередині квадрата.

4. МЕТОДИ ВИМІРУ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ

4.1. Методи виміру дальності

При вимірі дальності необхідно визначити затримку у часі (τ) між сигналами, які випромінюються та приймаються. Вона пропорційна дальності $r(t)$ від РТС до ОС для цього використовують безпосередній вимір часового інтервалу, фази чи частоти, які є функціями часу. Залежно від цього розрізняють часові (імпульсні), фазові та частотні методи виміру дальності.

Імпульсний (часовий) метод виміру дальності. Часовий метод представляє собою метод безпосереднього виміру дальності R за часом затримки τ_R відбитого сигналу (ВС) відносно імпульсу, який випромінювався (ЗС). Вимір здійснюється за обвідними сигналів (рис. 3.1). При використанні активно - активної (запитно-відповідної) РТС дальність визначається із співвідношення

$$R = \frac{c(\tau_{Ri} - \tau_3)}{2} = \frac{c\tau_R}{2}, \quad (3.1)$$

де τ_{Ri} – час розповсюдження сигналу між приймачем і передавачем вимірювача; τ_3 – час затримки сигналу за рахунок його формування відповідачем.

При активно - пасивній радіолокації складова τ_3 буде відсутньою.

З виразу (3.1) витікає, що максимальний час затримки сигналів буде обмежуватись умовою (рис. 3.1)

$$\tau_{\text{макс}} = T_{\Pi} \geq \frac{2R_{\text{макс}}}{c} + \tau_3, \quad (3.2)$$

де T_{Π} – період формування імпульсів.

Мінімальна ж дальність, на якій приймач може прийняти сигнал при відсутності випромінення передавача (тільки при умові, що сигнал передавача впливає на роботу приймача), визначається тривалістю імпульсу передавача τ_i

$$R_{\min} \geq c(\tau_{R\min} + t_B)/2 = \frac{c(\tau_i + t_B)}{2}, \quad (3.3)$$

де t_B – час відновлення чутливості приймача після закінчення випромінення імпульсу передавача τ_i .

З використанням виразу (3.1) точність вимірювання дальності (σ_R) визначається за виразом

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{R^2}{c^2} \sigma_{\text{ш}}^2 + \frac{c^2}{4} \sigma_{\tau}^2 + \frac{c^2}{4} \sigma_{\tau_3}^2}, \quad (3.4)$$

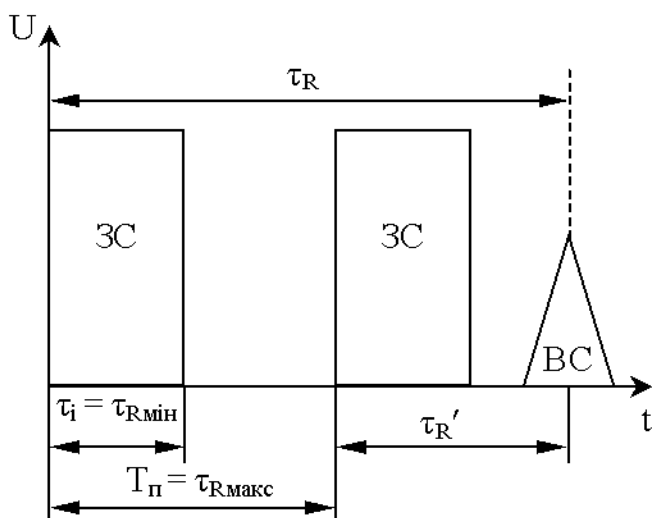


Рис. 3.1. Вимір часу запізнення імпульсним

де $\sigma_{\text{ш}}$ – СКВ виміру дальності за рахунок відхилення швидкості розповсюдження радіохвиль від розрахованого значення; σ_{τ} , σ_{τ_3} – потенційна похибка виміру часу затримки та складова похибки, що виникає за рахунок відхилень часу затримки сигналів в апаратурі відповідача.

Задача полягає у вимірюванні часового інтервалу між сигналами, що випромінюються і приймаються, за їх максимумами. При цьому

обмежують область, в якій виконують пошук сигналів стробами чи вікнами. Максимум прийнятого сигналу визначається або кореляційним або дискримінаційним методами.

При кореляційному методі здійснюється пошук прийнятого імпульсу опорним сигналом такої ж структури, що і прийнятий. При збігу опорного і прийнятого імпульсів за часом сигнал на виході такого кореляційного приймача досягає максимуму. Часове положення опорного імпульсу характеризує час затримки, що вимірюється τ_R .

Для отримання значення дальності та видачі його в двійковому коді при використанні кореляційного методу найчастіше використовується схема, що подана на рис. 3.2.

У такому вимірювачі генератор тактових імпульсів (ГТІ) з періодом T_R формує імпульси (рис. 3.2, а), які надходять до формувача стробу (вікна). Як

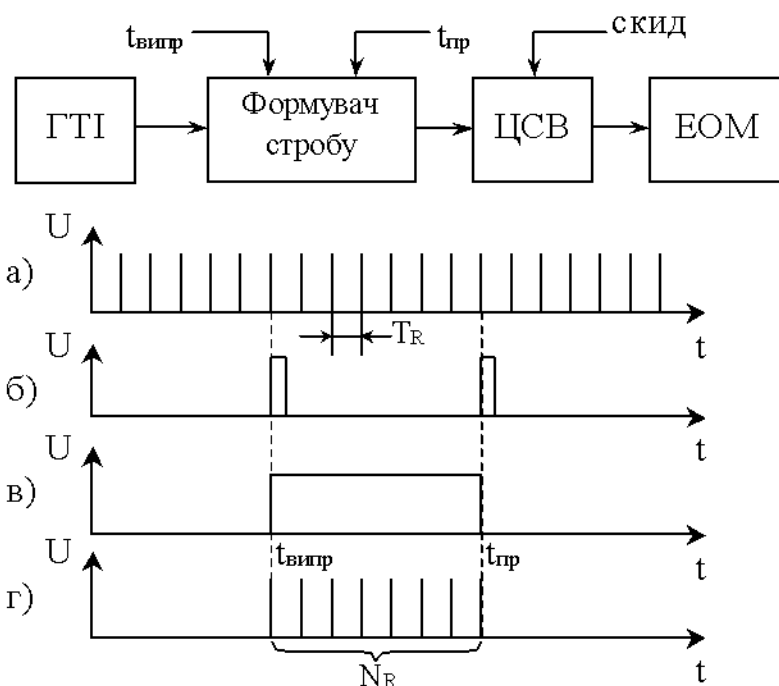


Рис. 3.2. Структурна схема кореляційного імпульсного вимірювача часу

формує стробу у цифровій техніці може використовуватись тригер. Даний формувач відкривається імпульсом передавального пристрою в момент випромінення ($t_{\text{випр}}$) (рис. 3.2 б, в) та закривається опорним імпульсом у момент прийому максимуму імпульсу відповіді ($t_{\text{гр}}$). Даний строб подається на ключову схему (у цифровій техніці ключовою схемою може виступати звичайний елемент "І"). Число тактових імпульсів, які пройшли через формувач стробу (N_R на рис.3.2,г), пропорційне дальності R .

Кількість імпульсів, які проходять через формувач стробу, поступають до цифрової системи відліку (ЦСВ). Як ЦСВ у цифровій техніці використовується лічильник. Значення кількості підрахованих імпульсів подається до ЕОМ, яка і визначає значення виміру дальності.

Дальність визначається за виразом

$$R = \frac{c t_R}{2} = \frac{c}{2} ((N_R - 1) T_R) = \left(\frac{c T_R}{2} \right) (N_R - 1) = \Delta R (N_R - 1), \quad (3.5)$$

де $\Delta R = \frac{c T_R}{2}$ – крок відліку дальності, N_R – число імпульсів, що накопичилися у лічильнику.

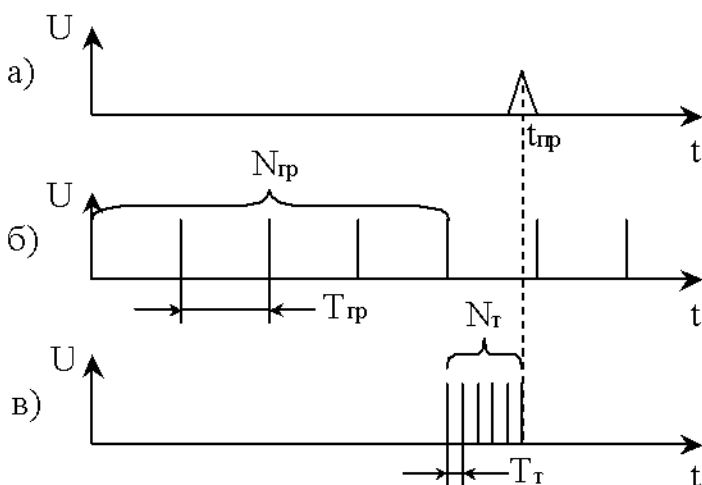


Рис. 3.3. Епюри напруг виміру дальності кореляційним імпульсним методом

Для підвищення точності виміру дальності необхідно зменшувати значення цього кроку, оскільки апаратна похибка за рахунок підрахунку буде визначатися

$$\sigma_{R_A} = \frac{\Delta R}{\sqrt{12}} = \frac{\Delta R}{2\sqrt{3}}. \quad (3.6)$$

Зменшення періоду лічильних імпульсів пов'язано з підвищенням частоти їх

прямування. При цьому з'являється проблема забезпечення стабільності роботи ГТІ на високій частоті. Тому тривалість інтервалу τ_R спочатку визначають грубо за допомогою генератора низької частоти з періодом повторення $T_{гр}$, а потім уточнюють за допомогою генератора високої частоти з періодом T_T всередині періоду $T_{гр}$ (рис. 3.3). Таке рішення передбачає наявність двох генераторів лічильних імпульсів. При цьому дальність визначається за виразом

$$R = \frac{(T_{гр}(N_{гр} - 1) + T_T(N_T - 1)N_T)C}{2} = \Delta R_{гр}(N_{гр} - 1) + \Delta R_T(N_T - 1), \quad (3.7)$$

де $\Delta R_{гр} = CT_{гр}/2$, $\Delta R_T = CT_T/2$ – грубий та точний крок відліку дальності, $N_{гр}$, N_T – число імпульсів грубого та точного відліку.

Дискримінаційний метод передбачає формування двох напівстробів. Області збігання (перетину) кожного напівстробу з прийнятим сигналом порівнюються між собою. При цьому на виході вимірювача утворюється дискримінаційна характеристика. Якщо площі перетину однакові, то часове положення напівстробів говорить про значення виміру часу затримки. При різних площах – на виході пристрою віднімання формується напруга, знак якої пропорційний напрямку, а значення – величині відходу від заданої (нуля дискримінаційної характеристики), положення якої відоме.

До переваг імпульсного методу можна віднести порівняну простоту, яка остається і при одночасному вимірі дальності багатьох цілей.

Недоліками методу вважаються досить низька точність виміру у порівнянні з фазовим методом та обмеження дальності виміру мінімальним значенням.

Фазовий метод виміру дальності. При визначенні дальності фазовим методом здійснюється вимірювання фазового зсуву між двома сигналами, один з яких є опорним, а другий має інформацію про дальність. Головною перевагою даного методу є висока точність виміру дальності.

Різниця фаз між цими сигналами вимірюється на частоті зрівняння. Як частота зрівняння може виступати несуча частота, частота модуляції несучих коливань та частота биття двох коливань.

Визначити різницю фаз при запитно-відповідній РТС (активно-пасивній) можна за виразом

$$\Delta\phi = \tau_R \omega_{зр} = \frac{2R}{C} \omega_{зр}, \quad (3.8)$$

де τ_R – часовий інтервал, що пропорційний дальності, яку вимірюють; $\omega_{зр}$ – колова частота зрівняння, C – швидкість світла (розповсюдження радіохвиль).

Вимір $\Delta\phi$ може здійснюватись на частоті несучого коливання (рис 3.4, а) або на частоті обвідної модульованих коливань (рис. 3.4, б). З виразу (3.8) можна визначити дальність як

$$R = \frac{C \Delta\phi}{2 \omega_{зр}}. \quad (3.9)$$

СКВ виміру дальності фазовим методом з урахуванням виразу (3.9) дорівнює

$$\sigma_R = \frac{c\sigma_\varphi}{2\omega_{зр}} = \frac{c\sigma_\varphi}{4\pi f_{зр}}, \quad (3.10)$$

де σ_φ - СКВ виміру різниці фаз фазометром.

Аналіз виразу (3.10) показує, що точність виміру дальності підвищується із зростанням $\omega_{зр}$.

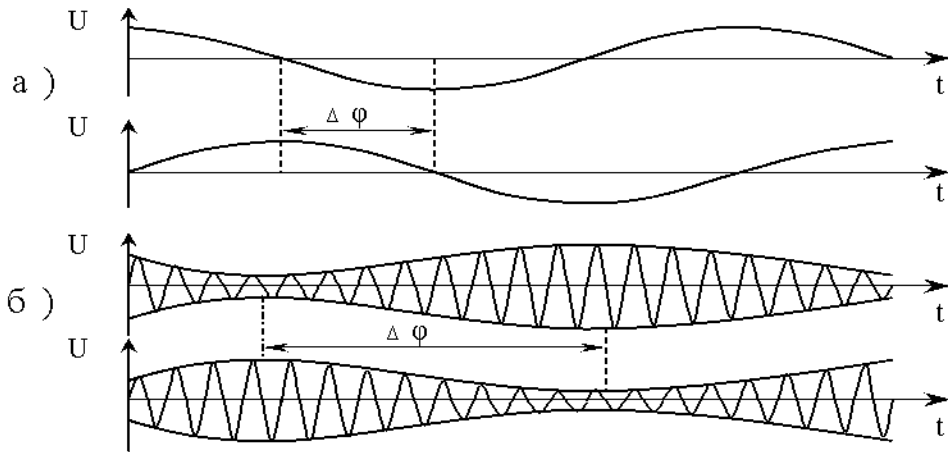


Рис. 3.4. Визначення різниці фаз між двома коливаннями :
а) на несучій частоті; б) на частоті обвідних

Основним *недоліком* фазового методу виміру різниці дальностей є можливість однозначного виміру у межах зміни фази від 0 до 2π . Таке можливо лише при виконанні умови

$$\Delta\varphi = \frac{2\omega_{зр}}{C} \Delta R_{\max} \leq 2\pi. \quad (3.11)$$

Діапазон однозначного відліку дальності

$$\Delta R_{\max} = \frac{C}{2\omega_{зр}} 2\pi = \frac{\pi C}{\omega_{зр}}. \quad (3.12)$$

Зміну фази від 0 до π називають *фазовим циклом*, а частину робочої зони, відповідну цій зміні, – *фазовою доріжкою*.

Завжди намагаються збільшити значення інтервалу однозначного виміру, що визначається виразом (3.12). З цього виразу видно, що для збільшення ΔR_{\max} необхідно зменшувати $\omega_{зр}$.

Таким чином, виникає *протиріччя між підвищенням точності виміру дальності та збільшенням діапазону однозначного відліку фази*.

Відомі багатошкільний метод, метод маневру частоти та фазокодовий метод розв'язання цього протиріччя, які будуть розглянуті нижче.

Багатошкальний метод. При використанні цього методу точний вимір проводиться на високій частоті зрівняння $\omega_{зр\ t}$, а усунення неоднозначності відліку забезпечує грубий вимір на більш низькій частоті $\omega_{зр\ гр}$. Таких грубих шкал може бути декілька.

Для визначення кількості шкал повинна виконуватись умова їх спряження : *точність відліку на грубій шкалі $\sigma_{Rзр}$ повинна бути меншою, ніж весь діапазон однозначного відліку на точній шкалі ΔR_m*

$$K\sigma_{Rгр} \leq \Delta R_t, \quad (3.13)$$

де K – коефіцієнт запасу.

При врахуванні виразів (3.10) та (3.12) умова спряження шкал буде мати наступний вигляд

$$K_c = \frac{\omega_t}{\omega_{гр}} = \frac{\omega_{пр}}{\omega_{гр}} \leq \frac{2\pi}{K\sigma_{фгр}}, \quad (3.14)$$

де K_c – коефіцієнт спряження шкал.

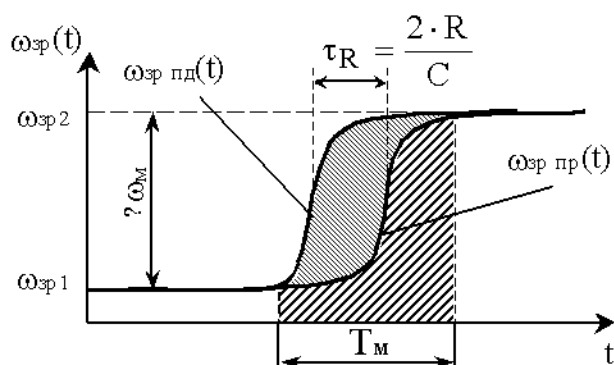
Крім того, $\omega_{зр}$ повинна задовольняти за точністю виразу (3.10), а за однозначністю – виразу (3.12). Якщо рівняння (3.10), (3.12) та (3.14) несумісні, то додають проміжну частоту $\omega_{пр}$, таким чином, щоб виконувалася умова (3.14) тощо.

Недоліком багатошкального методу є наступне : коли виміряний грубою шкалою фазовий зсув потрапляє на ділянку “зшиття” двох сусідніх шкал, можлива помилка у визначенні номеру точної шкали, тобто помилка на весь діапазон точного відліку ΔR_t . Для усунення цього недоліку при потраплянні зміщують частоту ω_t на фіксоване значення. При цьому відлік потрапляє в середину нової точної шкали.

Другим недоліком можна вважати енергетичну невідповідність передачі усіх частот одночасно. Послідовне включення їх збільшує час кожного циклу виміру R . Тому використовують компромісний режим, коли точна шкала ввімкнена безперервно, а грубі шкали вмикаються почергово.

Метод маневру частоти. В цьому методі останній недолік відсутній. Він заснований на плавній зміні (маневрі) частоти зрівняння від одного фіксованого значення до іншого з підрахунком повних поворотів різниці фаз $\Delta\phi$ на 2π . Також виконується вимірювання залишкових різниць фаз $\Delta\phi$ в крайніх положеннях.

Співвідношення для даного методу отримується графічно в площині час – частота, що показано на рис. 3.5. На цьому рисунку $\Delta\omega_m$ – розмах маневру частотного зрівняння, що знаходиться у межах від $\omega_{зр1}$ до $\omega_{зр2}$.



Маневр частотою на вході приймача, що позначено через $\omega_{зр\ пр}(t)$, такий же, як і на вході передавача $\Delta\omega_{зр\ пд}(t)$, але зміщений на час розповсюдження радіохвиль τ_R . Площа під кривою $\Delta\omega_{зр\ пд}(t)$ на інтервалі маневру T_m дорівнює

Рис. 3.5. Пояснення усунення неоднозначності виміру

повній фазі сигналу, що передається на цьому інтервалі

$$\varphi_{\text{пд}} = \int_{T_M} \omega_{\text{зрпд}}(t) dt, \quad (3.15)$$

а площа під кривою $\omega_{\text{зрпр}}(t)$ – повній фазі прийнятого сигналу

$$\varphi_{\text{пр}} = \int_{T_M} \omega_{\text{зрпр}}(t) dt. \quad (3.16)$$

Різниця вищеназваних площ є різницею повних фаз переданого та прийнятого сигналів $\Delta\varphi_{\Sigma} = \varphi_{\text{пд}} - \varphi_{\text{пр}}$, яка дорівнює

$$\Delta\varphi_{\Sigma} = \tau_R \int_{\omega_{\text{зр1}}}^{\omega_{\text{зр2}}} d\omega = \Delta\omega_M \frac{2R}{C}. \quad (3.17)$$

З другого боку,

$$\Delta\varphi_{\Sigma} = 2\pi n + (\Delta\varphi_{R_2} - \Delta\varphi_{R_1}), \quad (3.18)$$

де n – кількість повних поворотів на 2π , а $\Delta\varphi_{R_1}, \Delta\varphi_{R_2}$ – вимір різниці фаз фазоміру на частотах $\omega_{\text{зр1}}$ та $\omega_{\text{зр2}}$.

В результаті дорівнювання виразів (3.17) та (3.18) дальність буде визначатися за виразом

$$R = \frac{C}{2\Delta\omega_M} (2\pi n + \Delta\varphi_{R_2} - \Delta\varphi_{R_1}). \quad (3.19)$$

До *переваг* даного методу можна віднести наступні:

- при фіксованому значенні $\Delta\omega_M$ результат не залежить від абсолютного значення $\omega_{\text{зр1}}$ і $\omega_{\text{зр2}}$ та закону зміни $\Delta\omega_M$;
- однозначний одношкальний відлік можливий при великому діапазоні зміни дальностей.

Недоліками методу можна вважати наступні:

- жорсткі (з точністю до фази) вимоги до стабільності $\Delta\omega_M$;
- ускладнення алгоритму обробки при присутності доплерівського зсуву частоти.

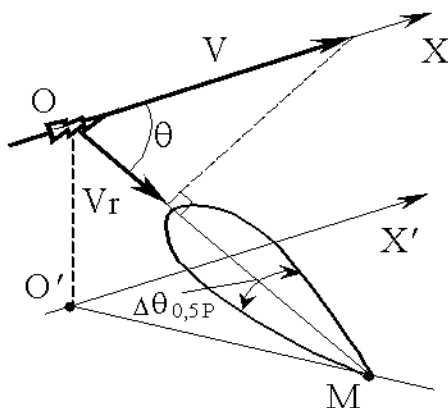


Рис. 3.8. Геометричні спів-
з відношення при частотному
методі виміру радіальної
швидкості

4.2. Частотний метод виміру радіальної швидкості

Суть методу полягає у вимірі доплерівської частоти (частоти зсуву) і подальшому розрахунку радіальної швидкості. Принцип дії доплерівських вимірювачів швидкості заснований на використанні відкритого у 1842 році австрійським фізиком Х. Доплером ефекту. Цей ефект полягає у вимірі

частоти електромагнітних хвиль (ЕМХ), які приймають при відносному русі передавача та приймача. Той же ефект спостерігається, якщо передавач та приймач нерухомі один відносно одного, але знаходяться на рухомому об'єкті, який рухається, а коливання приймаються після відбиття від нерухомого об'єкта чи поверхні.

Розглянемо співвідношення, які характеризують доплерівський зсув частоти для ідеального випадку, коли сигнал на коловій частоті ω_0 випромінюється однопроменевою антеною з точки М у напрямку до об'єкта, що знаходиться у точці О (рис. 3.8). Такий сигнал можна подати у вигляді

$$U_{\Pi}(t) = U_M \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.28)$$

де U_M – амплітуда коливання, φ_0 – початкова фаза.

Випромінений сигнал відбивається від об'єкта, що рухається і приймається РТС.

Прийнятий сигнал можна подати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{пр}}(t) &= U_M \cos[\omega_0(t - \tau_3) + \varphi_0] = \\ &= U_M \cos\left[\omega_0 t - \omega_0 \frac{2R(t)}{C} + \varphi_0\right] = U_M \cos \varphi_{\text{від}}(t) \end{aligned} \right\}, \quad (3.29)$$

де $2\omega_0 R/C$ – зсув фази сигналу, що утворюється за рахунок затримки τ_3 при розповсюдженні ЕМХ до ОС та зворотно; $\varphi_{\text{від}}$ – повна фаза відбитого сигналу.

Відомо, що миттєве значення частоти можна знайти, взявши першу похідну від повної фази прийнятого сигналу за часом у вигляді

$$\omega = \frac{d\varphi_{\text{від}}}{dt} = \omega_0 \left[1 - \frac{2}{C} \frac{dR(t)}{dt} \right] = \omega_0 + \Omega_D = 2\pi(f_0 + F_D), \quad (3.30)$$

де колова доплерівська частота

$$\Omega_D = -\frac{2\omega_0}{C} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{2\omega_0}{C} V_r,$$

а лінійна доплерівська частота

$$F_D = -\frac{2f_0}{C} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{2V_r}{\lambda}, \quad (3.31)$$

$\lambda = C/f_0$ – довжина хвилі, на якій працює РТС.

З рис. 3.8 видно, що радіальна швидкість цілей є проекцією вектора швидкості на лінію, яка з'єднує РТС з об'єктом. Ці вектори збігаються, якщо об'єкт рухається чи віддаляється від РТС. З виразу (3.31) видно, що при русі на РТС частота зростає, а радіальна швидкість убиває (збільшується за модулем) і має негативний знак. При русі від РТС радіальна швидкість позитивна, а частота Доплера дає до частоти сигналу негативний приріст. При нерухомому об'єкті чи у випадку, коли об'єкт рухається за нормаллю до лінії РТС – об'єкт, радіальна швидкість та частота Доплера дорівнюють нулю.

При відомій частоті випромінення f_0 та вимірі частоти зсуву можна визначити напрямок та значення радіальної швидкості об'єкта.

Якщо зафіксувати кут між вектором реальної та радіальної швидкостей, тобто $\theta = \text{const}$, та повертати промінь антени доплерівського випромінювача швидкості навколо вектора V , то промінь опише у просторі конус. При горизонтальному польоті лінія перетину поверхні цього конуса з поверхнею землі буде мати вигляд гіперболи.

При русі ОС з постійною швидкістю V для нескінченно вузького променя РТС виміряне значення частоти Доплера F_d визначається співвідношенням

$$F_d = -\frac{2V}{\lambda} \cos \theta. \quad (3.32)$$

При цьому $F_d = \text{const}$. В дійсності при $V = \text{const}$ через скінченну ширину діаграми спрямованості РТС спектральна щільність відбитого сигналу відрізняється від δ -функції та займає деяку смугу частот. Це призводить до появи методичних флуктуаційних похибок вимірювання як частоти Доплера, так і V_r .

При цьому вимір V_r зводиться до виміру середньої доплерівської частоти (F_{dc}) та розрахунку швидкості за формулою

$$V_r = -\frac{F_{dc} \lambda_c}{2}, \quad (3.33)$$

де λ_c – середня частота хвилі.

СКВ похибки виміру F_{dc}

$$\sigma_{F_d} = K_B \sqrt{\Delta f_d \Delta f_\phi}, \quad (3.34)$$

де $\Delta f_d = \left(\frac{\sqrt{2}}{\lambda_c} \right) V_r \text{tg} \theta_c \Delta \theta_{0,5P}$ – ефективна ширина спектра відбитих сигналів; $\theta_c = \theta$ та $\Delta \theta_{0,5P}$ – кутове положення центру та ширина ДСА РТС; Δf_ϕ – ефективна смуга пропускання вимірювача частоти; K_B – коефіцієнт, який відповідає типу частотного вимірювача і змінюється у межах від 0,1 до 0,7.

Тоді з урахуванням виразів (3.33) та (3.34) СКВ виміру V_r виразиться

$$\sigma_{V_r} = 0,5 \lambda_c K_B \sqrt{\Delta f_d \Delta f_\phi}. \quad (3.35)$$

Аналіз виразу (3.35) показує, що підвищення точності вимірювання V_r можливе за рахунок звуження Δf_d та Δf_ϕ .

До переваг радіолокаторів, що використовують частотний метод виміру радіальної швидкості, можна віднести наступні [6]:

- простота конструкції;
- відсутність ближньої мертвої зони;
- можливість обробки монохроматичного доплерівського сигналу при досить малій шумовій смузі приймача;
- не критичність роботи радіолокатора до повільних відходів частоти передавача, що пов'язано з їх однаковістю для переданого та прийнятого сигналів;
- можливість селекції цілі за швидкістю шляхом налаштування вимірювача на задане значення частоти Доплера, тим самим відсікати сигнали нерухомих об'єктів.

До недоліків: пристроїв, що застосовують даний метод виміру радіальної швидкості, відносять :

- необхідність застосування окремих антен на прийом – передачу; при використанні загальної антени виникають труднощі у забезпеченні високого ступеня розв’язки;
- різке зростання впливу перешкод на вимір частоти Доплера, що пов’язано із вузькістю спектра та смуги пропускання приймача (такі перешкоди, наприклад, виникають у результаті модуляції сигналу передавача частотою джерел живлення, вібрацією елементів антенно-хвильового та приймального трактів тощо);
- підвищення вимог до короткочасної відносної нестабільності частоти передавача за час розповсюдження сигналу до об’єкта та зворотно (вимоги до відносної нестабільності такі: $10^{-9} \dots 10^{-10}$);
- неможливість визначення дальності до об’єктів при незатухаючому гармонічному сигналі передавача.

4.3. Методи виміру кутових координат

Методи вимірювання кутових координат поділяються на амплітудні, фазові, частотні та часові.

Амплітудний метод виміру кутових координат При такому методі інформація про кутове положення знаходиться в амплітуді прийнятих сигналів або в різниці їх амплітуд. Для виміру напрямку в амплітудних РТС використовують методи максимуму, мінімуму та зрівняння (різницеви).

Метод максимуму

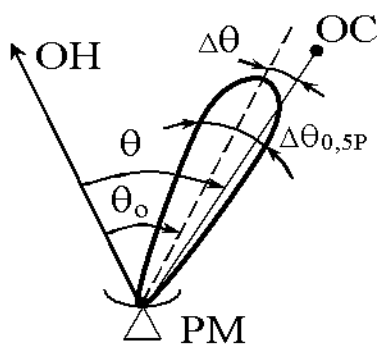


Рис. 3.10. Визначення напрямку методом максимуму

На рис. 3.10 розглядається РТС, яка використовує метод максимуму.

При цьому напрямок на ОС фіксується, коли сигнал на виході антени РТС досягає максимального значення. Антенна система для такого методу повинна сформувати ДС з вираженим максимумом.

За мірою опромінення об’єкта ДС приймається пачка сигналів, обвідна якої має чітко виражений максимум. Положення максимального сигналу пачки відповідає кутовому положенню ОС, тобто напрямок максимуму ДС збігається з напрямком на ОС. Кут θ визначається як кут між опорним напрямком (ОН) та напрямком максимуму ДС (θ_0) плюс відхилення ОС від центру ДС ($\Delta\theta$)

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta. \quad (3.39)$$

напрямком (ОН) та напрямком максимуму ДС (θ_0) плюс відхилення ОС від центру ДС ($\Delta\theta$)

СКВ виміру кутової координати при відсутності викривлень прийнятої пачки сигналів за рахунок флуктуацій цілі визначається як

$$\sigma_{\theta} = \frac{\Delta\theta_{0,5P}}{\sqrt{\pi q}}, \quad (3.40)$$

де q – відношення потужності сигналу до спектральної густини потужності перешкоди на виході приймача; $\Delta\theta_{0,5P}$ – ширина ДС РТС.

Перевагою методу вважається велика дальність дії.

До недоліків можна віднести низьку кутову чутливість, а також великий вплив на точність виміру модуляційних викривлень обвідної. Такі недоліки обумовлюються низькою крутизною у точці максимуму ДСА. Для усунення цього недоліку необхідно використовувати антени з дуже вузькою ДС. Але це не завжди можливо через необхідність збільшення розкриття антени та зростання часу огляду робочої зони.

Метод мінімуму

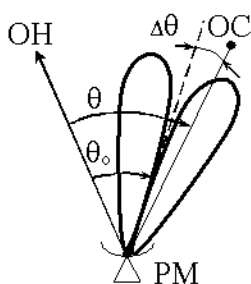


Рис. 3.11. Визначення напрямку методом мінімуму

Особливістю методу мінімуму є використання антен, які формують ДС з гострим мінімумом, кутове положення якого відносно опорного напрямку визначається кутом θ_0 . При повороті ДС фіксується момент мінімального значення сигналу на вході приймача. Кут відхилення ДС від ОС відповідає виміру кута (рис. 3.11), який визначається згідно з виразом (3.39).

Перевагою даного методу у порівнянні з методом максимуму можна вважати велику чутливість до виміру кутових координат. Це пов'язано із значним збільшенням крутизни пеленгаційної характеристики у точці виміру.

До недоліків методу мінімуму можна віднести невелику дальність дії, зниження точності пеленгування при дії перешкод. Перший недолік пов'язаний із неможливістю виявлення, а значить, і спостереження за об'єктами у точці провалу (мінімуму), оскільки амплітуда прийнятих сигналів буде дуже малою чи дорівнюватиме нулю. Другий недолік характеризується тим, що при дії перешкод мінімум стає неявно вираженим, має викривлення.

Метод зрівняння амплітуд

Це багатоканальний метод, при якому антенна система формує дві ДС, що перетинаються в просторі (рис. 3.12). Амплітудні центри антен розносяться у просторі на кут 2α (шляхом повороту антен), а фазові центри тим самим суміщуються. Інформація про кутове положення міститься у різниці амплітуд сигналів, що приймаються антенами одночасно. Коли визначення проводиться

за одним прийнятим сигналом, то цей метод носить назву *амплітудного моноімпульсного*. При визначенні кутової координати за неперервним колюванням його називають *методом порівняння миттєвих значень амплітуд*.

Пеленг (кут) θ при такому методі відраховується в момент, коли амплітуди сигналів рівні. Такому положенню цілі відпові-

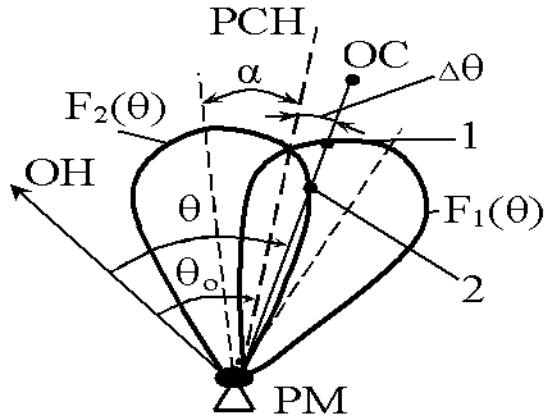


Рис. 3. 12. Різницевий метод виміру напрямку ОС

сигналу, $\Delta\theta$ – кут відхилення ОС від РСН, $F_i(\theta)$, $i=1, 2$ – ДС пелюстка антенної системи.

Величина $U_p = 0$ для РСН та змінює своє значення та знак при зміні сторони пеленга від РСН та кута відхилення. При цьому формується пеленгаційна характеристика (ПХ) дискримінаційного типу. Пеленгаційна характеристика – це залежність напруги на виході пристрою віднімання від кутового положення ОС відносно РСН.

Потенційна точність пеленгування амплітудним різницевим методом для випадку двох каналів прийому визначається виразом

$$\sigma_{\theta} = \frac{\Delta\theta_{0,5P}}{\sqrt{2\pi}} \sigma_{\varphi} = \frac{\Delta\theta_{0,5P}}{\sqrt{2\pi q}}, \quad (3.42)$$

де q – відношення потужності сигналу до спектральної густини потужності перешкоди на виході приймача; σ_{φ} – СКВ виміру $\Delta\varphi$; $\Delta\theta_{0,5P}$ – ширина ДС РТС.

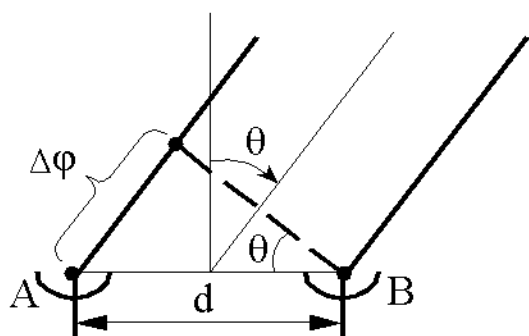
До *переваг* даного методу відносять високу кутову чутливість і точність визначення кутової координати.

Недоліками методу вважають вплив неідентичності приймальних каналів на появи систематичних похибок вимірювання кутів, а також вплив дальності до цілей на крутизну (точність) виміру кутової координати. Для усунення цих недоліків переходять до використання сумарно-різницевих схем обробки.

Фазовий метод виміру кутових координат

Фазовий метод базується на вимірі різниці фаз колювань, що приймаються двома антенами, рознесеними у просторі. Відстань між випромінювачами антенної системи (А та В на рис. 3.13) називається базою (d). Даний метод передбачає, що випромінювачі

формують ДС паралельно один одному. Таким чином, амплітудні центри суміщуються, а фазові розносяться. Прийняті сигнали мають однакові амплітуди і різні фази. Інформація про кут знаходиться в різниці фаз прийнятих сигналів $\Delta\varphi$ (рис. 3.13).



Різниця фаз прийнятих антенами А та В коливань з будь-якого кутового напрямку характеризується кутом θ і визначається виразом

$$\Delta\varphi = \omega_0 \tau_3 = \omega_0 \frac{d \sin \theta}{c} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta,$$

звідки

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi \lambda}{2\pi d}\right). \quad (3.43)$$

3.13. Геометричні співвідношення фазового методу виміру кутів

З аналізу виразу (3.42) видно, що при вимірі різниці фаз між прийнятими антенами А та В сигналів $\Delta\varphi$, і відомій частоті випромінювання ω_0 можна знайти значення кута θ .

Напряму, на якому фази прийнятих сигналів однакові називається **рівнофазним напрямком (РФН)**. На виході фазового детектора формується ПХ дискримінаційного типу. ПХ для цього методу показує зміну напруги на виході фазового детектора залежно від кутового відхилення ОС від РФН (різниці фаз сигналів). При наявності кута між напрямком на ОС та РФН на виході фазового детектора спостерігається напруга, знак та значення якої пропорційне напрямку та величині цього кута.

Потенційна точність пеленгування фазовим методом для випадку двох каналів прийому визначається виразом (3.42).

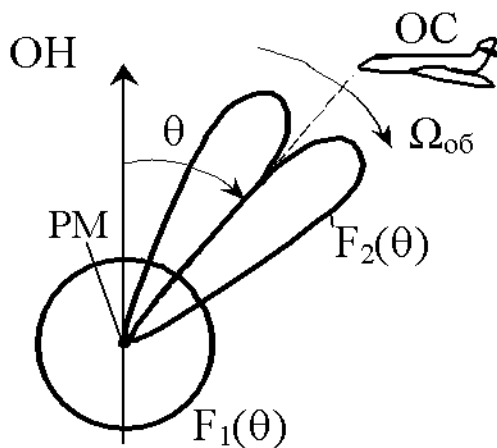
Аналіз виразу (3.42) показує, що одним із шляхів підвищення точності є збільшення відношення d/λ . Однак при $d/\lambda > 0,5$ з'являється **неоднозначність виміру**. Це пов'язано із перевищенням довжини проходження ЕМХ після прийому сигналу одним з випромінювачів шляху, що перевищує довжину хвилі (фаза змінюється на величину, що перебільшує 2π). Другим **недоліком** методу можна вважати те, що він володіє поганою роздільною здатністю за кутом. Це пов'язано із тим, що більше за один ОС у межах ДСА створюють в антенах єдиний сигнал. Наступним **недоліком** даного методу є вплив неідентичності АЧХ на точність виміру кутової координати. При цьому дискримінаційна характеристика викривлюється – зсувається положення нуля (положення РФН) різниці фаз, що призводить до помилки у вимірі кутової координати.

До **переваг** даного методу відносять високу точність пеленгації.

Основним методом усунення перерахованих недоліків є перехід до сумарно – різницевого схем виміру кутової координати.

Часовий метод виміру кутових координат

Даний метод заснований на вимірюванні інтервалу часу між двома сигналами – опорним та кутовим.



При цьому наземним радіомаяком (PM) формуються дві ДС – $F_1(\theta)$ та $F_2(\theta)$ (рис. 3.15). Одна з цих діаграм неспрямована і нерухома ($F_1(\theta)$), а друга ($F_2(\theta)$) обертається з кутовою швидкістю $\Omega_{об}$. Спрямована антена випромінює неперервне коливання.

Через неспрямовану ДС випромінюються імпульсні

Рис. 3.15. Пояснення до часового методу виміру кутових координат

сигнали з двома частотами повторення. В момент проходження опорного напрямку (ОН) імпульси обох частот збігаються. Найчастіше за опорний напрямок приймається напрямок на північ, а сигнал, що йому відповідає, – північний сигнал. Цей момент, що відповідає північному сигналу, фіксується ОС, який приймає дані імпульси. З цього моменту починається відлік часу.

У момент, коли напрямок рухомої ДС збігається з напрямком на ОС, останній сприймає неперервне коливання і за методом мінімуму фіксує момент кінця відліку. Цей момент часу можна визначити як

$$t_{\theta} = t_c + \tau_{\theta} = t_c + \frac{\theta}{\Omega_{об}},$$

де t_{θ} – час, який шукають; τ_{θ} – час затримки між збіганням частот імпульсних сигналів від нерухомої та прийняттям неперервного сигналу від рухомої ДС (той, що вимірюється); t_c – час збігу $F_1(\alpha)$ з ОН.

Для формування рухомої ДС може використовуватись чи гоніометр, чи циліндр з випромінювачами. Такі антени формують ДС у вигляді кардіоїди.

Таким чином, кут θ визначається за часом затримки неперервних сигналів, що випромінюються у відношенні до імпульсних за виразом

$$\theta = \tau_{\theta} \Omega_{об}. \quad (3.46)$$

Перевагами даного методу можна вважати високу точність виміру та простоту виміру кута споживачем.

До недоліків реалізації методу відносяться високі вимоги до стабільності частоти обертання $\Omega_{об}$ ДС рухомої антени та частоти випромінювання імпульсів нерухомою антеною.

Даний метод використовується у вітчизняних системах ближньої навігації.

Контрольні питання

1. *Принципи, переваги та недоліки методів визначення місцезнаходження ОС.*
2. *Характеристики точності, яка притаманна позиційним методам визначення місцезнаходження ОС.*
3. *Принцип побудови робочих зон РНС.*
4. *Суть, переваги та недоліки амплітудного фазового та частотного методів виміру дальності.*
5. *Методи усунення суперечності у фазовому методі виміру дальності.*
6. *Методи усунення частотного та фазового методу виміру радіальної швидкості.*
7. *Методи усунення амплітудних методів виміру кутових координат.*
8. *Принцип переваги та недоліки виміру кутових координат фазовим, частотним та часовими методами.*

5. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Невідповідність СРНС першого покоління вимогам неперервного навігаційного забезпечення призвела до розробки нового, другого, покоління СРНС [3]. Характерними особливостями СРНС другого покоління є використання середньовисотних штучних супутників Землі (ШСЗ) і використання для навігаційних визначень сигналів декількох ШСЗ, що одночасно знаходяться в зоні радіовидимості [2]. Супутникові радіонавігаційні системи являють собою всепогодні системи космічного базування, що дозволяють в глобальних масштабах вирішувати такі навігаційні завдання як визначення поточного місцеположення рухомих об'єктів, визначення швидкості рухомих об'єктів та точної координації часу. Принцип дії системи полягає в тому, що навігаційні супутники випромінюють спеціальні радіосигнали, які приймаються і певним чином обробляються апаратурою споживачів (АС), розташованої на об'єктах, що знаходяться на поверхні Землі або навколосемному просторі. При цьому обробка такого роду сигналів дозволяє отримати інформацію про позицію і швидкість об'єкта. Глобальну СРНС можна розглядати як високотехнологічну інформаційну систему, що складається з п'яти основних сегментів (див. рис. 1.1)

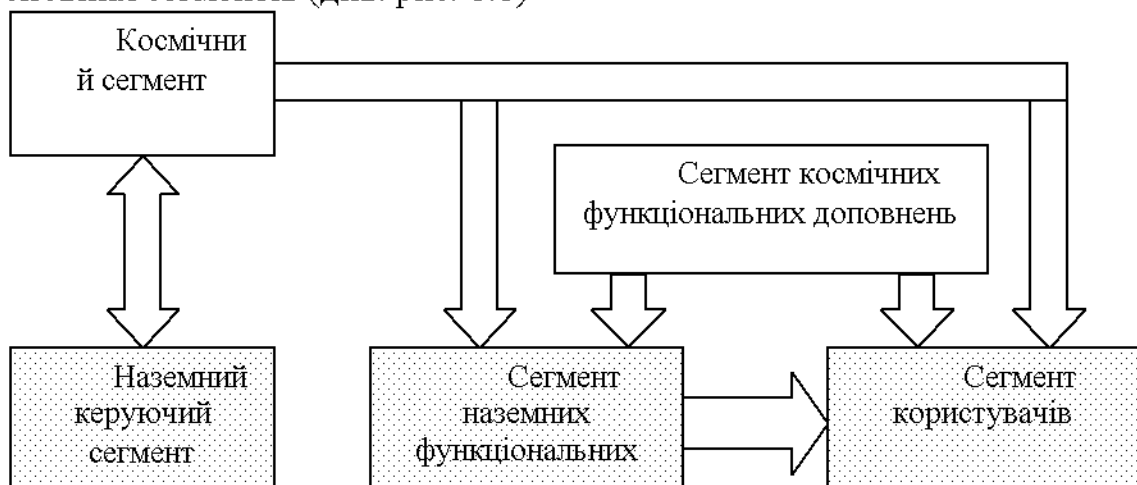


Рисунок 1.1 – Основні сегменти СРНС

Наземний керуючий сегмент включає в себе центр управління космічним сегментом, станції стеження за навігаційними супутниками (радіолокаційні та оптичні), апаратуру контролю стану навігаційних супутників. Керуючий сегмент вирішує завдання визначення, прогнозування та уточнення параметрів руху навігаційних супутників, формування та передачі в бортову апаратуру супутників цифрової інформації, а також ряд контрольних і профілактичних функцій.

Космічний сегмент являє собою систему навігаційних супутників, що обертаються по еліптичних орбітах навколо Землі. На будь-якій орбіті присутні кілька супутників. Навігаційний супутник містить на борту радіоелектронну апаратуру, що випромінює в напрямку Землі шумоподібні безперервні радіосигнали, які мають інформацію потрібну для проведення навігаційних визначень апаратурою споживача.

Завдяки достатній кількості навігаційних супутників і особливим характеристикам радіосигналів апаратура споживача має можливість в будь-який час, при будь-яких кліматичних умовах приймати випромнені супутниками сигнали і визначати місце розташування, швидкість і час.

Сегмент користувачів потенційно складається з необмеженого числа навігаційних приймачів, які приймають сигнали навігаційних супутників і розраховують поточне розташування, швидкість і час з помилками, які визначаються супутниковою навігаційною системою і апаратурою споживача.

Сегменти наземних і космічних функціональних доповнень можуть і не використовуватись на всій поверхні Землі і являють собою апаратно-програмні комплекси, призначені для підвищення точності навігаційних визначень, цілісності, безперервності, доступності та експлуатаційної готовності системи. Завдяки даним сегментам можливий так званий *диференціальний режим* вимірювань навігаційних параметрів, що надає найбільш точні результати [4]. Тобто, *супутникова РНС*, на відміну від глобальної СРНС, повинна містити три основні компоненти: космічний сегмент, сегмент користувачів і наземний керуючий сегмент

Основними представниками середньовисотних супутникових РНС є дві системи “Навстар” та “Глонасс”, які відносяться до систем *другого покоління*.

Рішення про створення СРНС “Навстар” було прийнято у 1973 році міністерством оборони США. Таку систему глобального позиціонування (не плутати з глобальною СРНС) ще називають GPS (Global Positioning System). Назву позиціонування система отримала за визначення окрім координат, ще й складових вектора швидкості. Відповідальність за створення системи “Навстар” (Navstar-Navigational Satellite Time and Ranging – навігаційний супутник виміру часу та координат) було покладено на управління космічних та ракетних систем ВПС.

СРНС GPS призначена для глобального, всепогодного, пасивного, перешкодостійкого та високоточного навігаційно-часового забезпечення практично усіх військових споживачів. Така система забезпечує тривимірну

навігацію (широта, довгота, висота) з точністю місцезнаходження (МЗ) **5...10** метрів. Синхронізація бортового еталону часу досягає **5 - 15** нс. У цій системі проводиться вимір *псевдодальностей та псевдошвидкостей*.

Аналогом системи GPS, що була розроблена та запущена у Радянському Союзі, а зараз – Росії, є система Глонасс.

До складу космічної підсистеми GPS входить 28 ШСЗ (24 – робочі ШСЗ, 4 – запасні) на шести колових орбітах (по 4 на кожній) з висотою 20183 км. Період обертання супутників складає 12годин. Нахил орбіт складає 55° , рознесення за довготою 60° (див. рис.1.2). В зоні радіовидимості користувача в будь-який момент може знаходитись від 4 до 11 ШСЗ, що забезпечує можливість неперервного визначення трьох координат (довгота, широта, висота). СРНС має власний системний час, що виробляється одними з найважливіших елементів кожного ШСЗ, якими є рубідієві та цезієві стандарти частоти (стабільність $5 \cdot 10^{-13}$ та $2 \cdot 10^{-13}$ відповідно), по чотири модулі на кожному КА. Часові шкали всіх ШСЗ узгоджені між собою та синхронізуються системою єдиного часу. Підсистема контролю та управління здійснює слідкування за ШСЗ та забезпечує супутники інформацією, необхідною для формування радіонавігаційних сигналів та навігаційних повідомлень. Крім генерації коливань точного часу, атомні стандарти частоти є джерелами опорної частоти 10,23 МГц для бортового переддавача (ПРД), який випромінює сигнали на двох частотах: $f_{L1} = 1575,42$ МГц та $f_{L2} = 1227,6$ МГц. Ці частоти є кратними опорній частоті. Причиною використання значень саме цих частот є малий вплив атмосфери на поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ). Вихідна потужність бортових ПРД в різних модифікаціях КА може бути регульована в межах 50-60 Вт.

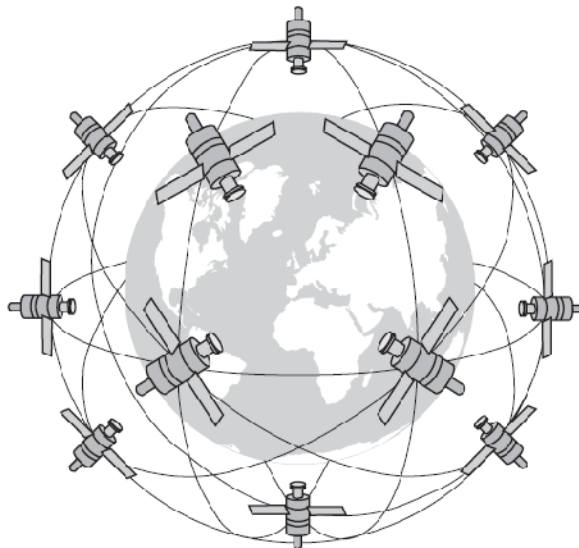


Рисунок 1.2 - Орбітальна структура системи GPSNAVSTAR

Крім стандартів частоти та ПРД до складу бортового устаткування входить синтезатор частот, блоки формування навігаційних сигналів, одна основна та дві резервних бортових електронно-обчислювальних машини, системи ор'єнтації та корекції орбіти, телеметрії, прийому сигналів наземного комплексу управління, терморегулювання та електроживлення.

Для передачі навігаційних сигналів застосовуються *фазовані антенні решітки* на основі *спіральних* випромінюючих елементів (див. рис.1.3). В лінії обміну даними з наземним комплексом управління використовуються *спірально-конічні антени* [6].

Слід відзначити, що електромагнітні коливання, які випромінюють спіральні антени розташовані на КА, мають *правосторонню колову поляризацію*. Це зроблено для зменшення впливу коливань відбитих від навколишніх предметів, розташованих на Землі, на процес місцевизначення. Також це дозволяє зменшити вплив іоносфери на розповсюдження даних коливань. Так як ефект Фарадея у даному випадку проявляється лише у зміні фази електромагнітних коливань, а не у повороті площини їх поляризації, як у випадку лінійно поляризованих ЕМХ.

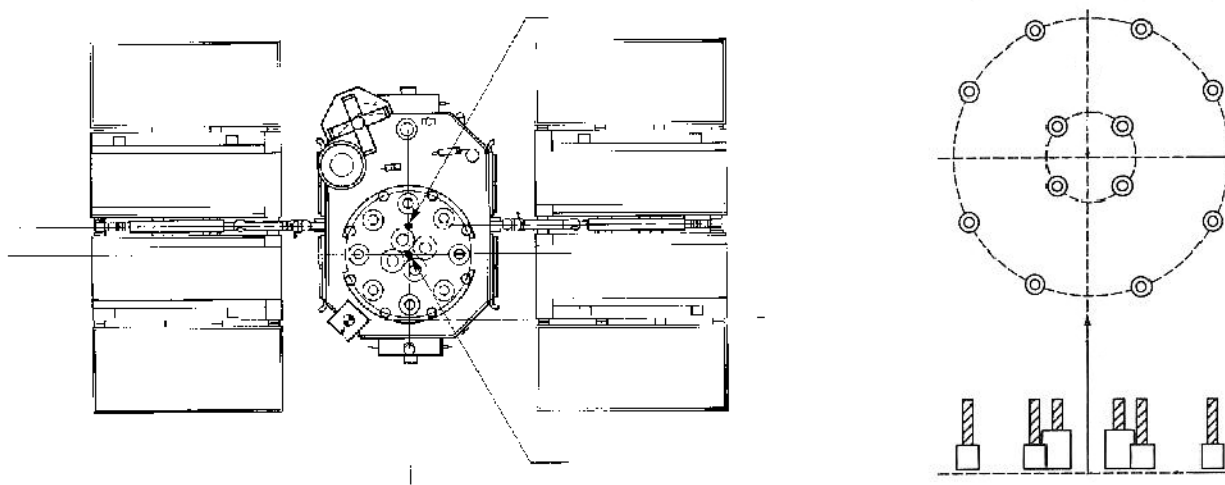


Рисунок 1.3 – ПРД антена. а – розташування антени на КА; б – вигляд збоку.

Використання антенної решітки на борту КА дає змогу формувати діаграму напрямленості (ДН) спеціальної форми, яка приведена на рис. 1.4. Це в свою чергу дає змогу *підвищити рівень сигналу* на вході ПРМ користувачів, для яких даний КА знаходиться відносно низько по відношенню до лінії горизонту. Як відомо з [6] основним принципом формування такої ДН є формування провалу у формі ДН за рахунок спеціального антенно-фідерного тракту (АФТ), який є пасивним і забезпечує необхідний розподіл потужностей та зсув фаз. На спіральні антени розташовані у внутрішньому колі антенної решітки подається 90% загальної потужності з передавального тракту. На спіральні антени зовнішнього кола подається 10% загальної потужності із зсувом фази, по відношенню до коливань в спільному тракті, на 180° . Результуюча ДН формується алгебраїчним додаванням ДН спіральних антен внутрішнього та зовнішнього кіл з врахуванням фазового зсуву між коливаннями, що до них підводяться.

За рахунок такої форми ДН антени ПРД вдається знизити необхідну потужність, що підводиться до антени ПРД [6]. При цьому рівень потужності на вході ПРМ при прольоті КА від лінії горизонту через зеніт над користувачем

приведено на рис. 1.5, без врахування ДН антени ПРМ та поглинання в атмосфері.

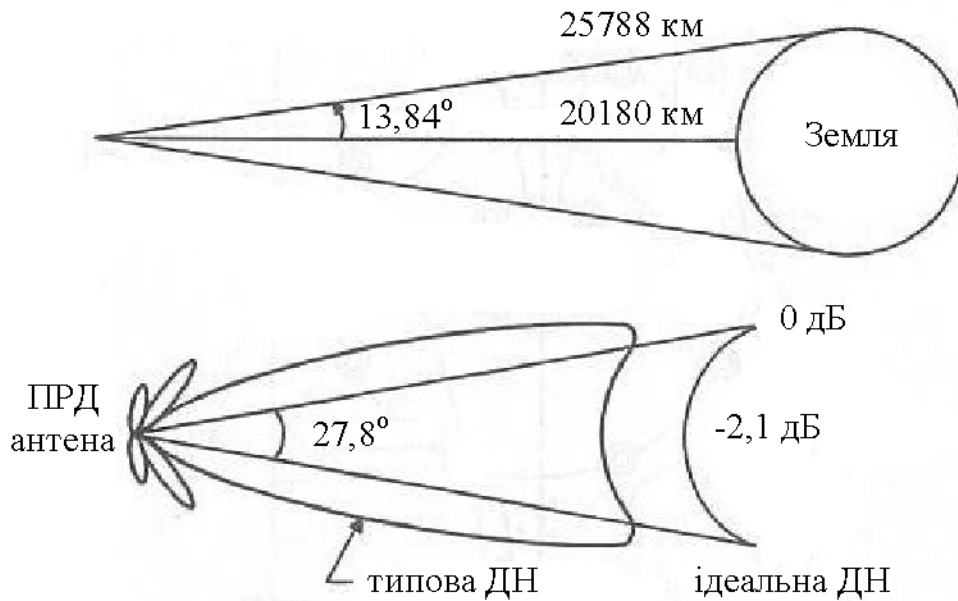


Рисунок 1.4 – До пояснення специфічної форми ДН ПРД антени

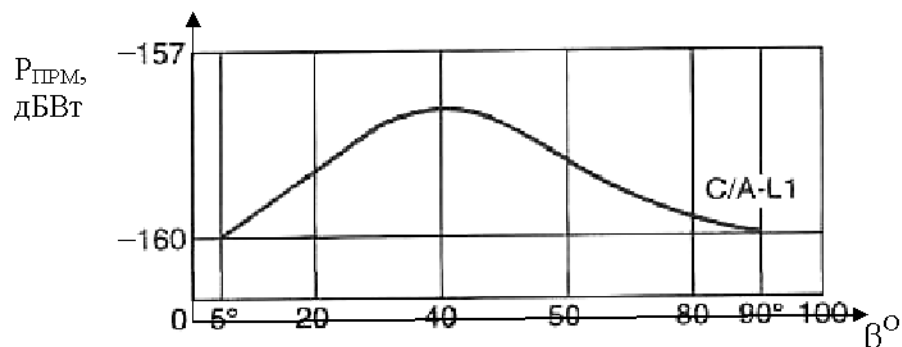


Рисунок 1.5 – Рівень потужності сигналу на частоті f_{L1} в залежності від кута підняття КА на горизонті

Окремим питанням теорії СРНС є формування складних сигналів, за допомогою яких здійснюється вимірювання псевдодальностей від фазового центру антени ПРМ апаратури споживача (АС) до фазового центру антени ПРД КА. Складна структура сигналів радіонавігаційних супутників обумовлена необхідністю енергетичної економії та використанням більшістю користувачів антен з дуже малою апертурою, порівняно, наприклад, з супутниковим телебаченням. Робота ПРМ при *рівні потужності шуму, що суттєво перевищує рівень потужності сигналу*, забезпечується завдяки *кореляційній обробці коливань в АС*. Щоб отримати високу точність вимірювань підвищеної завадостійкості в СРНС використовуються шумоподібні фазоманіпульовані сигнали, які є послідовностями радіоімпульсів із значеннями початкових фаз 0 та π . Щоб підвищити вірогідність правильного прийому символу коду використовують відносну фазову маніпуляцію (DEBPSK). Цей метод реалізується за допомогою перекодування вихідної послідовності символів за

спеціальними алгоритмами [1], при передачі $a_{\text{вих}i} = a_{\text{вих}i} \oplus a_{\text{вих}i-1}$, а при прийомі $a_{\text{вих}i} = a_{\text{вих}i-1} \oplus a_{\text{вих}i}$. Ці алгоритми реалізуються схемами побудованими на основі суматора із зворотнім та прямим зв'язками, відповідно.

У системі GPS інтерфейс між навігаційними супутниками та АС складається з двох радіоліній L-діапазону частот. При цьому використовується *кодове розділення* радіосигналів навігаційних КА.

Бортова апаратура навігаційних супутників GPS генерує три типи кодів дальності (PRN-коди) [1]:

а) точний важкодоступний P(Protected)-код, який є основним кодом дальності. Він має *тривалість* 7 днів і передається зі швидкістю 10,23 Мбіт/с;

б) Y-код, який може використовуватися замість P-коду, для дезінформації;

в) грубий легкодоступний C/A(Clear/Acquisition)-код, який доступний усім споживачам. Спеціальними споживачами він використовується для виявлення P чи Y-коду. C/A-код, що застосовується для *ідентифікації номера КА*, є кодом Голда, що формується на основі 10-розрядного регістру зсуву. Він має *тривалість* 1 мс і передається зі швидкістю 1,023 Мбіт/с. Послідовність C/A-коду є сумою за модулем 2 послідовностей G1 та послідовності G2i, яка формується затримкою на 5,...,950 символів відносно базовою послідовності G2, за допомогою чого генерується набір 36 взаємовиключних C/A кодів. Спрощену схему формування радіонавігаційного сигналу супутника GPS зображено на рис. 1.6. Квадратурні складові несучої частоти L1 модулюються двійковими послідовностями P- та C/A-кодів (складова C/A коду зміщена по фазі відносно P-коду на 90°), до яких за модулем 2 додаються дані цифрової інформації навігаційного повідомлення [1]. Кількість елементів C/A коду становить $N = 2^{10} - 1 = 1023$. Тривалість одного елемента $\tau_G = 1/1,023 \times 10^6 \text{ Гц} = 980 \text{ нс} \approx 1 \text{ мкс}$. Тривалість елемента одного інформаційного коду дорівнює $T_\varnothing = 20N\tau_G \approx 20 \text{ мс}$. В даному випадку швидкість передачі інформації дуже мала, але при цьому ймовірність помилки в таких повідомленнях практично виключена [5].

Несуча частота L2 модулюється двійковою послідовністю лише P-коду, до якої за модулем 2 додається цифрова інформація навігаційного повідомлення з тривалістю одного біта 20мс. Основою для формування названих компонентів сигналу є бортовий стандарт частоти.

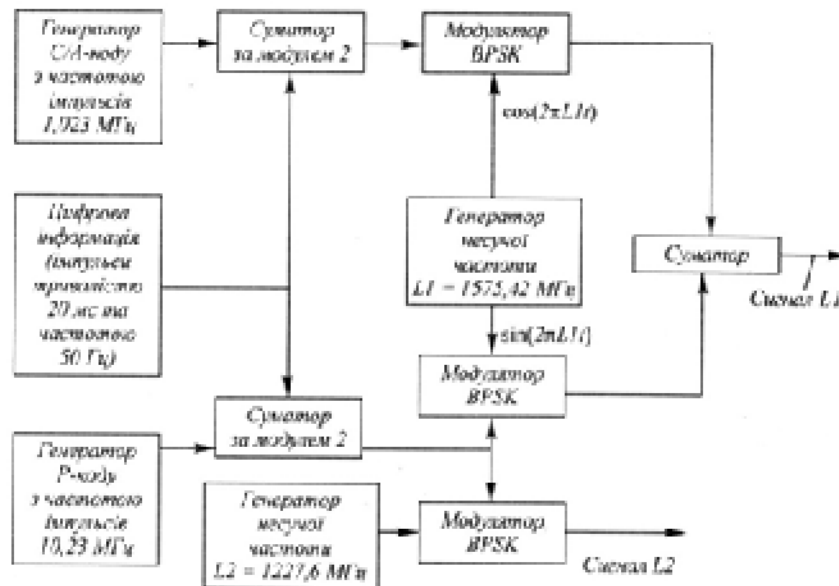


Рисунок 1.6 – Структурна схема формування радіонавігаційного сигналу.

Для навігаційних супутників усі елементи (несучі, коди і дані) сигналу, що передається, когерентні і створюються одним джерелом частоти. Номінальна частота цього джерела для наземного спостерігача становить 10,23 МГц.

Послідовність G1 у генераторі C/A-коду формується 10-розрядним регістром зсуву та суматором за модулем два. У зв'язку із різницею тривалості дискрет у 10 разів ширина спектру сигналу, що формується P – кодом у 10 разів ширша, ніж сигналу C/A– кода. Це важливо враховувати при їх випроміненні на одній несучій (рис. 1.7). Схема P – кода дозволяє його приймати тільки споживачам що мають дешифратор ключового слова NOW. Ключове слово передається у складі C/A-коду, сигнал якого у два рази потужніший за сигнал P-кода. Це полегшує знаходження C/A-сигналу. Для розрізнення P-кода та C/A – кода на одній несучій частоті вони передаються у квадратурі (зсунуті на 90°).

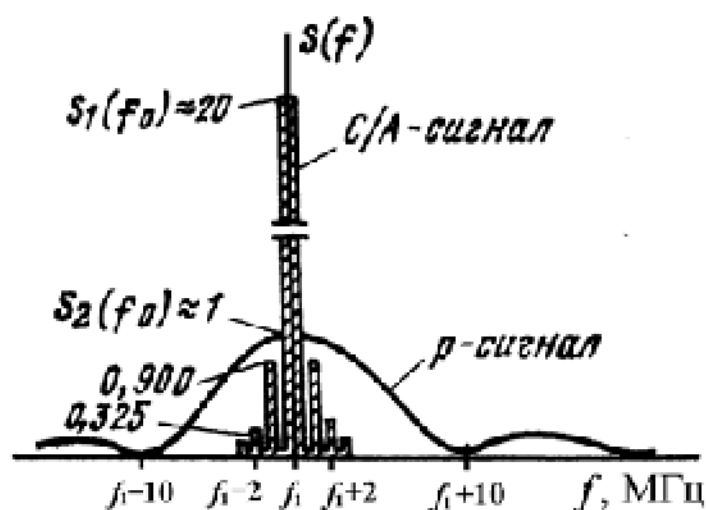
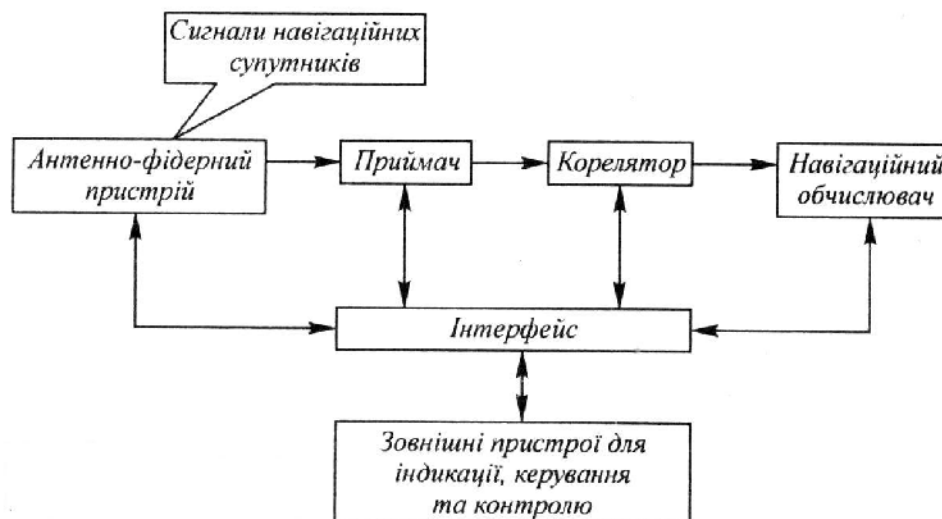


Рис. 1.7. АЧХ сигналу частоти L1

В загальному випадку АС працює за схемою рис. 1.8. Сигнали навігаційних супутників (GPS та ГЛОНАСС) приймаються антеною, підсилюються та надходять на вхід приймача. У приймачі вони переносяться з

несучої на проміжну частоту і за допомогою АЦП переводяться в цифрову форму.



Рисунок

1.8 –

Узагальнена структурна схема АС

У кореляторі цифрові сигнали формуються у вигляді певних цифрових відліків, які є основою для реалізації алгоритмів пошуку сигналів за затримкою, частотою, спостереженням за супутниками та виділенням навігаційних повідомлень.

Навігаційний обчислювач керує складовими апаратури споживача в цілому і здійснює обчислювальні процедури для первинного та вторинного оброблення сигналів. Інтерфейс забезпечує взаємодію складових АС з зовнішніми пристроями та між собою.

Основні технічні характеристики GPS і ГЛОНАСС наведені у табл. 1.1 .

Таблиця 1.1 - Основні технічні характеристики GPS і ГЛОНАСС

| Параметр | GPS | ГЛОНАСС |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Помилка визначення місцеположення в горизонтальній площині, м | 100 - 95% часу; 300 - 99,99% часу | 28 - 95% часу; 140 - 99,99% часу |
| Помилка вертикальній площині, м | 156 - 95% часу; 500 - 99,99% часу | 60 - 95% часу; 585 - 99,99% часу |
| Помилки при передачі даних часу, нс | 340 - 95% часу | 700 - 95% часу |

| | | |
|--|--|---|
| Помилки параметрів дальності не перевищують такі межі: | а) помилка по дальності будь-якого супутника - 150 м; б) помилка швидкості зміни дальності будь-якого супутника -2 м / с. | Не призначені |
| Експлуатаційна готовність | не менше 99.85% | не менше 99,64%. |
| Несуча частота | 1575,542 МГц (L1 GPS) і 1227,6 МГц (L2 GPS) з використанням методу кодового поділу каналів (CDMA). | 1598,0625, ..., 1609,315 (L1 ГЛОНАСС), 1242,9375, ..., 1251,6875 (L2 ГЛОНАСС), використовуючи метод частотного поділу каналів (FDMA). |

Продовження таблиці 1.1

| | | |
|--|---|---|
| Спектр сигналу | ± 12 МГц з центром на частоті L1 (1563,42,..., 1587,42 МГц) | $\pm 5,75$ МГц з центром на кожній частоті |
| Модуляція радіосигналу | Сигнал системи GPS, що передається на частоті L1 модулюється за допомогою двох позиційної фазової маніпуляції псевдо-випадковим шумоподібним (PRN) грубим кодом захоплення і супроводу (C/A) з тактовою частотою 1,023 МГц. Кодова послідовність повторюється кожну мс. | Кожен супутник ГЛОНАСС передає на своїй несучій частоті навігаційний радіосигнал, модульований двійковою послідовністю за допомогою двохпозиційної фазової маніпуляції з тактовою частотою 0,511 МГц. Кодова послідовність повторюється кожну мс. |
| Рівень потужності радіосигналу на виході лінійно поляризованої антени з коефіцієнтом посилення 3 дБі | -160дБВт до -155дБВт для будь-якої орієнтації антени, ортогональної до напрямку поширення при куті піднесення 5 градусів або більше. | -161дБВт до -155,2дБВт для будь-якої орієнтації антени, ортогональної до напрямку поширення при куті піднесення 5 градусів або більше. |
| Поляризація | Правостороння кругова поляризація (за годинниковою стрілкою в напрямку випромінювання) | |
| Навігаційна інформація | Навігаційна інформація, що передана супутником, включає необхідні дані, щоб визначити: час передачі; місце розташування супутника; стан супутника; параметри бортової шкали часу супутника; стан орбітального угруповання. | |

| | |
|-----|--------------------------------|
| Час | Час прив'язується до шкали UTC |
|-----|--------------------------------|

Існує три види апаратури споживачів. Апаратура *першого* класу призначена для швидких високоточних визначень МЗ та швидкості високодинамічних споживачів. Вона п'ятиканальна. Чотири перших канали здійснюють слідування за несучими частотами чотирьох ШСЗ одночасно. Для кожного з них формується індивідуальна ДС та виділяються блоки автоматичного підстроювання частоти та слідування за часовою затримкою сигналу. П'ятий канал забезпечує послідовне слідування за затримками сигналів на двох частотах випромінення для усіх чотирьох ШСЗ з метою усунення помилок за рахунок розповсюдження радіохвиль.

Низькодинамічні споживачі використовують апаратуру *другого* класу. У такій апаратурі є два канали. Перший з них здійснює послідовне слідування за несучими частотами чотирьох ШСЗ. Другий канал, як і п'ятий у апаратурі першого класу, слідує за затримкою С/А- чи Р-кодів. Така побудова спрощує апаратуру споживачів. До її *недоліків* відноситься збільшення у 2-3 рази, у порівнянні з апаратурою першого класу, часу першого навігаційного визначення.

Найменшу вартість та складність має апаратура *третього* класу. Вона приймає лише сигнали на частоті L_1 (1575,42 МГц), тобто працює лише із сигналом з С/А – кодом, а також проводить виміри за чотирма ШСЗ. При такій побудові погіршується точність виміру квазідальності із-за збільшення тривалості сигналу на виході системи оптимальної обробки. Погіршення точності обумовлюється також некомпенсованістю помилки, що виникає за рахунок зміни умов розповсюдження радіохвиль. При такій будові точність визначення МЗ споживача досягає 100 – 200 метрів (для апаратури першого та другого класу помилка не перевищує 10 метрів).

Література

1. Фриз С.П., Андреев О.В., Рихальський О.Р., Дубина О.Ф. Теорія і техніка радіолокації та радіонавігації : навчальний посібник. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. – 178 с.
2. Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П. Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с.