

Тема 2

Вимірювання координат і параметрів руху цілей

**Заняття №1 Вимірювання координат і параметрів руху
цілей**

Питання заняття

1. **Методи дальнометрії.**
2. **Методи вимірювання кутових координат.**
3. **Методи вимірювання швидкості.**

Методи дальнометрії

В активній суміщеній РЛС дальність до цілі визначається виразом:

$$D = \frac{Ct_3}{2}$$

де C – швидкість розповсюдження радіохвиль,
 t_3 – час розповсюдження радіохвиль від РЛС до цілі і назад (тобто час затримки прийнятого сигналу відносно зондувального).

В залежності від виду зондувального сигналу (ЗС) величина t_3 може визначатися шляхом вимірювання часового, частотного або фазового зсуву прийнятого сигналу відносно випроміненого (опорного). Відповідно розрізняють три методи вимірювання дальності (віддалі, відстані) до цілі або дальнометрії:

- імпульсний;
- частотний;
- фазовий.

1.1 Імпульсний метод дальнометрії.

Суть методу. Імпульсний метод дальнометрії засновано на безпосередньому вимірюванні часу запізнювання відбитого від цілі радіоімпульсу відносно випроміненого.

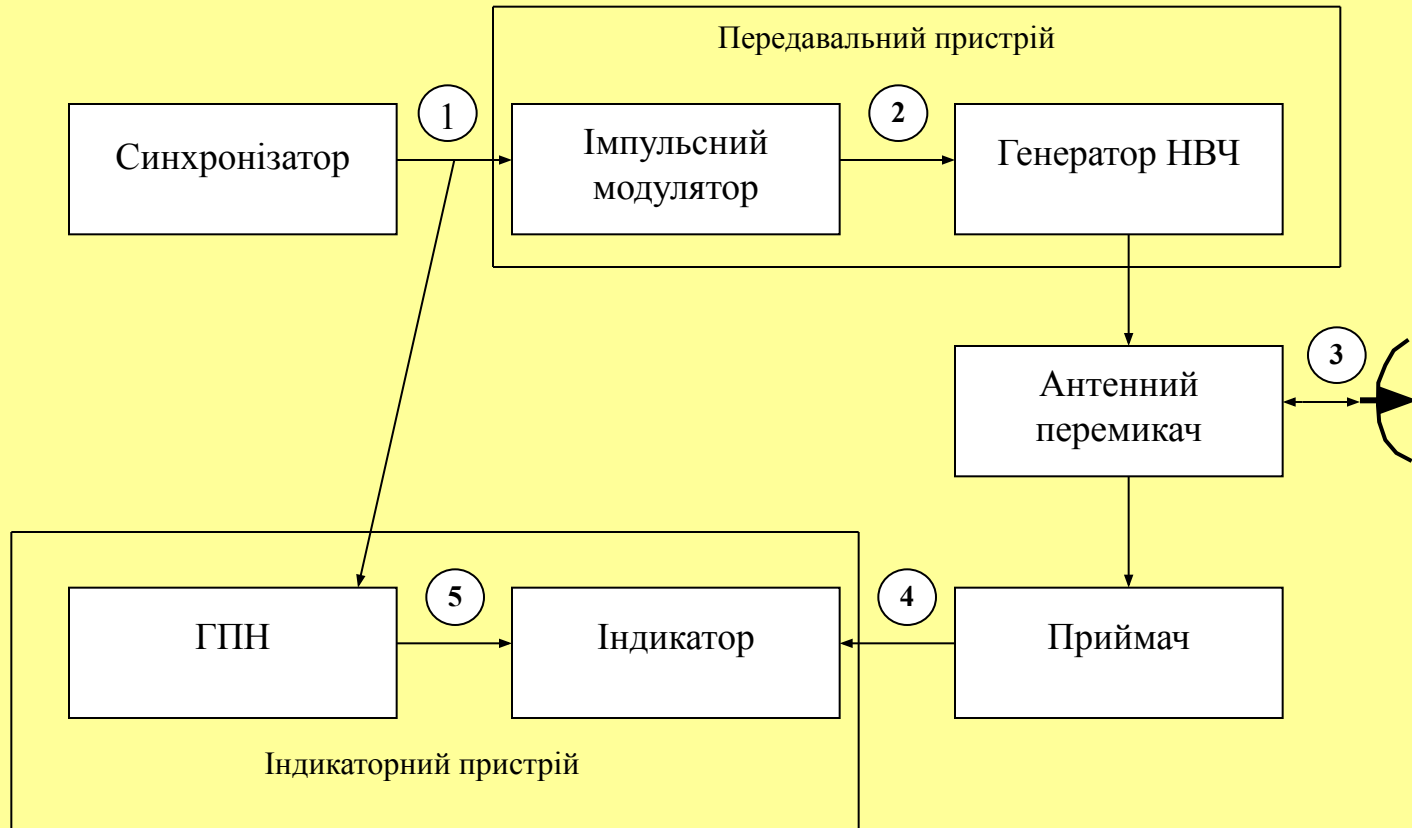


Рис. 1. Спрощена структурна схема імпульсної РЛС

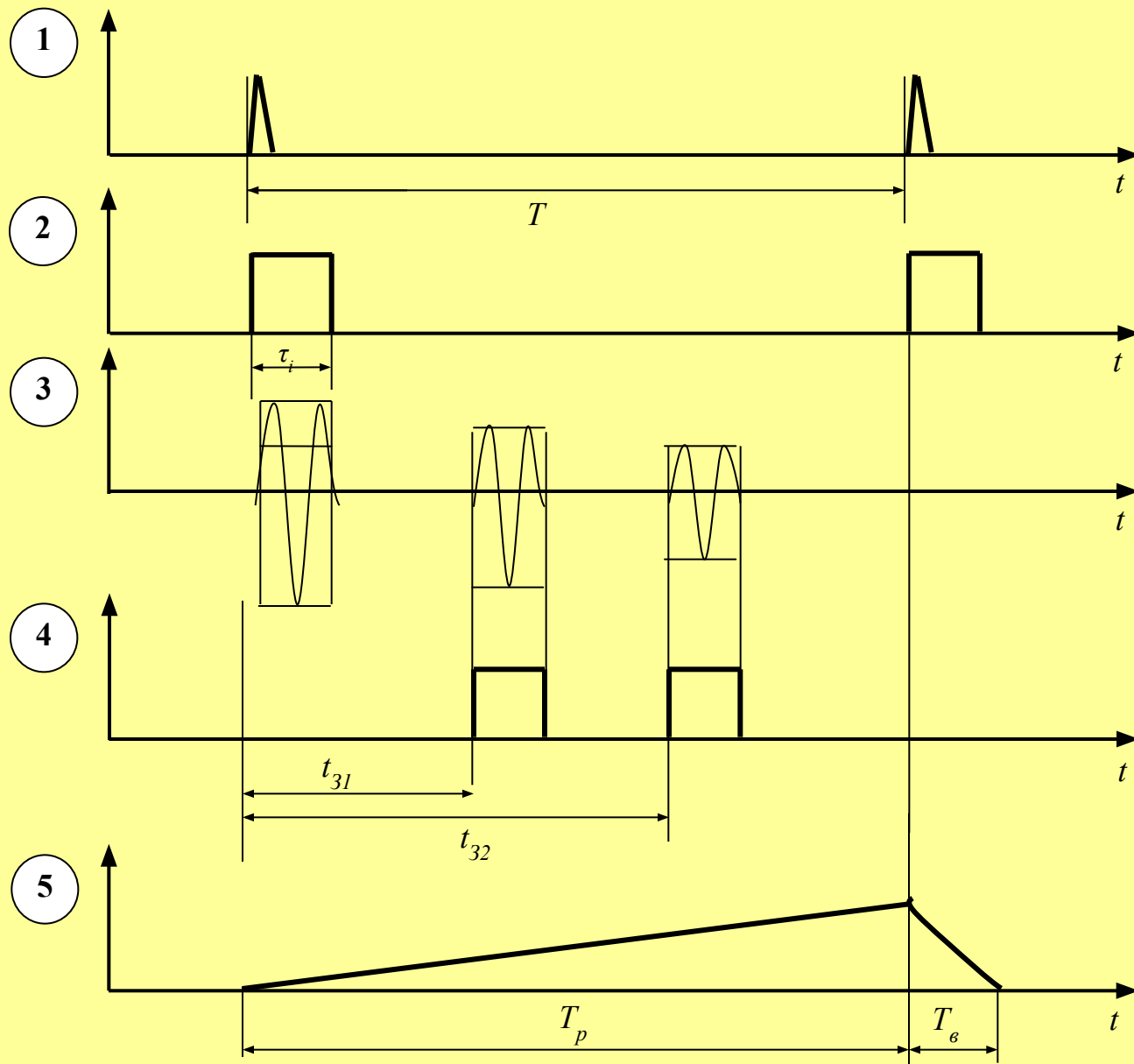


Рис. 2. Часові діаграми до структурної схеми імпульсної РЛС

Синхронізатор – забезпечує одночасний запуск передавального й індикаторного пристроїв. Виробляє короткі відеоімпульси (тривалість порядку одиниць мікросекунд) і задає певну частоту повторення зондувальних сигналів.

Модулятор виробляє потужні прямокутні відеоімпульси.

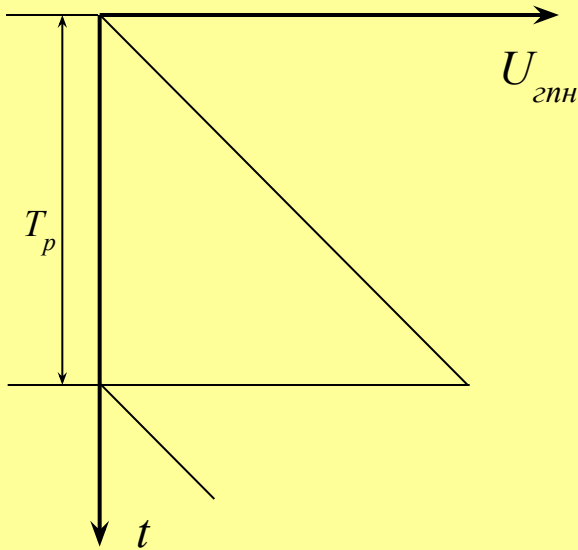
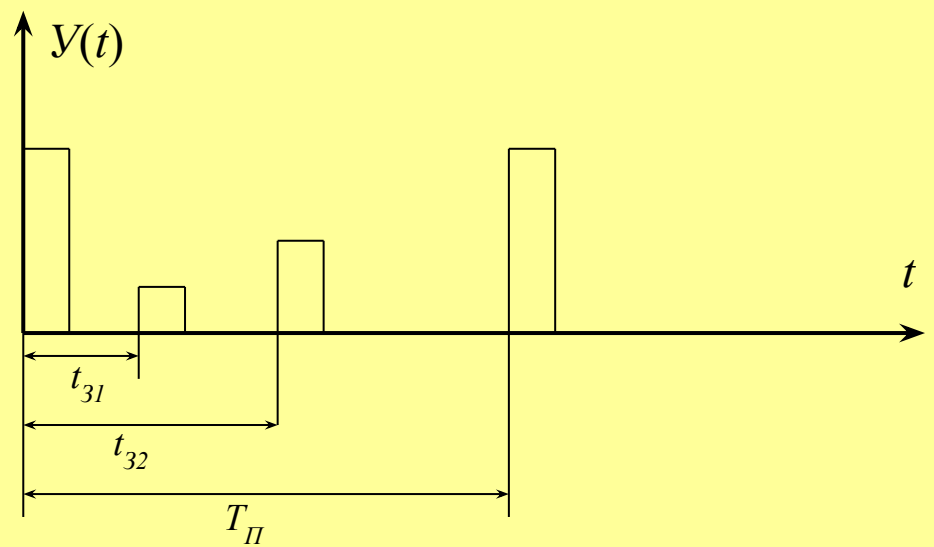
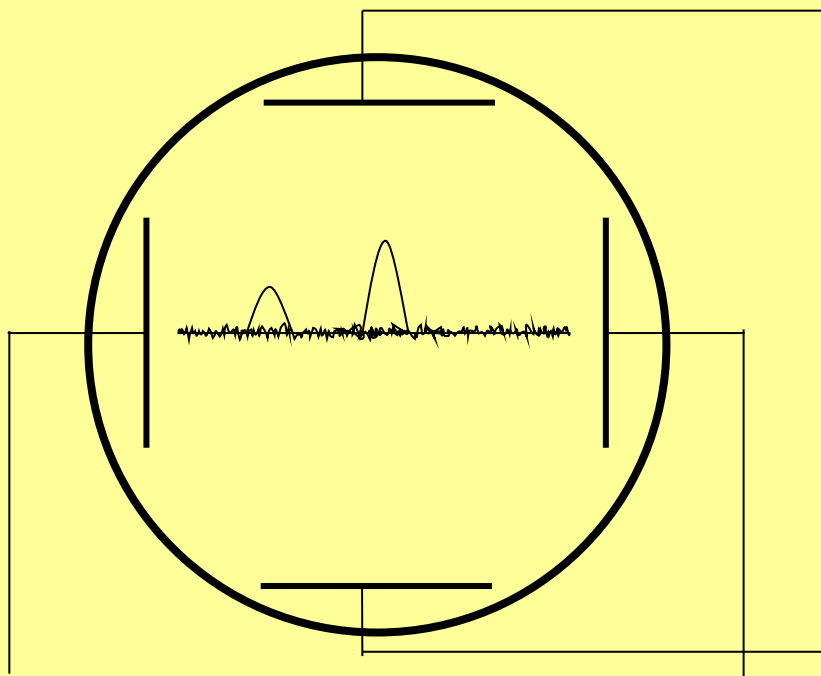
Генератор НВЧ – перетворює енергію модулюючих імпульсів в енергію надвисокочастотних коливань.

Антенний перемикач – підключає антену до передавача на час випромінювання ЗС і до приймача в паузах між зондувальними імпульсами.

Антенна випромінює потужні НВЧ радіоімпульси у простір і приймає відбиті від цілей НВЧ радіоімпульси.

Приймач підсилює відбиті НВЧ сигнали і перетворює їх у відеосигнали.

Індикаторний пристрій відображує на екрані електронно-променевої трубки сигнали відлуння від цілей і масштабні мітки, що призначені для візуального вимірювання координат.



Передавач і ГПН запускаються водночас імпульсами синхронізатора, тому випромінювання ЗС і розгортка на екрані починаються в один і той же момент часу. Відстань, на яку зміщується розгортка до моменту приходу сигналу відлуння дорівнює:

$$L = V_p t_3 = \frac{2V_p D}{C} = MD$$

**де V_p – швидкість розгортки;
 M – масштаб розгортки.**

Рис. 3. Пояснення до принципу роботи амплітудного індикатора РЛС

Індикатори з амплітудною відміткою часто називають індикаторами типу *A*. В РЛС кругового огляду використовують індикатори з відміткою яскравості (індикатори типу *B*). Прикладом може служити індикатор кругового огляду (ІКО). Про амплітуду сигналу можна судити по яскравості відмітки на екрані ЕПТ.

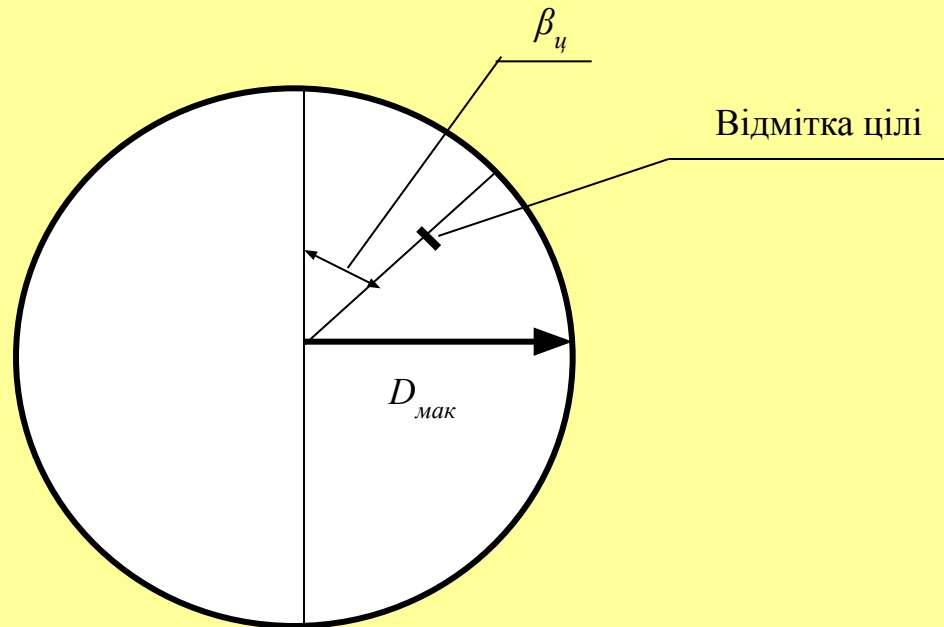


Рис. 4. Індикатор кругового (колового) огляду

Частота повторення F_n зондувальних імпульсів вибирається за умов однозначного вимірювання дальності до цілі.

Однозначне визначення дальності в імпульсній РЛС можливо у випадку, коли час запізнення t_{3max} , котрий відповідає максимальній дальності виявлення, що визначається енергетичним потенціалом РЛС, не перевищує період слідування імпульсів T_n .

$$T_n > t_3 = \frac{2D_{max}}{C} \Rightarrow F_n = \frac{1}{T_n} < \frac{1}{t_3} = \frac{C}{2D_{max}}$$

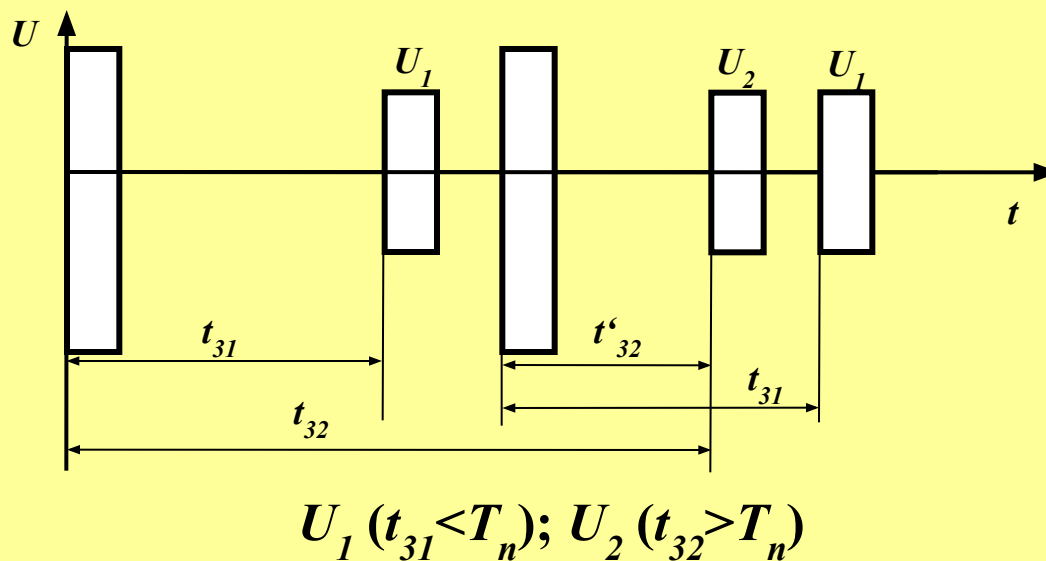


Рис. 5. Пояснення до неоднозначності виміру дальності

Роздільна здатність по дальності. Тривалість ЗС значно менша за період повторення цих імпульсів. Це дозволяє вимірювати дальність до багатьох цілей, котрі розташовані на одному напрямку. Таким чином імпульсний метод забезпечує розділення цілей по дальності і тим краще, чим менша тривалість імпульсу τ_i .

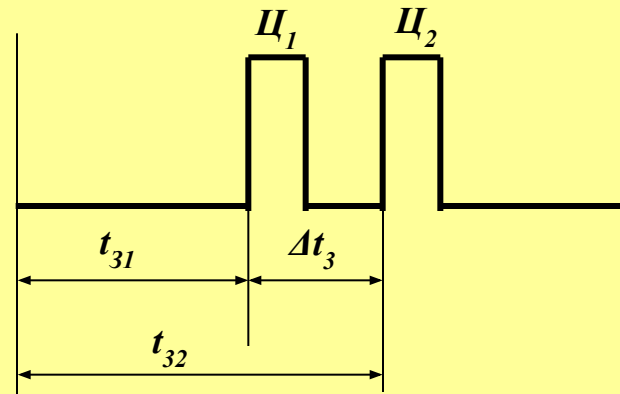


Рис. 6. Пояснення до роздільної здатності по дальності

$$\Delta t_3 = t_{32} - t_{31} = \frac{2(D_2 - D_1)}{C} \quad \Delta r = D_2 - D_1 \geq \frac{C\tau_i}{2}$$

$$\Delta r = \frac{C\tau_i}{2} \text{ - потенціальна роздільна здатність}$$

Реальна роздільна здатність відрізняється від потенціальної і в загальному випадку залежить від ступеня спотворення форми імпульсу в приймачі і індикаторі.

Загальною мірою роздільної здатності є *роздільний об'єм* простору. При імпульсному методі зондування він називається *імпульсним об'ємом* і характеризує сумісну роздільну здатність по дальності і кутовим координатам.

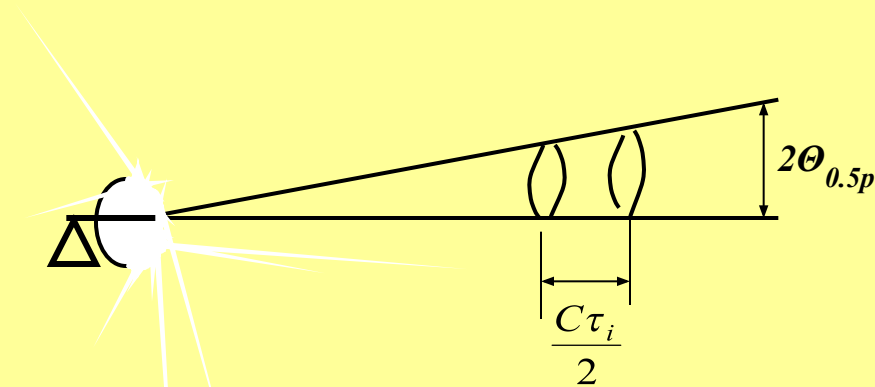


Рис. 7. Пояснення до роздільного об'єму

Переваги та недоліки методу.

Переваги: 1. Випромінювання ЗС і прийом відбитого від цілі сигналу рознесенні у часі. Це дозволяє використовувати одну антену на передачу та на прийом.

2. Огляд по дальності і її вимірювання здійснюється водночас простими засобами.

3. Висока роздільна та інформаційна здатність РЛС.

4. Простота створення імпульсних передавачів і розв'язання приймально-передавальних трактів.

Недоліки: 1. Для забезпечення великої дальності виявлення треба випромінювати велику імпульсну потужність, що обмежується можливим пробоем трактів каналізації зондувальних сигналів від передавача до антени і пов'язано з використанням громіздких імпульсних модуляторів.

2. Обмежена можливість вимірювання малої дальності. Мінімальна дальність виявлення імпульсних РЛС визначається величиною:

$$D_{\min} = \frac{C(\tau_i + t_g)}{2}$$

де t_B – час відновлення чутливості приймача.

3. Неоднозначність вимірювання радіальної швидкості цілі, а також наявність явища “сліпих швидкостей” (усувається вобуляцією частоти повторення) і труднощів практичної реалізації системи селекції рухомих цілей.

1.2 Частотний метод дальнометрії.

Суть методу. Частотний метод дальнометрії засновано на використанні в якості зондувального сигналу неперервних частотно-модульованих коливань. Визначення дальності до цілі засновано на вимірюванні прирощення частоти передавача за час розповсюдження сигналу до цілі і назад, тобто за час затримки t_3 .

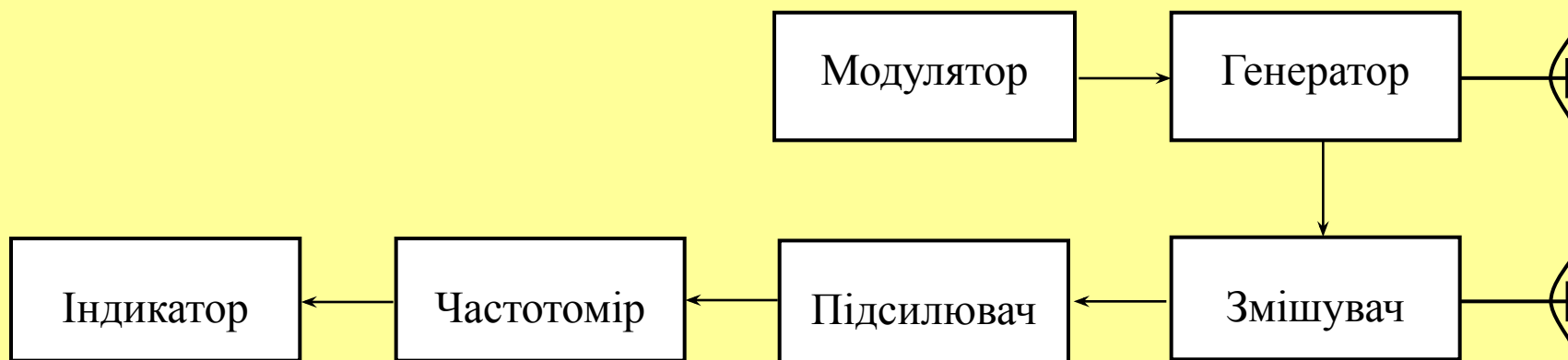


Рис. 8. Структурна схема простішого частотного радіолокатора

При лінійному змінюванні частоти ЗС $f(t)=kt$, де k – крутизна модуляційної характеристики генератора $k = \Delta f_m / T_m = \Delta f_m F_m$. Частота прийнятого сигналу в момент порівняння відповідає $f(t-t_3)=k(t-t_3)$. В результаті змішування виділяється частота биття F_b , котра дорівнює абсолютному значенню різниці миттєвих частот випроміненого і прийнятого сигналів

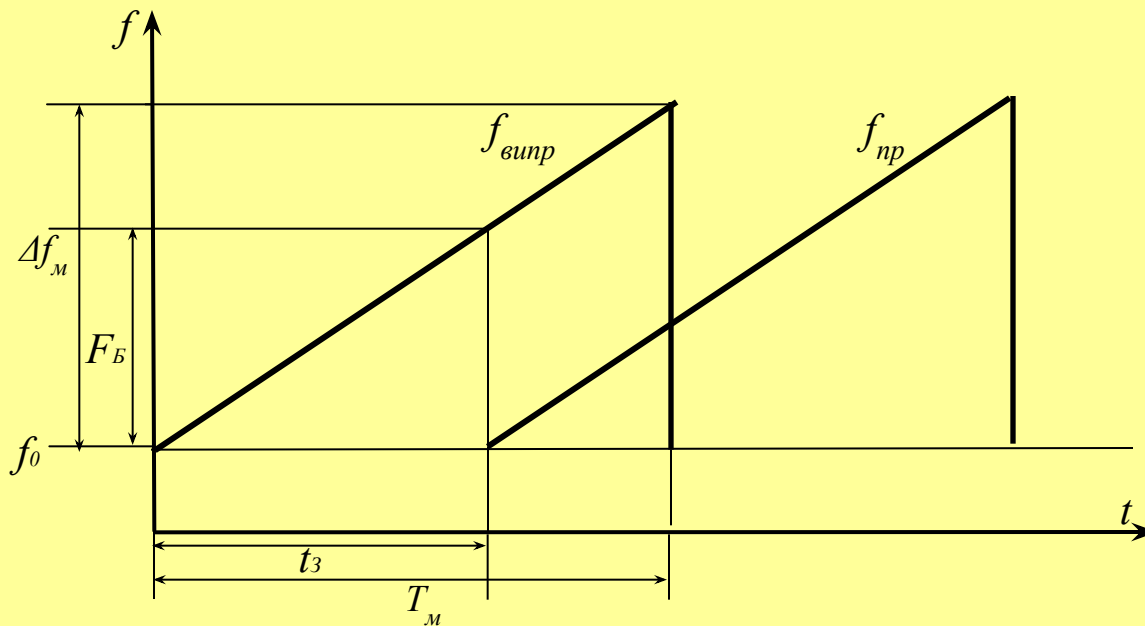


Рис. 9. Часові діаграми до структурної схеми частотної РЛС

$$F_b = |f(t) - f(t-t_3)| = |kt - k(t-t_3)| = kt_3 \rightarrow t_3 = \frac{F_b}{k} \quad \text{а отже} \quad D = \frac{CF_b}{2k}$$

Переваги та недоліки методу.

Переваги: 1. Великі можливості щодо підвищення енергетичного потенціалу в зв'язку з використанням неперервного випромінення.

2. Можливість вимірювання дальності до цілі на дуже малих відстанях:

$$R_{\min} = \frac{C}{4\Delta f}$$

$2\Delta f$ – ширина смуги пропускання вимірювального фільтру.

Недоліки: 1. Наявність двох антен і необхідність забезпечення високого ступеня їх розв'язки (до 80 дБ).

2. Жорсткі вимоги до стабільності закону змінювання частоти.

1.3. Фазовий метод дальнометрії.

Суть методу. При фазовому методі дальнометрії в якості зондувального сигналу використовують неперервне немодульоване коливання. Час запізнення t_3 може визначатися шляхом вимірювання різниці фаз відбитого і випроміненого (опорного) сигналів.

$U_1(t) = U_1 \cos(2\pi f_0 t + \phi_0)$ – сигнал з виходу передавача

$U_2(t) = U_2 \cos[2\pi f_0 (t - t_3) + \psi + \phi_0] = U_2 \cos[2\pi f_0 t - \phi_3 + \psi + \phi_0]$ – сигнал на вході приймача

де $\phi_3 = 2\pi f_0 t_3$ – запізнювання по фазі за рахунок кінцевого часу розповсюдження радіохвилі;

ψ – стрибок фази коливання при відбитті від цілі;

ϕ_0 – початкова фаза випроміненого сигналу.

Як видно, прийняті коливання відрізняються від опорних зсувом фази φ_3 , котрий несе інформацію про дальність до цілі. Але практично цю інформацію виділити неможливо так як:

- невідома величина стрибка фази при відбиванні;
- однозначне визначення дальності можливо лише в діапазоні змінювання φ_3 рівному $0 \div 2\pi$, що обмежує однозначне вимірювання дальності величиною $D_{max} \leq \lambda/2$, так як:

$$\varphi_3 = 2\pi f_0 t_3 = \frac{4\pi f_0 D}{c} \Rightarrow D_{одн} = \frac{c\varphi_3}{4\pi f_0} \leq \frac{c2\pi}{4\pi f_0} = \frac{c}{2f_0} = \frac{\lambda}{2}$$

Ці обмеження усуваються застосуванням двохчастотного радіолокатора

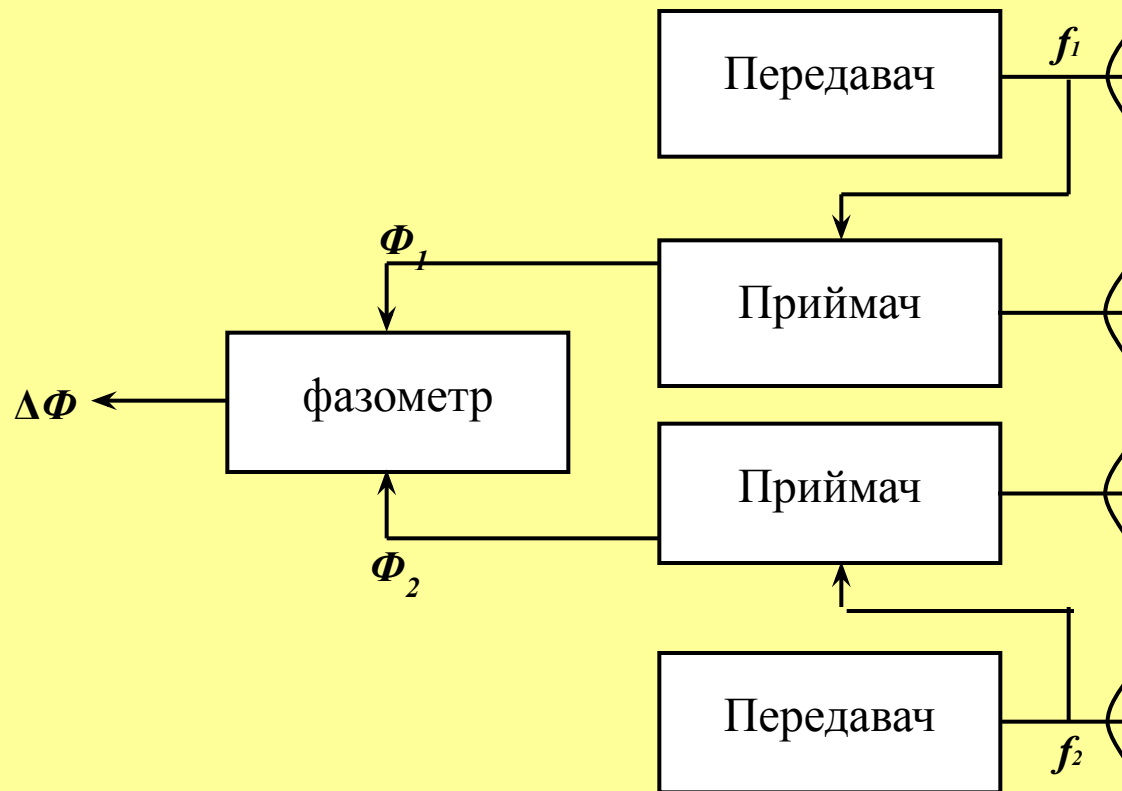


Рис. 10. Спрощена структурна схема двохчастотної фазової РЛС

Передавачі, що мають однакову потужність, працюють на близьких, але різних частотах f_1 і f_2 . Вихідні сигнали приймачів подаються на фазометр, котрий вимірює різницю фаз:

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2, \text{ де } \Phi_1 = 2\pi f_1 t_3 + \psi_1, \Phi_2 = 2\pi f_2 t_3 + \psi_2$$

Оскільки різниця частот f_1 і f_2 незначна, то стрибки фаз при відбитті від цілі приблизно однакові тому:

$$\Delta\Phi = 2\pi(f_1 - f_2)t_3 = 2\pi(f_1 - f_2)\frac{2D}{C} = \frac{4\pi F_p D}{C}$$

де $F_p = f_1 - f_2$ – різницева частота. Тобто різниця фаз пропорційна дальності до цілі:

$$D = \frac{C\Delta\Phi}{4\pi F_p}$$

Різницеву частоту F_p вибирають з двох протирічних умов:

1. Необхідність забезпечення однозначності відліку дальності

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi F_p D}{C} \leq 2\pi \Rightarrow F_p \leq \frac{C}{2D_{\max}}$$

2. Необхідність виключення перехресного приймання сигналів приймачами $F_p \geq \Pi$, де Π - смуга пропускання приймачів, котра вибирається за умов перекриття можливого діапазону доплерівських частот F_D і дорівнює $\Pi = 2F_{D\max}$.

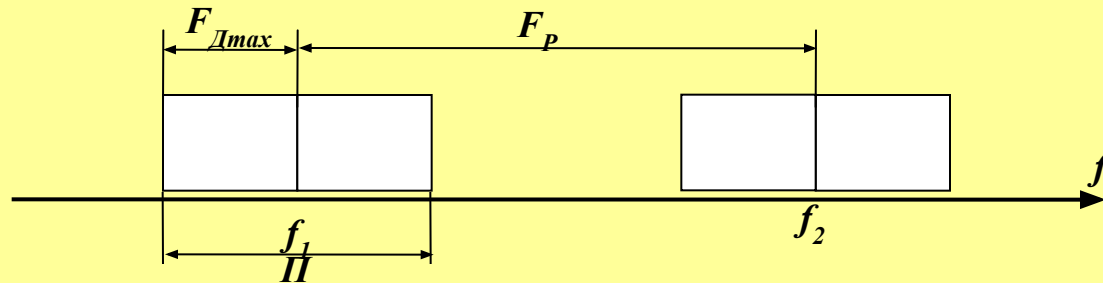


Рис. 11. Пояснення до вибору різницевої частоти F_p

З вищесказаного слідує, що різницева частота повинна лежати у межах:

$$2F_{D\max} \leq F_p \leq \frac{C}{2D_{\max}}$$

Переваги та недоліки методу.

Переваги: 1. Великі можливості щодо збільшення енергетичного потенціалу.

2. Відсутність “мертвої зони”, характерної для імпульсної РЛС.

3. Простота вимірювання і порівняно мала апаратурна похибка.

Недоліки:

1. Необхідність використання окремих антен на прийом і передачу.

2. Відсутність розділення по дальності (може вимірювати дальність тільки однієї цілі).

Методи вимірювання кутових координат

Процес вимірювання кутових координат називають *радіопеленгацією*. Пеленгація розв'язує задачі визначення двох координат або пеленгів цілі: азимуту β , і кута місця ε .

Найважливішою характеристикою пеленгатора є його пеленгаційна характеристика (ПХ) - залежність амплітуди сигналу на виході приймача від кутового положення його антени відносно цілі.

В залежності від того, який параметр радіосигналу створює основний вплив на формування ПХ, методи пеленгації поділяють на *амплітудні* і *фазові*.

При *амплітудному* методі кутове положення цілі (пеленг цілі) визначають за результатом аналізу амплітуди сигналу на виході одного або декількох каналів прийому.

При *фазовому* методі пеленг цілі визначається за результатом порівняння фаз сигналів на виході декількох (мінімум двох) просторово рознесених каналів прийому.

2.1 Одноканальні амплітудні методи пеленгації.

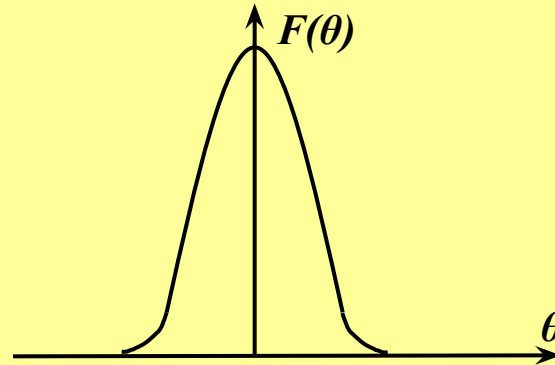


Рис. 12. ПХ для методу максимуму

Метод максимуму - пеленг визначається напрямком максимуму ПХ в момент, коли амплітуда відбитого сигналу сягає найбільшої величини.

Помилки вимірювання виникають через неточне визначення моменту максимуму і суттєво залежать від крутизни ПХ в точці відліку. **Недолік** - крутизна ПХ навколо точки максимуму (θ_0) низька, тому помилка вимірювання велика.

Перевагою методу є простота і велике відношення сигнал/шум в момент відліку.

Метод мінімуму засновано на використанні антен з пеленгаційною характеристикою, що наведена на рис.13

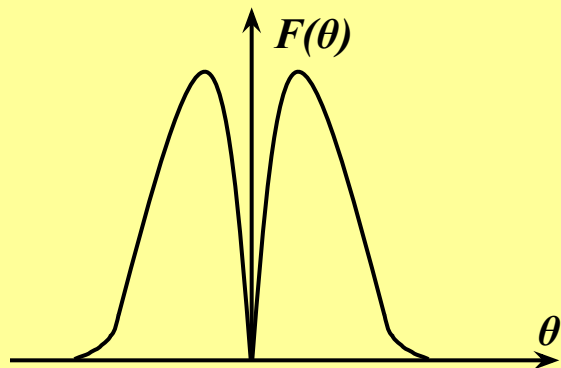


Рис. 13. ПХ для методу мінімуму

Пеленг відлічується по положенню антени в момент мінімального сигналу.

Недоліком методу є мале значення відношення сигнал/шум в момент пеленгації.

Перевагою методу є більш висока точність вимірювання за рахунок великої крутизни ПХ в точці відліку.

При *методі “вилки” (порівняння)* пеленг на ціль визначається як середнє двох відліків Θ_1 і Θ_2 , котрі відповідні однаковим значенням амплітуди сигналу на виході приймача при повороті антени в протилежні боки відносно напрямку на ціль.

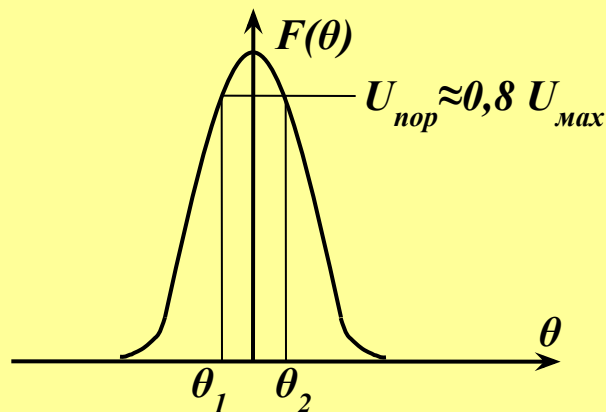


Рис. 14. ПХ для методу порівняння

В оглядових РЛС величини Θ_1 і Θ_2 визначаються на проході при рівності амплітуд сигналу вибраному значенню $U_{пор}$, яке звичайно встановлюється на рівні $0,8U_{макс}$.

Перевагою методу є висока точність визначення пеленгу і порівняльне високе відношення сигнал/шум при вимірюванні.

Метод рівносигнального напрямку – пеленг визначається, коли амплітуда сигналу відлуння в обох приймальних каналах однакова.

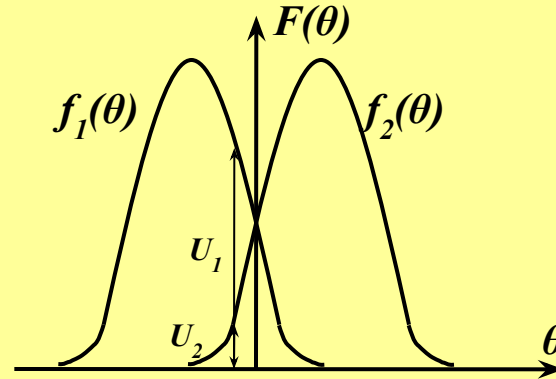


Рис. 15. ПХ для методу рівносигнального напрямку

Метод використовується в РЛС супроводження цілей по кутовим координатам. Точність пеленгації аналогічна методу порівняння.

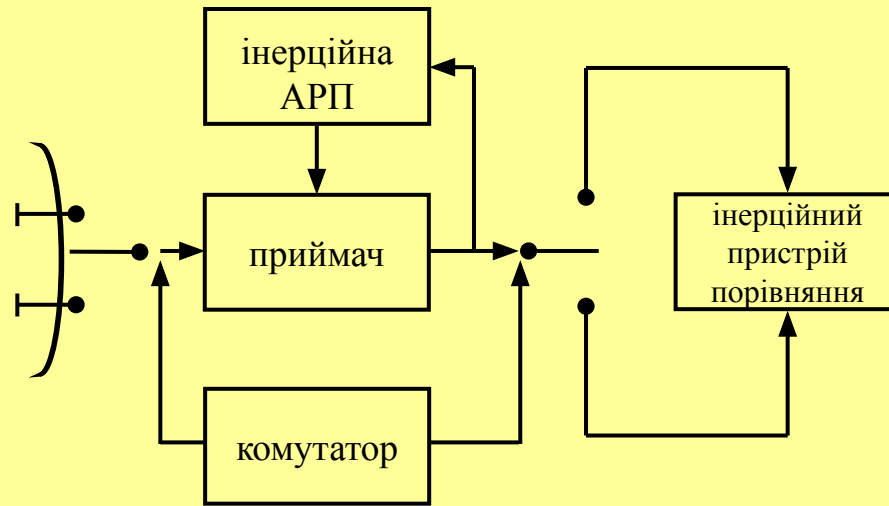


Рис. 16 Схема одноканального пеленгатора побудованого по рівносигнальному методу

Основним *недоліком* одноканальних пеленгаторів є те, що на точність пеленгації суттєво впливає флуктуація амплітуди сигналу відлуння. Це обумовлено тим, що відлік кутів θ_1 і θ_2 відбувається в різні моменти часу.

2.2 Багатоканальні (моноімпульсні) амплітудні методи пеленгації.

В багатоканальних пеленгаторах пеленг цілі визначається по результатам порівняння водночас тих чи інших параметрів сигналу на виході декількох (мінімум двох) каналів прийому.

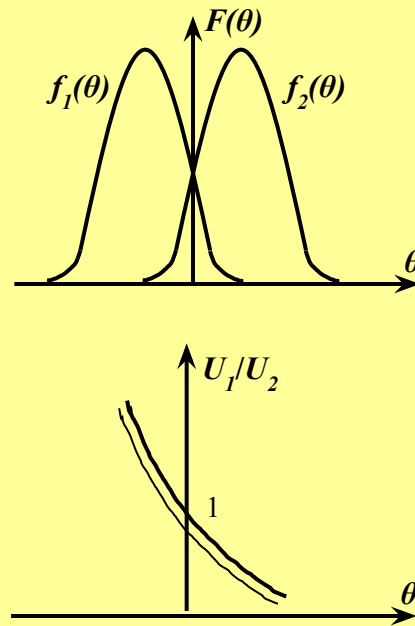


Рис. 17. ДН і ПХ моноімпульсного амплітудного пеленгатора (МАП)

Для порівняння амплітуд використовують два способи.

Перший засновано на використанні підсилювача проміжної частоти з логарифмічною характеристикою і пристроєм віднімання у якості схеми порівняння.

Другий - на застосуванні схеми автоматичного регулювання підсилення охопленої одним з каналів прийому.

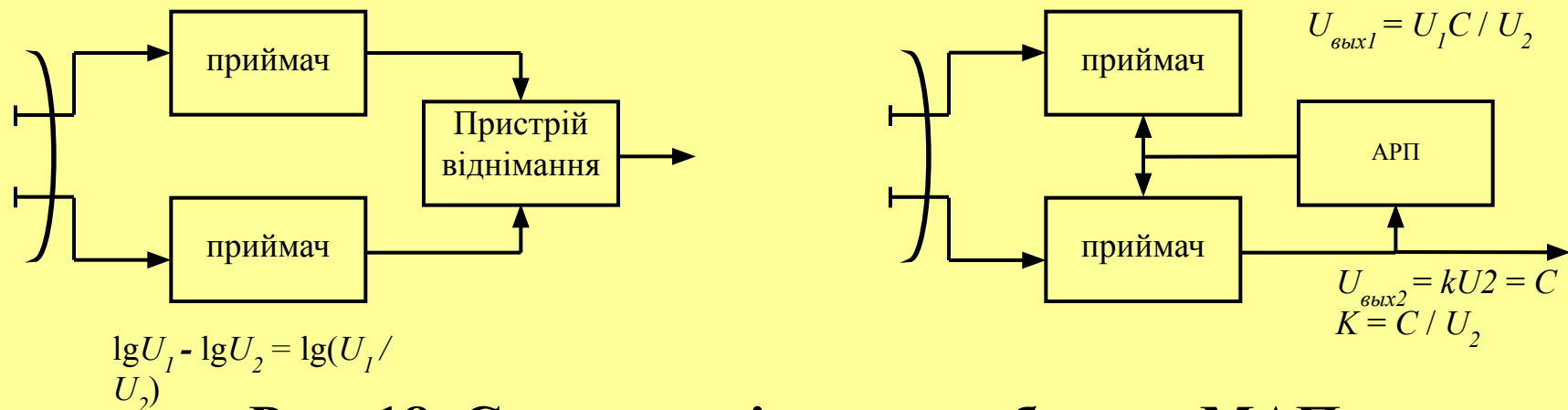


Рис. 18. Структурні схеми побудови МАП

Недолік - наявність додаткової помилки вимірювання за рахунок не ідентичності амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) прийомних каналів. Ця помилка викликає зсув рівносигнального напрямку (рис. 17 пунктир).

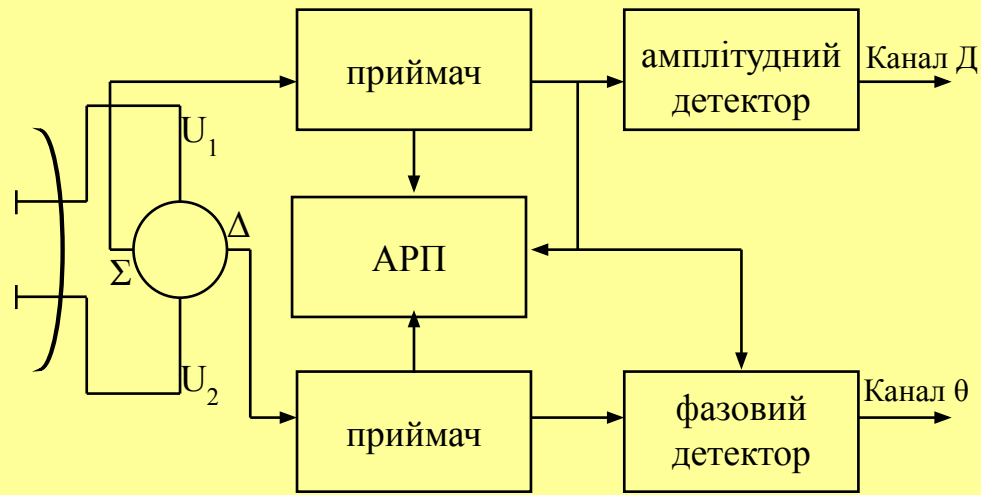


Рис. 19. Структурна схема МАП з сумарно-ріницевою обробкою сигналів

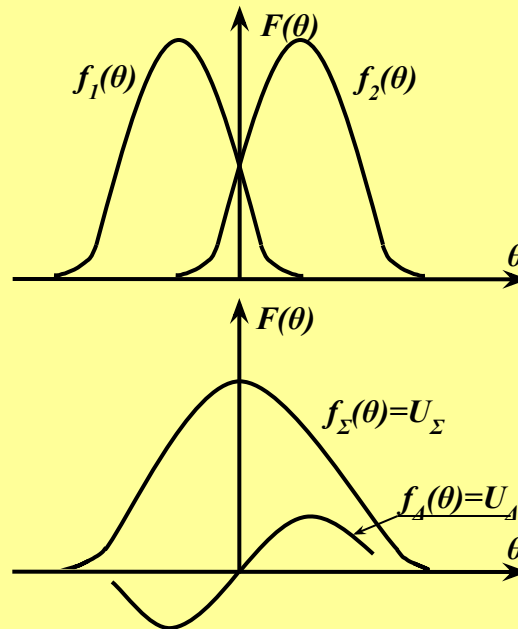


Рис. 20. ДН і сумарно-ріницева її характеристика

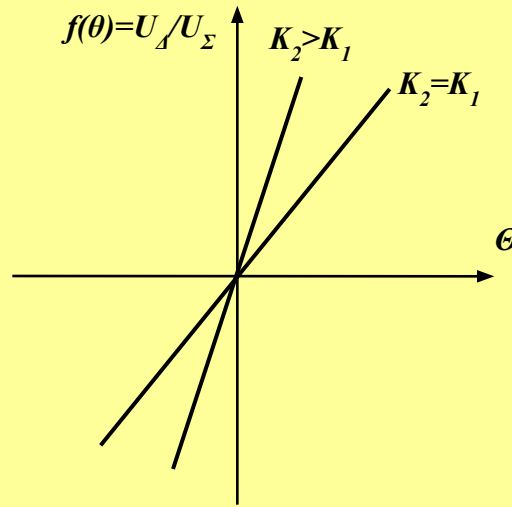


Рис. 21. ПХ сумарно-різницевого МАП

Нестабільність АЧХ каналів не приводить до зсуву РСН (рис.21 пунктир). Помилка вимірювання пеленгу сумарно-різницевого МАП залежить від пеленгаційної чутливості.

2.3 Фазові методи пеленгації.

Особливістю моноімпульсних фазових пеленгаторів є рознос фазових центрів антен приймальних каналів в просторі і збіг ПХ антен.

Кутова координата цілі визначається різницею фаз коливань, прийнятих рознесеними в просторі антенами, котра дорівнює:

$$\phi \Delta = 2\pi d \sin \theta / \lambda$$

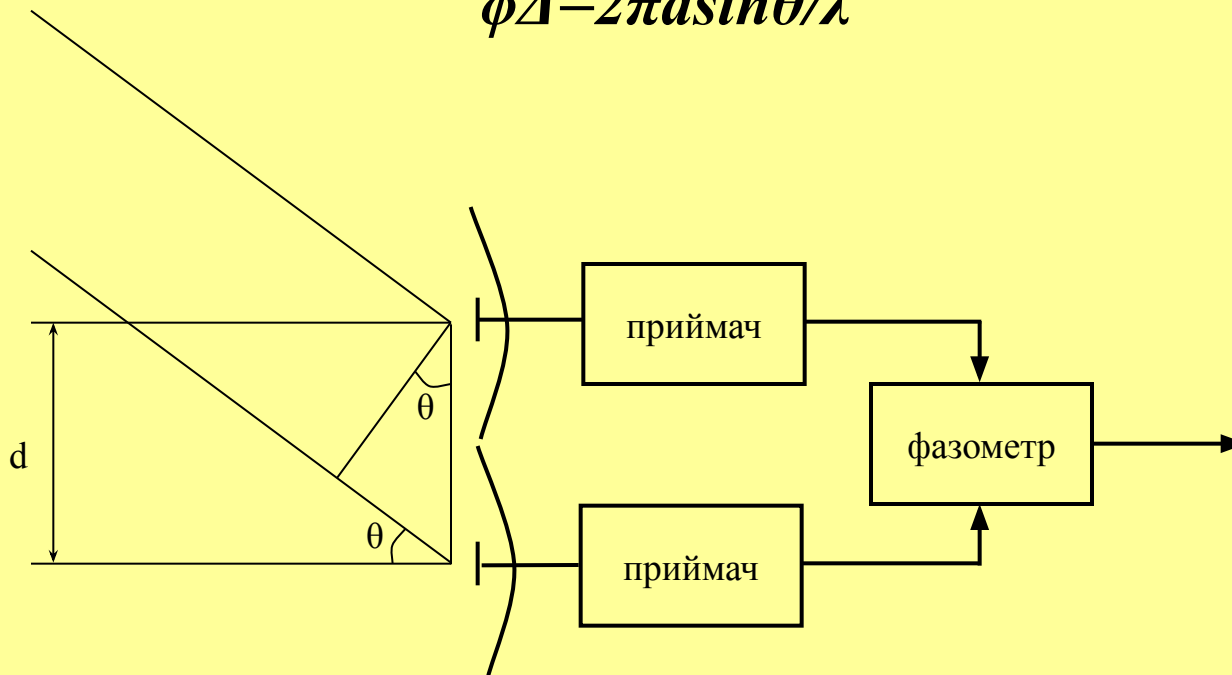


Рис. 22. Структурна схема моноімпульсного фазового пеленгатора (МФП)

Для однозначного визначення кутового відхилення необхідно, щоб відстань d між фазовими центрами антен дорівнювала розкриву антени. В такому випадку на входи приймачів будуть поступати сигнали тільки від тих цілей, кутове відхилення котрих від РСН не перевищує половини ширини діаграми направленості антени.

Зсув РСН, обумовлений тимчасовою взаємною нестабільністю фазочастотних характеристик (ФЧХ) приймальних каналів усувається застосуванням сумарно-різницевої обробки в МФП.

Методи вимірювання швидкості

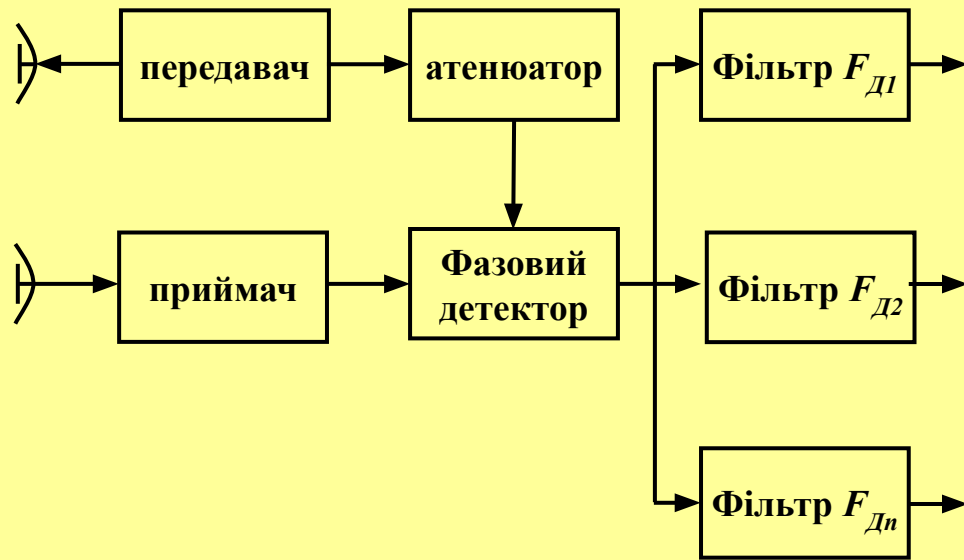


Рис. 23. Спрощена структурна схема доплерівського локатора
Амплітуда напруги на виході ФД має вигляд:

$$U_{\Phi D}(t) = \sqrt{U_1^2(t) + U_2^2(t) + 2U_1(t)U_2(t)\cos\Phi(t)}$$

де $U_1(t)$ – сигнал з атенюатора (передавача або опорний);

$U_2(t)$ – сигнал з виходу приймача;

$\Phi(t) = 2\pi F_D t + \phi_0$ – різниця фаз коливань (для рухомої цілі) $U_1(t)$ і $U_2(t)$.

Таким чином, сигнал відбитий від цілі що рухається з виходу ФД, представляє собою коливання доплерівської частоти, для вимірювання якої використовується набір вузько смугових фільтрів, що налаштовані на різні F_D