

Розділ IV

“Експлуатація і ремонт радіоелектронного обладнання літаків, вертольотів та авіаційних ракет”



Тема 9. “Імпульсно-доплерівські РЛС”

**Доцент кафедри
кандидат технічних наук, доцент Войчук В. А.**

Київ 2012

Навчальна та виховна мета

1. Ознайомити з принципами побудови, особливостями та способами отримання інформації про цілі імпульсно-доплерівськими РЛС.
2. Виховувати у студентів – майбутніх фахівців авіації Повітряних Сил ЗСУ самостійність, творчу ініціативу, наполегливість та високу відповідальність за якісну організацію технічної експлуатації та вміле бойове застосування автономних бортових засобів РЕО.

Навчальні питання

1. Імпульсно-доплерівський метод радіолокації.
2. Вимірювання швидкості в ІД РЛС.
3. Вимірювання дальності в ІД РЛС.
4. Принципи роботи ІД РЛС і особливості їх побудови.

Контрольні завдання (ІД РЛС)

1. Помилки цілевказання у горизонтальній площині ± 14 км, по висоті ± 6 км. Розрахуйте потрібні параметри сектору пошуку (розмір сектору, кількість рядків) для дальностей 40 км (атака в ЗНС) і 80 км (атака в ПНС), якщо ширина голчатої ДСА 2.8° . При атаці в ПНС рядки повинні частково перекриватись (1 бал).
2. Для умов попереднього завдання розрахуйте швидкість сканування ДСА і період огляду сектора пошуку цілей, якщо тривалість такту 10 мс, при СЧП пошук здійснюється на 4-х, а при ВЧП – на 5-ти частотах повторення. Вважати, що швидкість руху ДСА при скануванні постійна, а реверс миттєвий (1 бал).
3. При умовах попередніх завдань час когерентного накопичення складає 50% тривалості такту, довжина хвилі зондуючих сигналів 3 см, скважність зондуючих сигналів 18 при СЧП і 4 при ВЧП, частота повторення відповідно 40 кГц і 160 кГц, швидкості винищувача і цілі не більше 2160 км/год, ширина зон перешкод в області альтиметру і головного пелюстка по 5 кГц. Розрахуйте потрібну кількість доплерівських фільтрів (1 бал).
4. Запропонуйте можливі способи зменшення кількості прийомних каналів при збереженні умов попередніх завдань (1 бал).
5. До чого призведе виключення селектора дальності із складу каналу супроводження цілі по швидкості (1 бал)?
6. До чого призведе виключення доплерівських фільтрів із складу часового дискримінатора каналу супроводження цілі по дальності (1 бал)?

Примітка. Мінімальна сума балів по цій темі для отримання позитивної оцінки – 3.0.

Максимальна сума зарахованих балів по темі – 5.0.

1. Імпульсно-доплерівський метод радіолокації

Потенційні можливості ІД методу

Серед когерентних РЛС особливе місце займають *імпульсно-доплерівські РЛС* (ІД РЛС) або РЛС з *квазібезперервним* випромінюванням.

На відміну від РЛС з безперервним випромінюванням, в ІД РЛС зберігається імпульсний режим роботи, але з малою скважністю сигналів $Q_C = T_{\Pi} / T_p$, завдяки чому поєднуються *переваги як імпульсного, так і безперервного* режимів випромінювання.

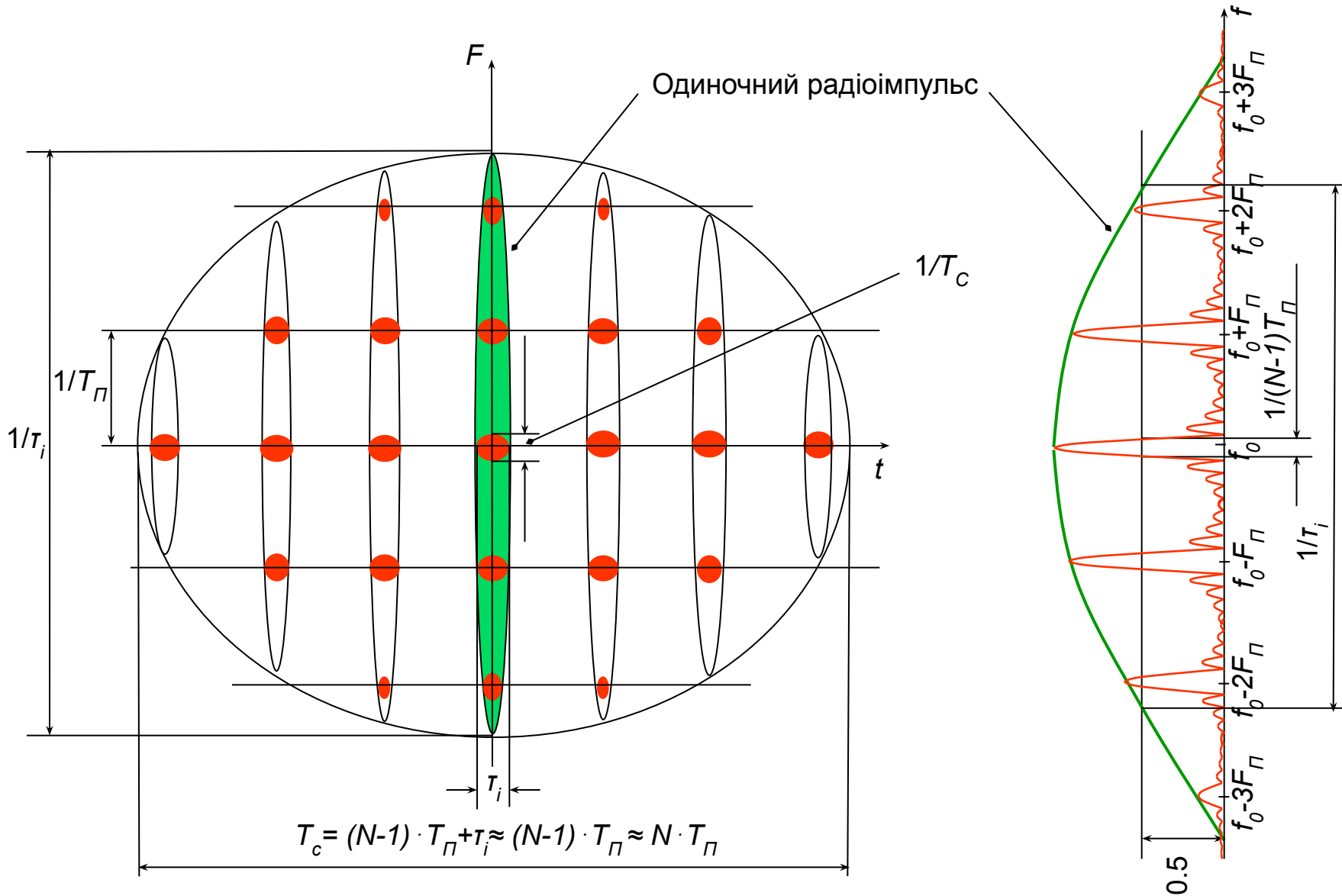
В ІД РЛС звичайно використовуються високі (сотні кілогерців) і середні (десятки кілогерців) частоти повторення. Інтервал когерентності в них перевищує час опромінення цілі. Тому *відбитий сигнал є пачка періодичних когерентних радіоімпульсів* і його спектр складається з *дискретних спектральних ліній, ширина яких* (декілька сотень герців) *визначається часом опромінення цілі, а інтервал між ними дорівнює частоті повторення* F_{Π} і становить десятки кілогерців при СЧП і сотні кілогерців при ВЧП.

ІД РЛС застосовують у РЕС управління зброєю літаків.

Порівняльна характеристика РЛС

Характеристика	РЛС БВ	НКІ РЛС	КІ РЛС	ІД РЛС
Скважність (наповненість)	1	сотні - тисячі	сотні	одиниці - десятки
Рівень зондуючого сигналу	малий	великий	великий	малий
Накопичення	ефективне	неефективне	середньої ефективності	ефективне
Мертва зона	нема	є	є	є
Кількість антен	2	1	1	1
Кількість частот повторення	-	1	2-3	4-8
Кількість сліпих дальностей	нема	нема	нема	десятки - сотні
Кількість сліпих швидкостей	нема	-	десятки - сотні	нема - одиниці
Метод вимірювання дальності	частотний або фазовий	імпульсний	імпульсний	імпульсний, частотний
Метод вимірювання швидкості	доплерівський	похідна дальності	похідна дальності	доплерівський
Складність	мала	середня	середня	велика
Обчислювач	нема	аналоговий	аналоговий	цифровий

Спектр пачки когерентних радіоімпульсів



*

Потенційні можливості

Переваги імпульсно-доплерівського методу

Імпульсний режим роботи дозволяє:

- застосовувати одну прийомопередаючу антену,
- розділювати цілі по дальності,
- вимірювати дальність імпульсним методом,
- селектувати відбиті сигнали по дальності.

Когерентний режим випромінювання дозволяє:

- ефективно накопичувати відбиті сигнали,
- розділювати цілі по швидкості,
- вимірювати швидкість доплерівським методом,
- селектувати відбиті сигнали по швидкості.

Мала скважність забезпечує:

- високу заповненість часу опромінювання цілі,
- велику енергію опромінювання цілі при малій імпульсній потужності,
- гарні масо-габаритні характеристики РЛС.

Проблеми імпульсно-доплерівського методу

Наявність мертвої зони.

Наявність і велика кількість сліпих дальностей і швидкостей.

Складність отримання пачок радіоімпульсів з великим інтервалом когерентності.

Складність обробки пачок радіоімпульсів з великим інтервалом когерентності.

Складність формування когерентних імпульсних зондуючих сигналів малої скважності з великою середньою потужністю.

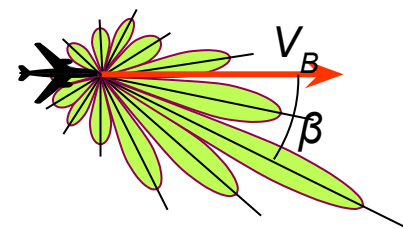
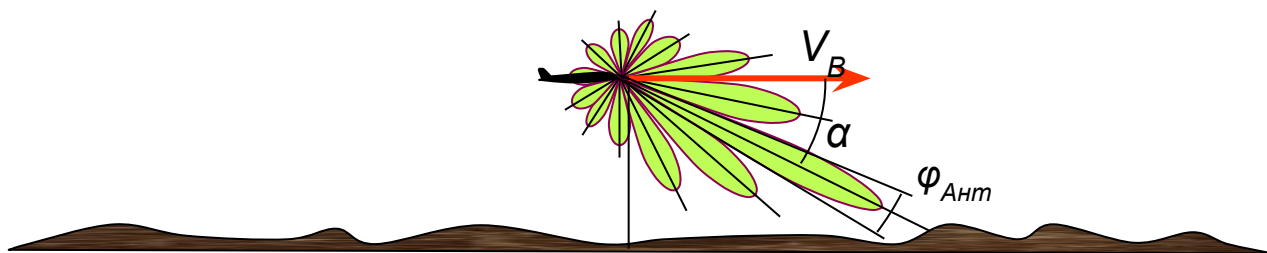
Багатоканальність пристроїв обробки відбитих сигналів.

Неоднозначність первинного (на тактах виявлення) визначення дальності і швидкості цілі.

Складність переходу від багатоцільового режиму (огляд простору, пошук і виявлення цілей) роботи до одноцільового (супроводження по координатам обраної для атаки цілі).

Принцип роботи і особливості побудови

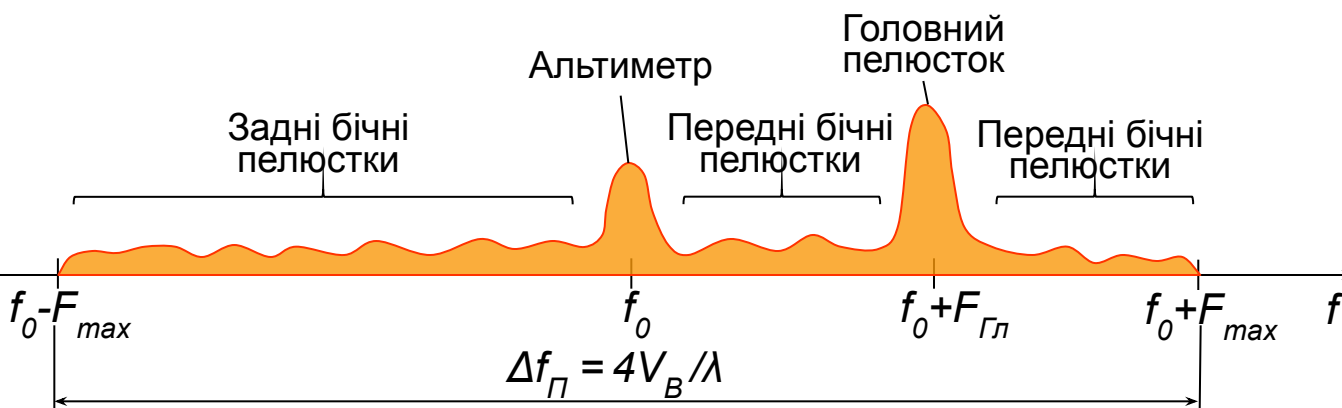
Формування спектру сигналів підстилаючої поверхні



$$V_R = V_B \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta$$

$$F_D = 2V_R / \lambda$$

$$|F_{max}| = 2V_B / \lambda$$



Ширина зони перешкод від всієї підстилаючої поверхні внаслідок її опромінювання *одною спектральною лінією* зондуючого сигналу $\Delta f_{\Gamma} = 4V_B / \lambda$.

Ширина зони перешкод ділянки підстилаючої поверхні від опромінювання *одною спектральною лінією* зондуючого сигналу *по головному пелюстку* ДСА $\Delta f_{\Gamma} \approx (2V_B / \lambda) \cdot \varphi_{\text{Ант}} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta$.

*

Трансформація спектру сигналів від підстилаючої поверхні

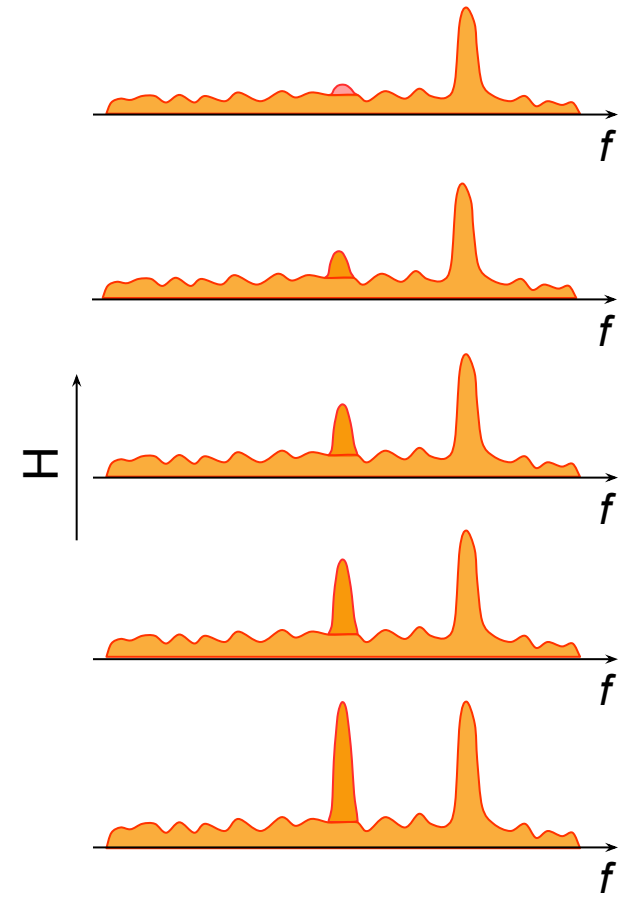
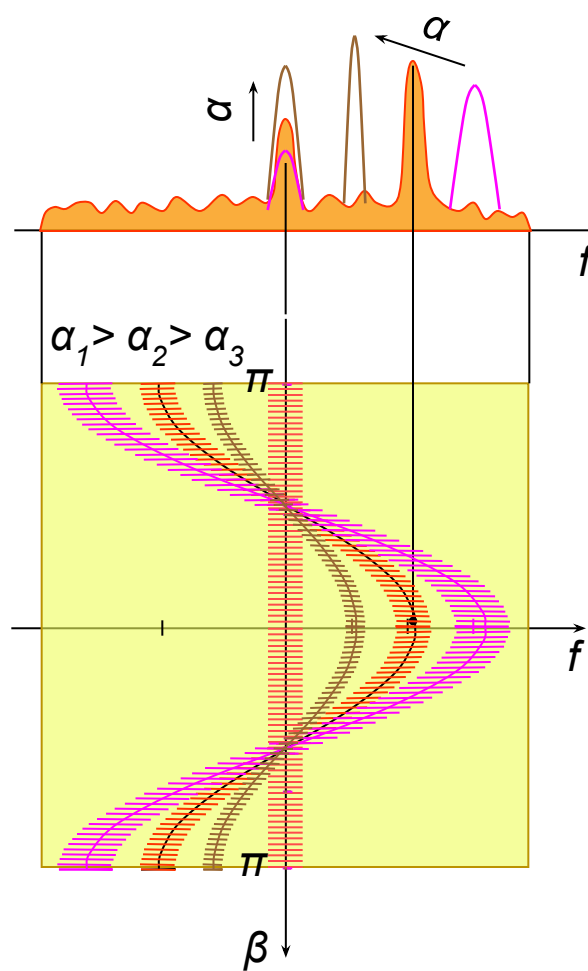
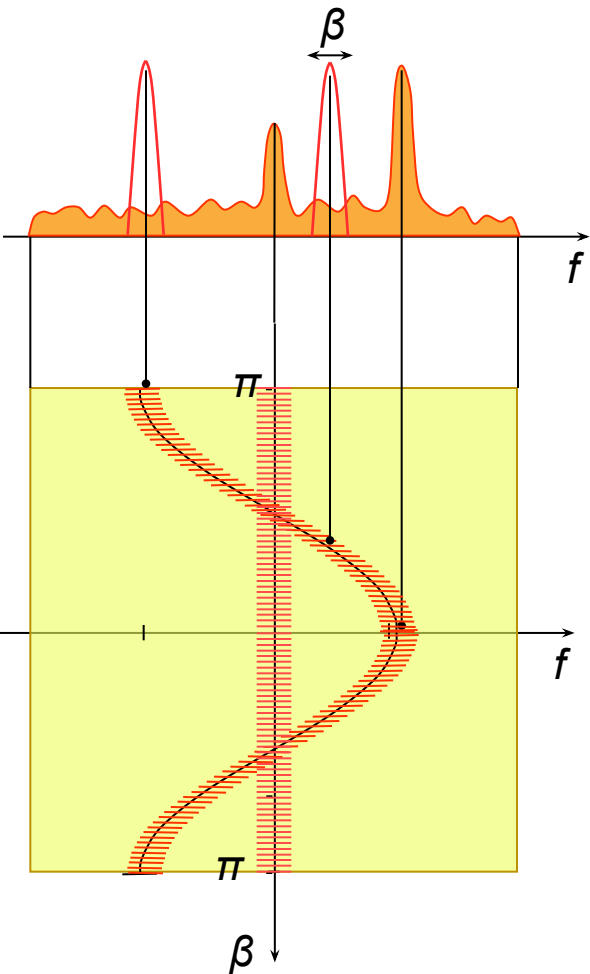
Вплив сканування
ДСА по горизонталі

Вплив сканування
ДСА по вертикалі

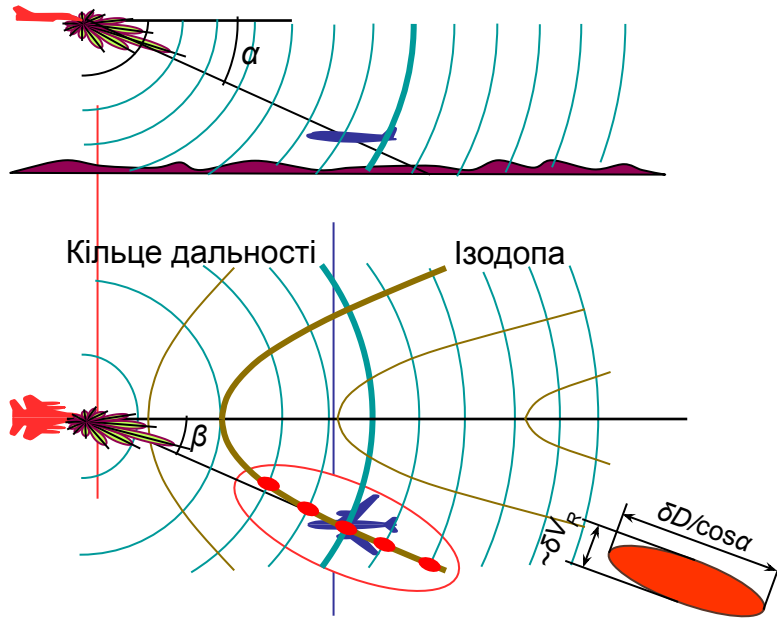
Вплив зміни висоти
польоту

$$F_D = F_{max} \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta$$

$$\Delta f_{Гл} \approx F_{max} \cdot \varphi_{Ант} \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta$$



Кільця дальності та ізодопи

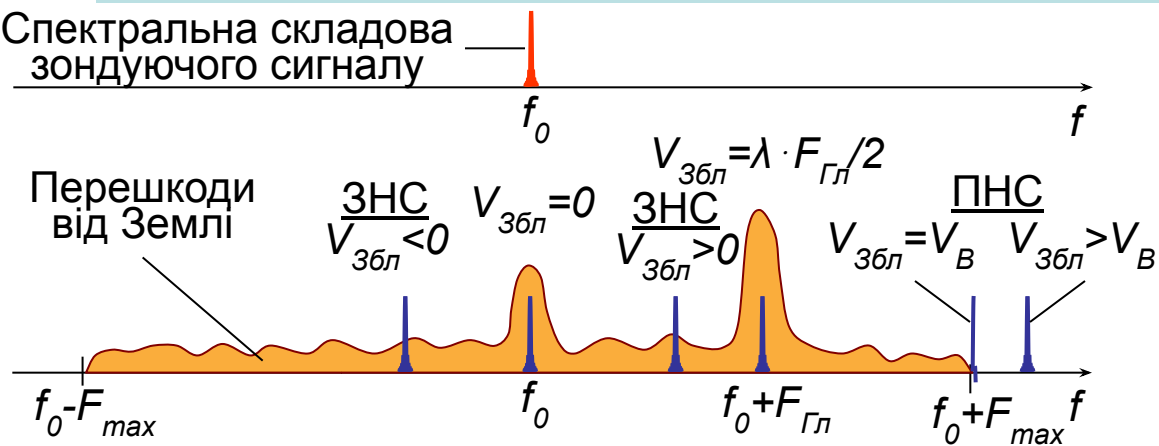


Лінії рівних дальностей на підстилаючій поверхні – кола з центром в проекції на Землю точки розміщення РЛС. При ВЧП і СЧП затримки сигналів звичайно більші періоду повторення, і сигнали з затримками $\tau = i \cdot T_{\text{П}} + \Delta\tau$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) від різних ділянок поверхні попадають в один строб дальності з затримкою $\Delta\tau$ відносно ІЗП.

Лінії рівних швидкостей (ізодопи) визначають ділянки поверхні, сигнали яких попадають в один доплерівський фільтр. При ВЧП ізодопа одна, при СЧП їх декілька.

Наявність декількох кілець дальності та ізодоп призводить до збільшення рівня перешкод від підстилаючої поверхні. При обробці в РЛС відбиті сигнали послідовно селектуються: 1) у просторі - антеною (заштрихований еліпс червоного кольору), 2) у часі - селектором дальності і 3) по частоті - доплерівським фільтром (еліпси малого розміру з червоною заливкою). Тому перешкоди створюють тільки ті ділянки поверхні розміром $(\delta D / \cos \alpha \times \delta V_R)$, які попадають в зону опромінення і знаходяться в точках перетинання кілець дальності з ізодопами (в межах еліпсів з червоною заливкою). Сумарний рівень перешкод залежить від кількості таких ділянок і тому при НЧП він вище, ніж при ВЧП.

Вплив взаємного положення і руху винищувача та цілі

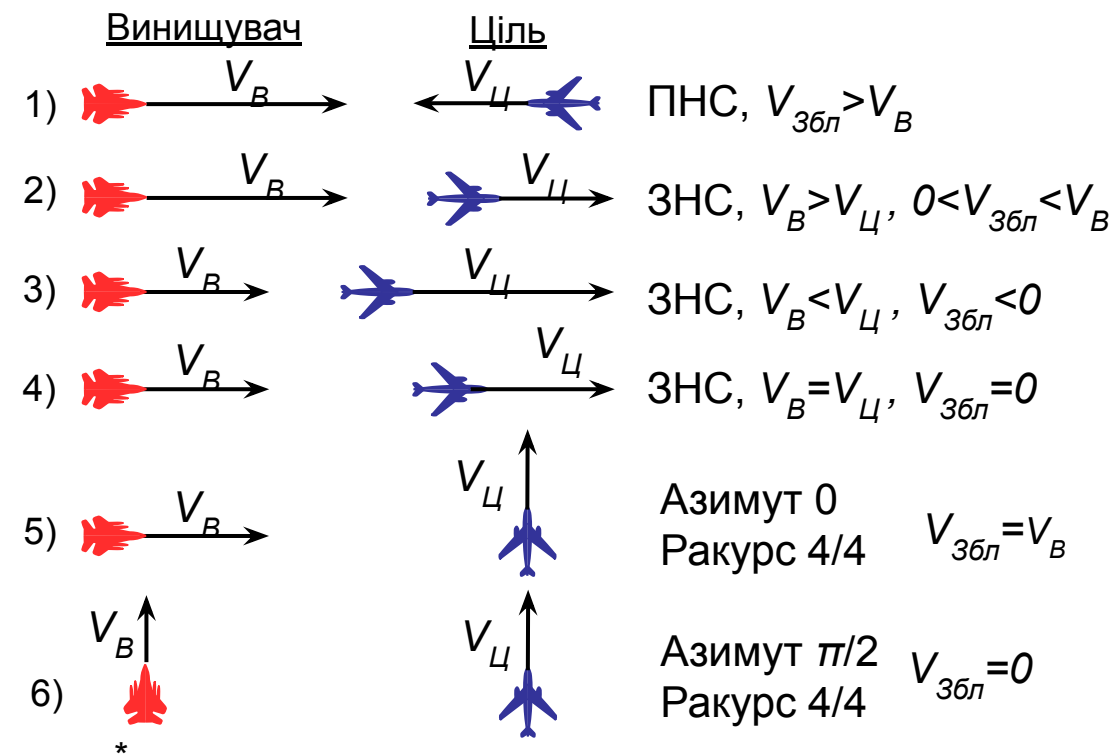


При атаці цілі в її ПНС $V_{36л} > V_B$ і спектральна складова сигналу цілі (синього кольору) знаходиться поза ділянкою суцільного спектру (коричневого кольору) перешкод від поверхні.

При атаці цілі в її ЗНС на урівнених швидкостях та на паралельних курсах $V_{36л} \approx 0$ і складова сигналу цілі знаходиться в зоні "альтиметру".

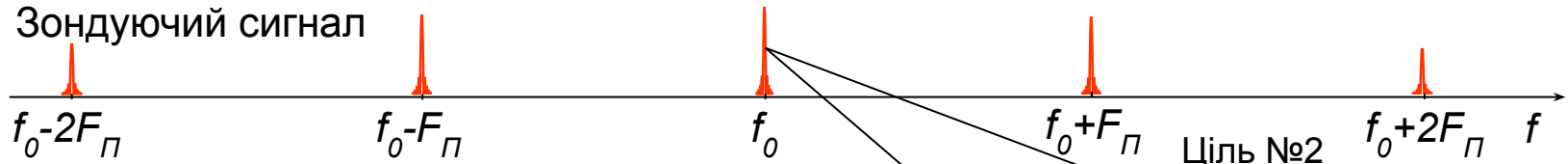
При атаці цілі під ракурсом 4/4 спектральна складова її сигналу знаходиться в зоні "головного пелюстка".

В решті випадків спектральна складова сигналу цілі знаходиться в зоні бокових пелюстків.

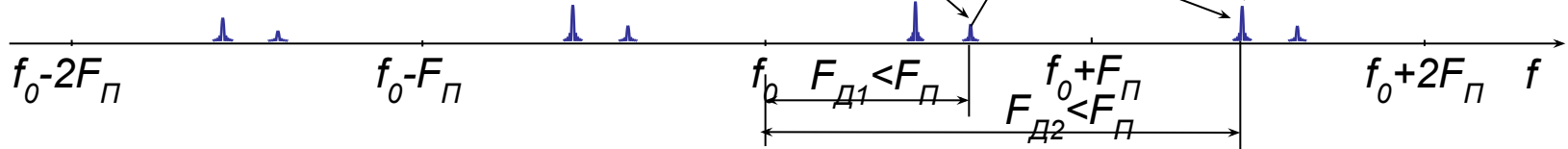


Зондування при ВЧП

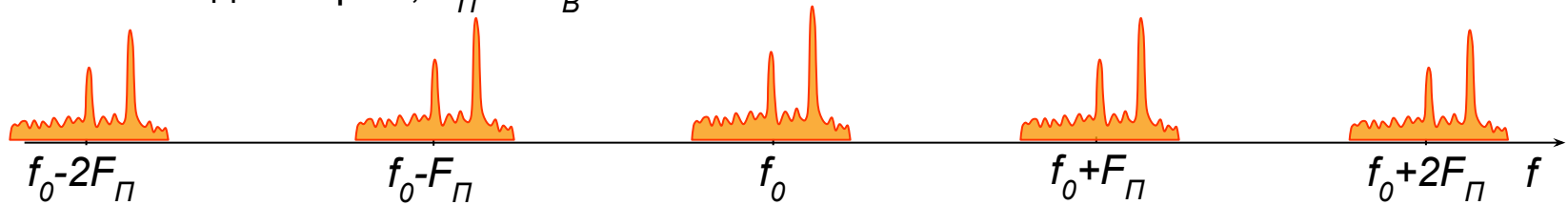
Зондуєчий сигнал



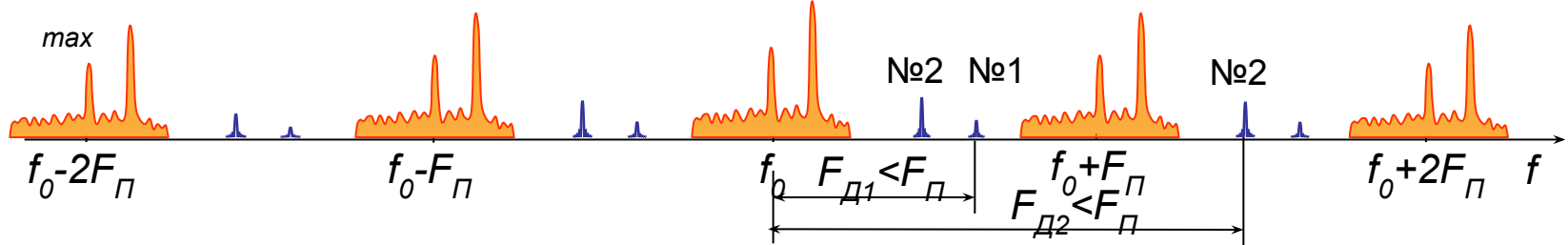
Сигнали від цілей



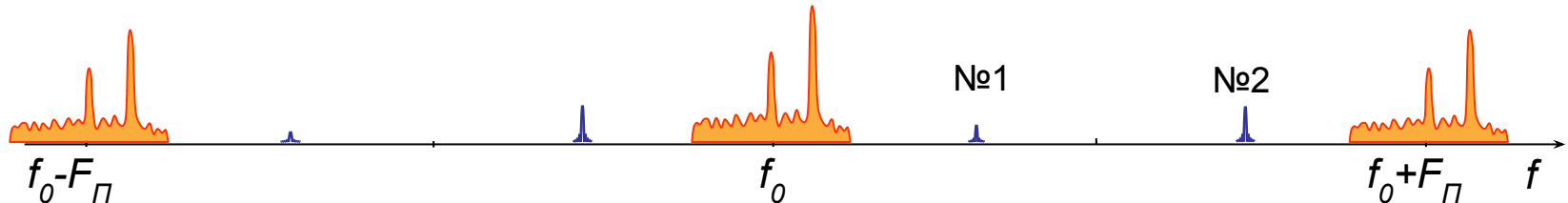
Сигнал від поверхні, $F_П > 4V_B/\lambda$



Сигнали від поверхні і цілей при $4V_B/\lambda < F_П < F_D$



Сигнали від поверхні і цілей при $4V_B/\lambda < F_{D\max} < F_П$



*

При ВЧП $F_{\Pi} > 4V_B / \lambda$ і між зонами перешкод від підстилаючої поверхні шириною $4V_B / \lambda$ з'являються вікна шириною $F_{\Pi} - 4V_B / \lambda$, вільні від перешкод.

Якщо для найбільш швидкісної цілі при її атаці на зустрічних курсах, сигнал якої має доплерівський зсув частоти $F_{D_{max}} = 2V_{Ц_{max}} / \lambda$, виконується умова $4V_B / \lambda < F_{D_{max}} < F_{\Pi}$, то для всіх цілей спектральні складові відбитих сигналів обов'язково опиняться у вікнах прозорості, вільних від сигналів підстилаючої поверхні.

Тому в режимі ВЧП частота повторення вибирається з умови

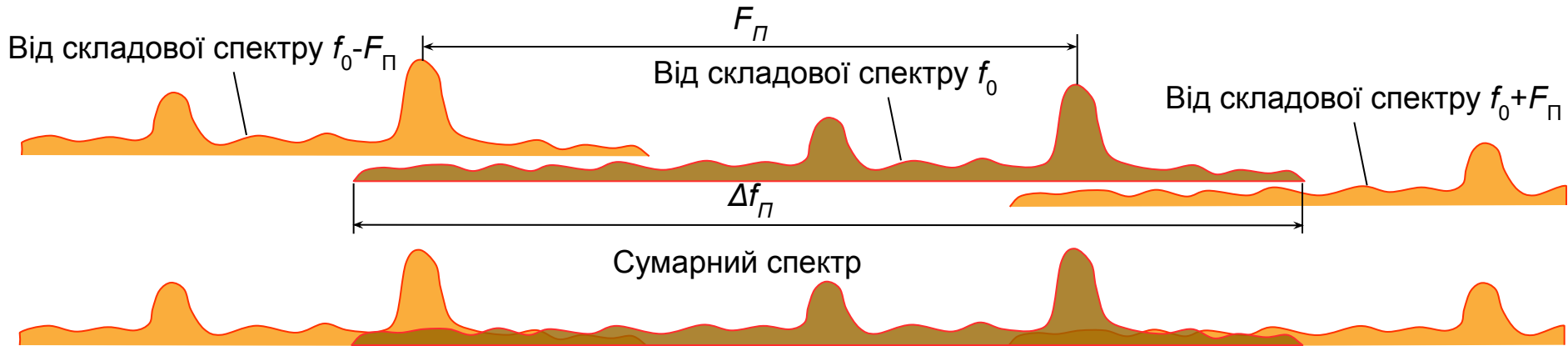
$$F_{\Pi} > 4V_B / \lambda + 2V_{Ц_{max}} / \lambda.$$

Якщо, наприклад, $V_B = V_{Ц} = 1000$ м/с (3600 км/год), то потрібно $F_{\Pi} > 200$ кГц. При цьому швидкість зближення з ціллю визначається однозначно по відстані між будь-якою спектральною складовою зондуючого сигналу і найближчою спектральною складовою сигналу цілі.

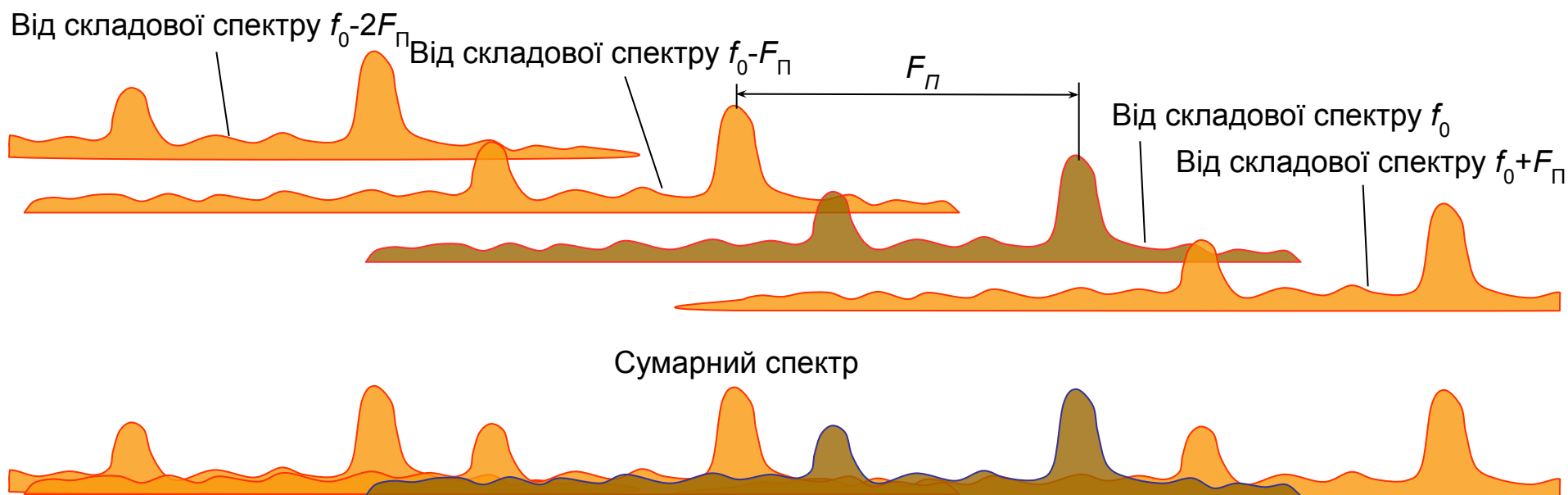
При меншій частоті повторення спектральні складові сигналів деяких цілей можуть опинитись в зоні перешкод від підстилаючої поверхні або виникає неоднозначність у визначенні швидкості зближення доплерівським методом.

Зондування при СЧП

Накладання спектрів перешкод від поверхні при $\Delta f_{\Pi}/2 < F_{\Pi} < \Delta f_{\Pi}$



Накладання спектрів перешкод від поверхні при $F_{\Pi} < \Delta f_{\Pi}/2$



В режимі СЧП частота повторення зондуючих сигналів $F_{\Pi} < \Delta f_{\Pi} = 4V_B / \lambda$. При цьому спектральні зони перешкод від підстилаючої поверхні частково перекриваються і відсутні вікна прозорості, вільні від сигналів підстилаючої поверхні.

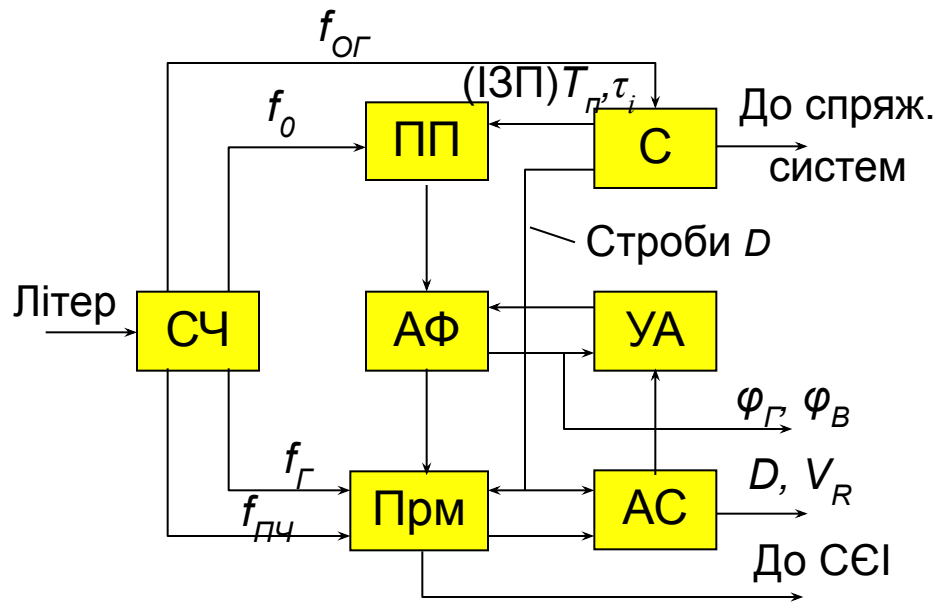
Сумарний рівень перешкод залежить від кількості спектральних зон перешкод, які частково перекриваються на одній частоті повторення, тобто по цій причині він зростає із зменшенням частоти повторення.

У більшості випадків період повторення $T_{\Pi} = 1/F_{\Pi}$ менший затримки відбитих сигналів. Тому у строб дальності крім сигналу цілі попадають перешкоди від кількох кілець дальності. Сумарний рівень перешкод по цій причині зростає із збільшенням частоти повторення.

З урахуванням усіх обставин на СЧП використовують $F_{\Pi} = 15 \dots 45$ кГц.

На СЧП спектральні складові сигналів цілей незалежно від напівсфери атаки знаходяться в зоні перешкод від підстилаючої поверхні. Особливо великий рівень перешкод в зоні “альтиметру” і “головного пелюстка”, де спостереження корисних сигналів неможливе.

При СЧП існує неоднозначність визначення швидкості зближення доплерівським методом і дальності імпульсним методом.

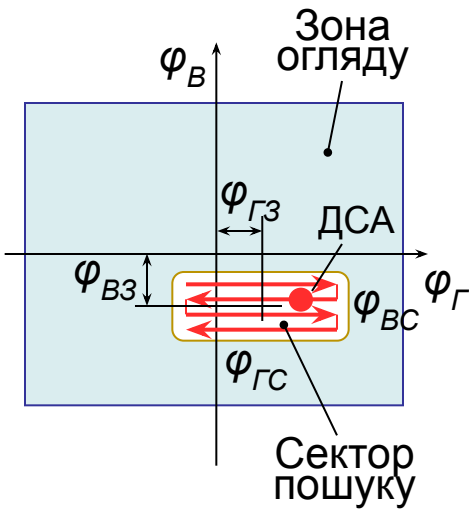


З високостабільного безперервного когерентного коливання частоти $f_{0Г}$ опорного генератора синтезатор частот (СЧ) формує сигнал робочої частоти f_0 , гетеродинний сигнал частоти f_{Γ} , напругу проміжної частоти $f_{ПЧ}$ та інші когерентні коливання.

З сигналу опорного генератора в синхронізаторі (С) виробляються тактові імпульси, з яких цифровими методами формуються всі часові інтервали, тобто масштабна сітка часу, зокрема,

імпульси запуску передавача (ІЗП) тривалістю τ_i з періодом повторення T_{Γ} , які з безперервного сигналу частоти f_0 синтезатора частот виділяють когерентну періодичну послідовність радіоімпульсів робочої частоти f_0 , величину якої визначає команда "ЛІТЕР" з пульту управління. Підсилювач потужності (ПП) формує зондуєчі сигнали, які випромінюються через антенно-фідерний тракт (АФ).

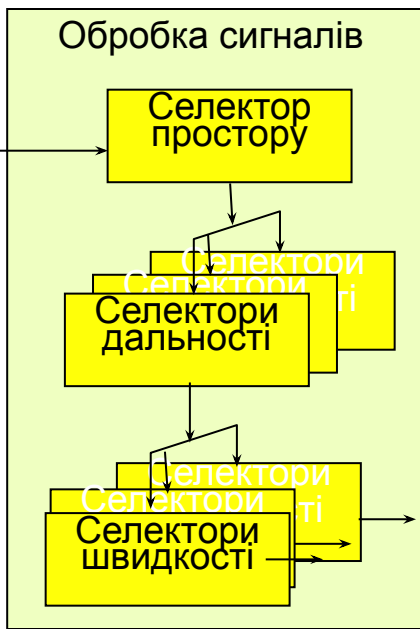
*



Антенa має голчату ДСА шириною $\varphi_{Ант}$, яка командами каналу управління антенною (УА) здійснює пошук цілей горизонтальними рядками у заданому секторі, положення якого $\varphi_{ГЗ}$, $\varphi_{ВЗ}$ в межах зони огляду задається командами наведення, а розмір $\varphi_{ГС}$, $\varphi_{ВС}$ – помилками цілевказання.

Відбиті цілями сигнали надходять в супергетеродинний приймач (Прм) з багаторазовим перетворенням частоти. При виявленні цілей визначаються їх кутові координати φ_G , φ_B (по положенню антени в момент виявлення), дальність D і швидкість зближення V_R (по №№ каналів дальності і швидкості).

В РЛС здійснюється послідовна селекція сигналів: спочатку у просторі *по напрямку* (ДСА антени), потім *по дальності* (селекторами дальності багатоканального приймача) і в кожному каналі дальності - *по швидкості* (гребінкою доплерівських фільтрів). Селектори дальності управляються стробами дальності синхронізатора.



Інформація про кожну виявлену ціль (φ_G , φ_B , D і V_R видається в базу даних ЕОМ, яка входить до складу РЛС, і в систему єдиної індикації (СЄІ) до індикатору на лобовому склі (ІЛС) для відображення повітряної обстановки.

В ЕОМ по послідовності контактів із спостерігаємими цілями здійснюється супроводження їх траєкторій “на проході”, тобто в ході огляду. Інформація про отриману тактичну обстановку видається на індикатор прямого бачення (ІПБ).

Інформаційне забезпечення атаки обраної цілі здійснюється в одноцільовому режимі її супроводження по координатам. Решта повітряного простору в цьому режимі не контролюється.

Для цього по інформації з бази даних або шляхом цілевказання вручну вказуються координати $\varphi_{ГЦ}$, $\varphi_{ВЦ}$ цілі, яку треба взяти на супроводження. Канал управління антеною (УА) орієнтує антену у заданому напрямку $\varphi_{ГЦ}$, $\varphi_{ВЦ}$, а в каналі автоматичного супроводження (АС) здійснюється і відпрацьовується потрібне цілевказання слідкуючим системам по дальності і швидкості.

Поточні зладжені координати цілі φ_G , φ_B , D і V_R видаються в систему управління озброєнням та іншим споживачам.

Синхронізатор формує і видає бортовим РЕЗ синхронізуючі, стробуючі (відкриваючі), бланкуючі (забороняючі) та інші періодичні імпульсні сигнали для узгодження їх роботи з РЛС.

2. Вимірювання швидкості в ІД РЛС

Вимірювання швидкості при ВЧП

При ВЧП вибирають

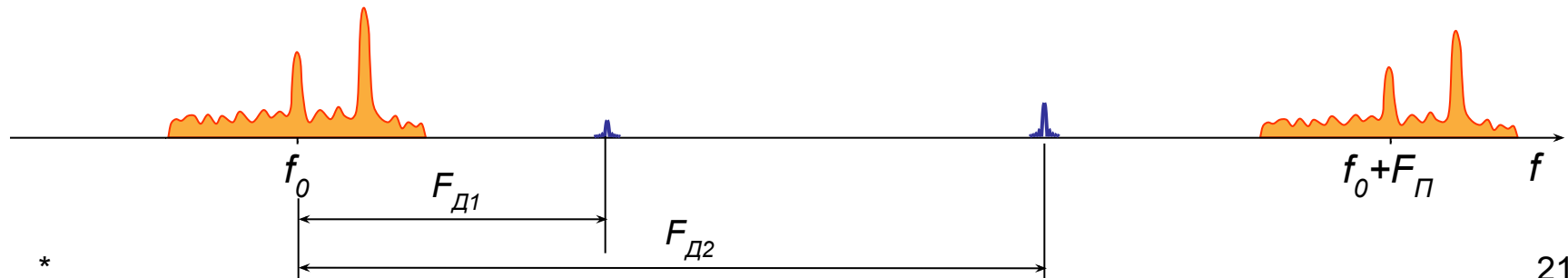
$$F_{\Pi} > 4V_B / \lambda + 2V_{\zeta \max} / \lambda.$$

Тому швидкість цілі V_{ζ} вимірюється однозначно по відомій швидкості винищувача V_B і вимірюваному доплерівському зсуву частоти сигналу цілі:

$$F_D = 2V_B / \lambda + 2V_{\zeta} / \lambda.$$

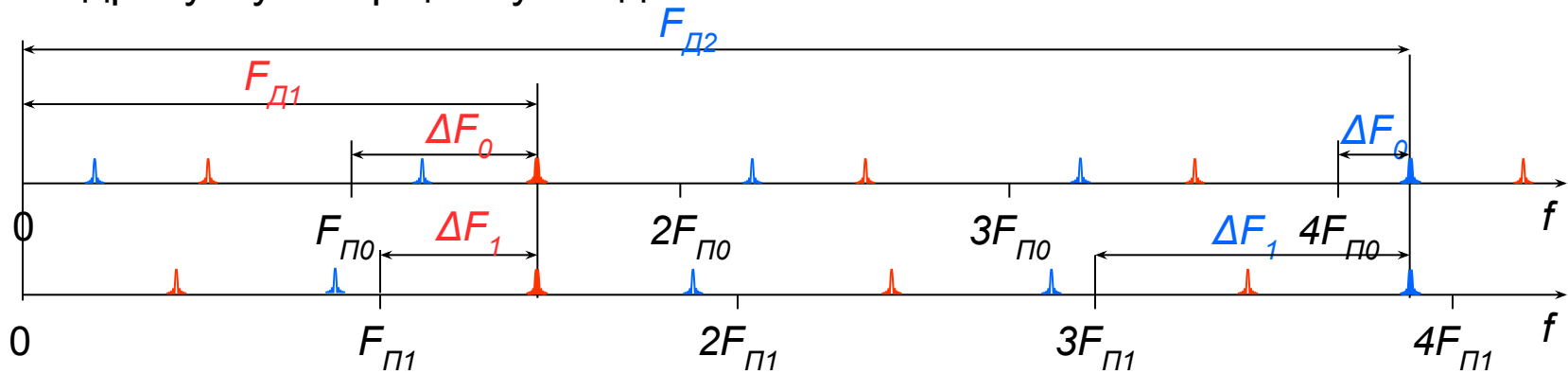
При атаці цілі в її ПНС відбиті сигнали знаходяться в зоні прозорості по швидкості і їх спостереження здійснюється тільки на фоні власних шумів. При атаці цілі в її ЗНС відбиті сигнали знаходяться в зоні перешкод від підстилаючої поверхні, тобто їх спостереження здійснюється на фоні перешкод від підстилаючої поверхні і власних шумів, тому дальність виявлення на СЧП менша, ніж на ВЧП.

Режим ВЧП доцільно застосовувати при атаці цілі на зустрічно-перетинаючих курсах.



Вимірювання швидкості при СЧП

При СЧП доплерівський зсув частоти може перевищувати частоту повторення і тоді швидкість вимірюється з невеликою неоднозначністю. Для усунення неоднозначності зондування здійснюється при частоті повторення $F_{\text{П}0}$, на якій виявлена ціль, і на частотах $F_{\text{П}0} \pm \Delta F$. Частота змінюється в обидві сторони через можливе попадання цілі на одній з цих частот в “сліпу” швидкість. Якщо ціль спостерігається при частотах $F_{\text{Д}0}$ і $F_{\text{Д}1} = F_{\text{П}0} + \Delta F$, то з урахуванням співвідношення між ΔF_0 та ΔF_1 та їх величини обчислюють доплерівський зсув частоти відбитого сигналу. Червоні і сині спектральні складові відбитих сигналів на малюнку відповідають різним швидкостям однієї цілі: червоні – коли доплерівський зсув частоти в межах $F_{\text{П}0} < F_{\text{Д}1} < 2F_{\text{П}0}$ і $\Delta F_0 > \Delta F_1$, а сині – коли $4F_{\text{П}0} < F_{\text{Д}2} < 5F_{\text{П}0}$ і $\Delta F_0 < \Delta F_1$. В залежності від співвідношення між ΔF_0 і ΔF_1 застосовується відповідна формула для підрахунку коефіцієнту неоднозначності k .



При $\Delta F_0 > \Delta F_1$:

$$F_{\text{Д}1} = k \cdot F_{\text{П}0} + \Delta F_0 = k \cdot F_{\text{П}1} + \Delta F_1$$

$$k = \frac{\Delta F_0 - \Delta F_1}{F_{\text{П}1} - F_{\text{П}0}} = \frac{\Delta F_0 - \Delta F_1}{\Delta F}$$

При $\Delta F_0 < \Delta F_1$:

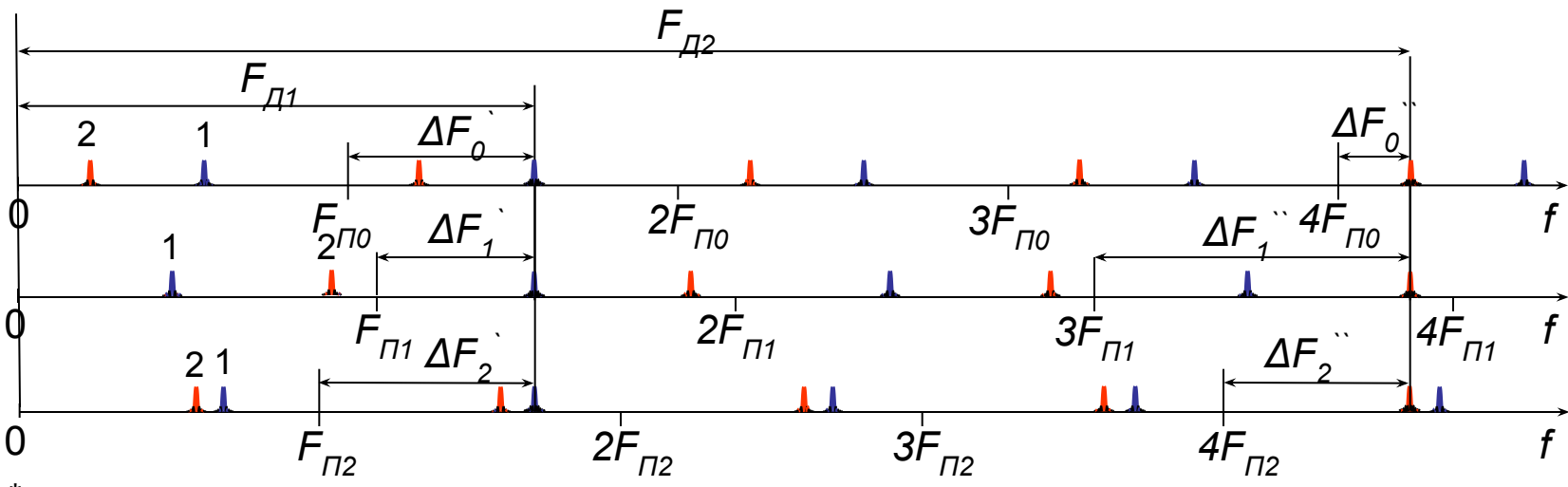
$$F_{\text{Д}2} = k \cdot F_{\text{П}0} + \Delta F_0 = (k-1) \cdot F_{\text{П}1} + \Delta F_1$$

$$k = \frac{F_{\text{П}1} + \Delta F_0 - \Delta F_1}{F_{\text{П}1} - F_{\text{П}0}} = \frac{F_{\text{П}1} + \Delta F_0 - \Delta F_1}{\Delta F}$$

Якщо при зондуванні в один і той же строб дальності одночасно попадають сигнали двох цілей з різними швидкостями зближення, їх спектральні лінії існують одночасно і нічим не відрізняються. Можливі два варіанти групування результатів вимірювання на частотах $F_{\pi 0}$ і $F_{\pi 1}$: $\{\Delta F_{01}, \Delta F_{11}\}$ і $\{\Delta F_{02}, \Delta F_{12}\}$ або $\{\Delta F_{01}, \Delta F_{12}\}$ і $\{\Delta F_{02}, \Delta F_{11}\}$. Тут перший індекс означає номер основної та додаткової частот повторення, а другий індекс – номер цілі (невідомий спостерігачу). На малюнку спектральні складові сигналу першої цілі позначені синім кольором, а другої – червоним. По кожному з варіантів групування знаходять можливі доплерівські зсуви частоти.

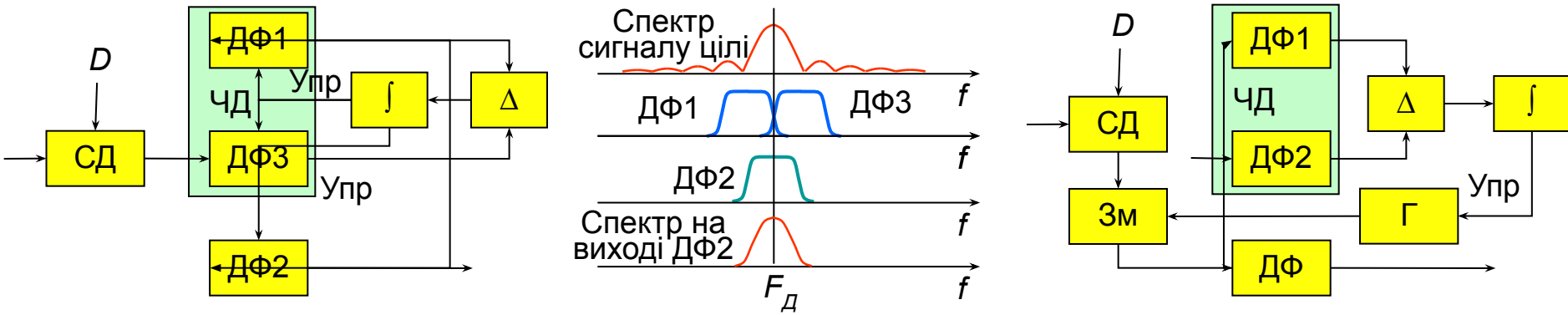
Щоб зняти невизначеність, повторюють зондування ще і на частоті $F_{\pi 2} = F_{\pi 0} - \Delta F$ і здійснюють обчислення доплерівських зсувів частоти для нових можливих комбінацій $\{\Delta F_{01}, \Delta F_{21}\}$ і $\{\Delta F_{02}, \Delta F_{22}\}$ або $\{\Delta F_{01}, \Delta F_{22}\}$ і $\{\Delta F_{02}, \Delta F_{21}\}$.

Співпадаючі результати з першої і другої групи обчислень являються дійсними доплерівськими зсувами частоти першої і другої цілей.



*

Вимірювання швидкості при супроводі



Із всіх відбитих сигналів селектором дальності (СД) виділяється сигнал цілі, що супроводжується в одноцільовому режимі, і подається на частотний дискримінатор (ЧД) з двох розстроєних доплерівських фільтрів (ДФ1 і ДФ3). Шляхом порівняння (Δ) сигналів з виходів фільтрів виділяється *сигнал помилки* супроводження, з якого шляхом інтегрування формуються *сигнали управління* фільтрами ДФ1 і ДФ3, частота настройки яких змінюється так, щоб спектр вхідного сигналу порівну розподілявся між фільтрами. Інтегратор управляє також настройкою доплерівського фільтра (ДФ2), через який виділяється сигнал цілі, що супроводжується, і видається для подальшої обробки.

На практиці застосовуються доплерівські фільтри з незмінною настройкою, а супроводження здійснюється шляхом управління частотою гетеродину (Γ), сигнал якого подається на змішувач (Зм).

*

3. Вимірювання дальності в ІД РЛС

Вимірювання дальності при ВЧП

Скважність $Q_C = T_{\Gamma} / T_i$ зондуючих (і відбитих точковою ціллю) сигналів при ВЧП становить кілька одиниць, а можливі затримки відбитих сигналів сягають $\tau = 100 T_{\Gamma}$. Тому через велику степінь неоднозначності вимірювання дальності імпульсним методом дуже ускладнене і застосовують простіший *частотний метод*.

Частота пачки когерентних зондуючих сигналів змінюється по лінійному закону (випромінюється ЛЧМ сигнал)

$$f_3(t) = f_0 + s \cdot t.$$

Ціль на дальності D створює відбитий сигнал із затримкою $\tau = 2D/c$. Якщо ціль відносно РЛС нерухома, то частота пачки відбитих ЛЧМ сигналів змінюється по закону

$$f_B(t) = f_3(t - \tau) = f_0 + s \cdot (t - \tau).$$

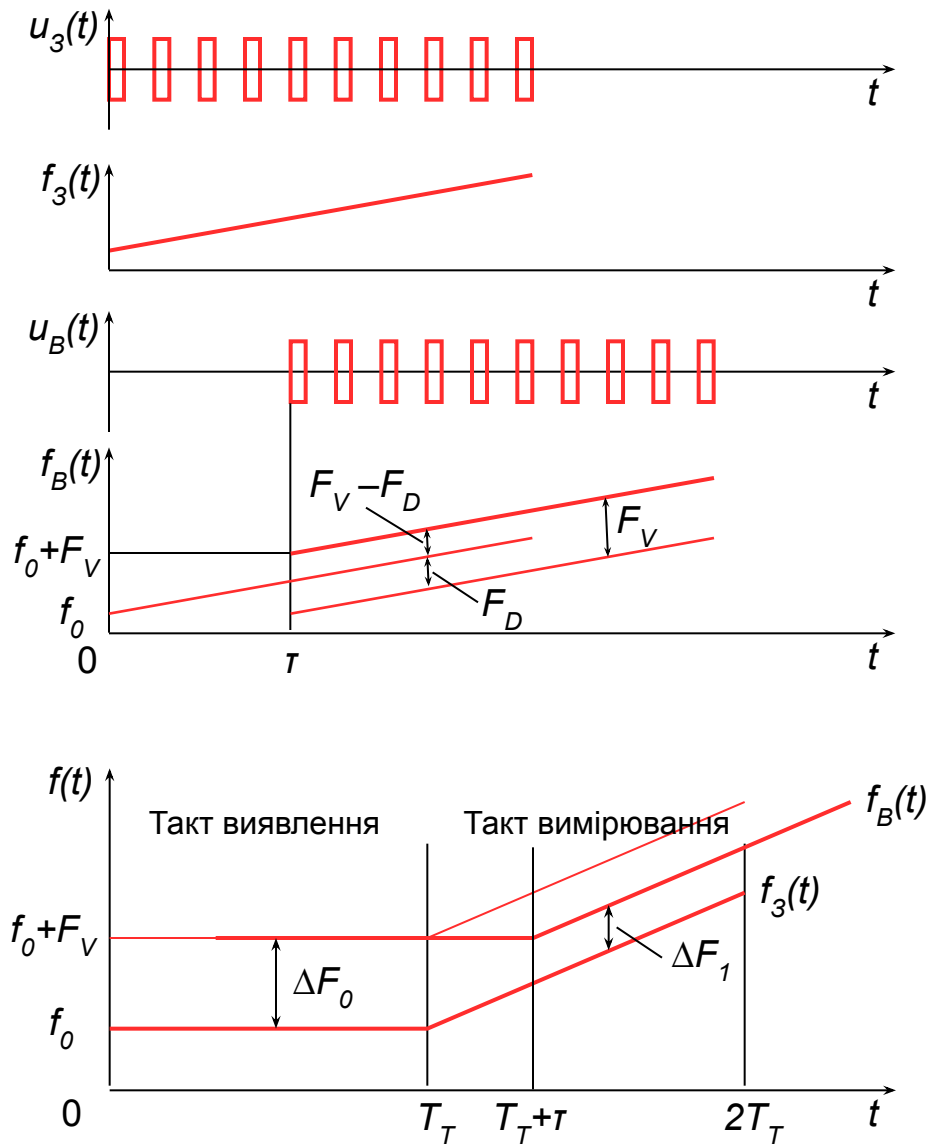
Дальномірна різниця миттєвих частот зондуючого і відбитого сигналів

$$F_D = f_3(t) - f_B(t) = s \cdot \tau.$$

Рух цілі відносно РЛС викликає ще і швидкісний (доплерівський) зсув

$$F_V = 2V_R / \lambda.$$

Щоб з різниці миттєвих частот зондуючого і відбитого сигналів $\Delta F = f_3(t) - f_B(t)$ вилучити інформацію про дальність цілі, треба попередньо визначити доплерівський зсув частоти.



В ІД РЛС спостереження цілі розбито на такти тривалістю T_T в кілька мілісекунд.

На *такті виявлення* частота зондуючого сигналу постійна, одночасно з виявленням цілі по доплерівському зсуву частоти ΔF_0 однозначно визначається швидкість зближення з нею.

На *такті вимірювання* (ЛЧМ) по різниці миттєвих частот ΔF_1 з урахуванням попередньо визначеного доплерівського зсуву частоти ΔF_0 знаходиться дальномірна різниця частот $F_D = \Delta F_0 - \Delta F_1$ і дальність цілі

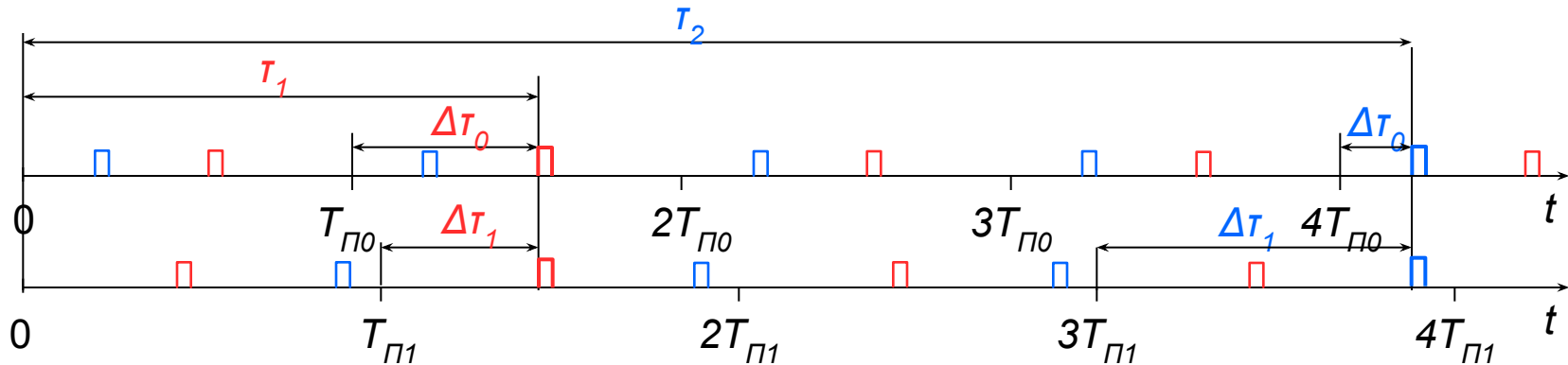
$$D = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c \cdot (\Delta F_0 - \Delta F_1)}{2s}$$

Можлива ситуація, коли в одному напрямку знаходяться дві цілі з близькими швидкостями, але на різних дальностях. Ця ситуація, подібна ситуації вимірювання швидкості на СЧП. Щоб зняти невизначеність, вводять ще один такт ЛЧМ, але з іншою швидкістю s зміни частоти.

Вимірювання дальності при СЧП

На СЧП однозначна дальність, як і швидкість, знаходиться зміною періоду повторення T_{Π} на величину $\pm\Delta T$.

При спостереженні цілі з періодами повторення $T_{\Pi 0}$ і $T_{\Pi 1} = T_{\Pi 0} + \Delta T$ шляхом стробування вимірюються інтервали часу $\Delta\tau_0$ і $\Delta\tau_1$ (по номеру стробу дальності) між моментами випромінювання чергового зондуючого і прийому найближчого відбитого сигналу. З урахуванням співвідношення між $\Delta\tau_0$ і $\Delta\tau_1$ обчислюють коефіцієнт неоднозначності k і затримку відбитого сигналу τ .



При $\Delta\tau_0 > \Delta\tau_1$:

$$\tau_1 = k \cdot T_{\Pi 0} + \Delta\tau_0 = k \cdot T_{\Pi 1} + \Delta\tau_1$$

$$k = \frac{\Delta\tau_0 - \Delta\tau_1}{T_{\Pi 1} - T_{\Pi 0}} = \frac{\Delta\tau_0 - \Delta\tau_1}{\Delta T}$$

При $\Delta\tau_0 < \Delta\tau_1$:

$$\tau_2 = k \cdot T_{\Pi 0} + \Delta\tau_0 = (k - 1) \cdot T_{\Pi 1} + \Delta\tau_1$$

$$k = \frac{T_{\Pi 1} + \Delta\tau_0 - \Delta\tau_1}{T_{\Pi 1} - T_{\Pi 0}} = \frac{T_{\Pi 1} + \Delta\tau_0 - \Delta\tau_1}{\Delta T}$$

*

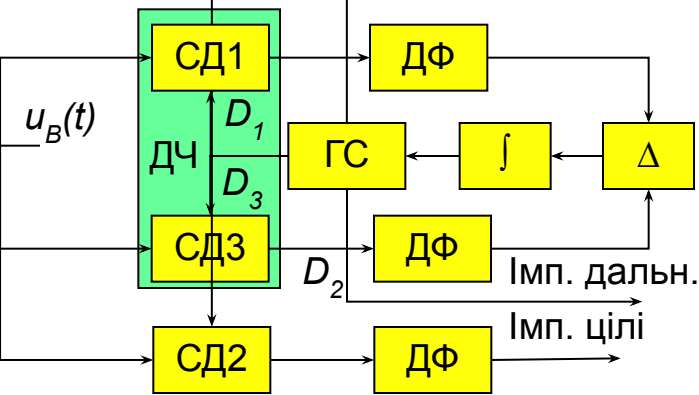
Як і при вимірюванні швидкості, степінь неоднозначності визначення дальності невелика і достатньо тільки двох періодів повторення – $T_{п0}$ і $T_{п1} = T_{п0} + \Delta T$ або $T_{п0}$ і $T_{п2} = T_{п0} - \Delta T$. Через можливе попадання на одній з додаткових частот повторення в зону сліпих дальностей, застосовують обидві допоміжні частоти, тобто цикл вимірювання включає три такти.

Як і при визначенні швидкості, при двох допоміжних частотах можливе одночасне вимірювання дальностей двох цілей.

Величини девіації періоду повторення ΔT і девіації частоти повторення ΔF зв'язані співвідношенням $\Delta T \approx 1/\Delta F$.

Скважність $Q_c = T_{п}/t_i$ зондуючих сигналів при СЧП – невелике ціле число. Девіацію періоду повторення вибирають $\Delta T = t_i$. Тому при додаткових зондуваннях скважність дорівнює $Q_c \pm 1$.

Вимірювання дальності при супроводі



Супроводження по дальності забезпечує дискримінатор часу (ДЧ). Селектори дальності СД1 та СД3 відкриваються стробами D_1 і D_3 , (інші назви – *напівстроби* або *ворота дальності*), зсунутими один відносно одного на ширину стробу. Імпульси відбитого ціллю сигналу $u_B(t)$ діляться між каналами дискримінатора пропорційно їх степені співпадіння з відповідними стробами.

Доплерівські фільтри ДФ настроєні на однакову частоту і здійснюють когерентне накопичення. Співвідношення між накопиченими сигналами відповідає співвідношенню тривалості імпульсів на входах фільтрів. Шляхом порівняння накопичених пачок радіоімпульсів формується сигнал управління генератором стробів (ГС).

Слідкуюча система забезпечує відстежування напівстробами середини імпульсів цілі. При цьому строб D_2 співпадає з імпульсами цілі.

4. Принципи роботи ІД РЛС і особливості їх побудови

Робота при огляді і пошуку цілей

Особливості роботи при ВЧП та СЧП

При ВЧП зустрічні цілі в нижній напівсфері спостерігаються без перешкод від підстилаючої поверхні, а супутні – на фоні перешкод, рівень яких залежить від висоти польоту. У верхній напівсфері перешкоди по головному пелюстку відсутні.

Альтиметрові перешкоди зменшуються із збільшенням висоти.

При СЧП всі цілі спостерігаються на фоні перешкод від підстилаючої поверхні, але їх рівень нижчий, ніж при ВЧП (менше кілець дальності).

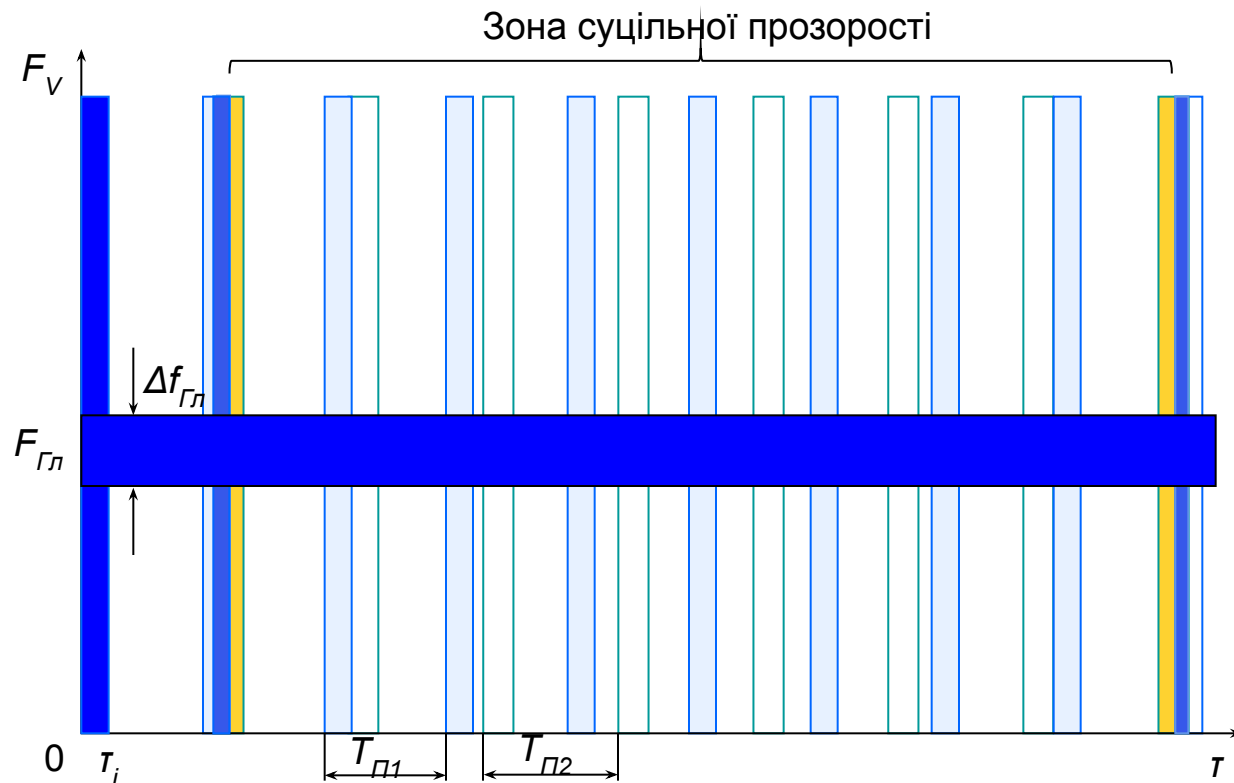
Тому:

- режим *ВЧП* застосовується при атаках цілей на *зустрічно-перетинаючихся курсах* (у передню напівсферу ПНС),
- режим *СЧП* застосовується при атаках цілей на *догонних курсах* (в їх задню напівсферу ЗНС) а також на *зустрічно-перетинаючихся курсах* на великих висотах, якщо *ціль знаходиться вище винищувача*.

При ВЧП “сліпі” швидкості відсутні, а кількість “сліпих” дальностей через малу скважність велика. Зони непрозорості при зондуванні з періодами повторення $T_{П1}$ (блакитна) і $T_{П2}$ (жовта) шириною τ_i можуть частково перекриватись (на кінцях зони суцільної прозорості) - з'являються вузькі смуги непрозорості (темноблакитна). При решті затримок ціль буде в зоні прозорості при обох періодах повторення або хоча б при одному періоді повторення (смуги блакитного або жовтого кольору).

При будь-якій частоті повторення зберігається “мертва зона” при обох періодах повторення (вертикальна синя смуга в діапазоні затримок $0 \dots \tau_i$) і зона непрозорості через перешкоди по головному пелюстку (горизонтальна синя смуга поблизу частоти $F_{ГЛ}$), якщо ДСА нахилена у нижню напівсферу.

При ВЧП скважність – одиниці, а частота повторення 100 ... 200 кГц.

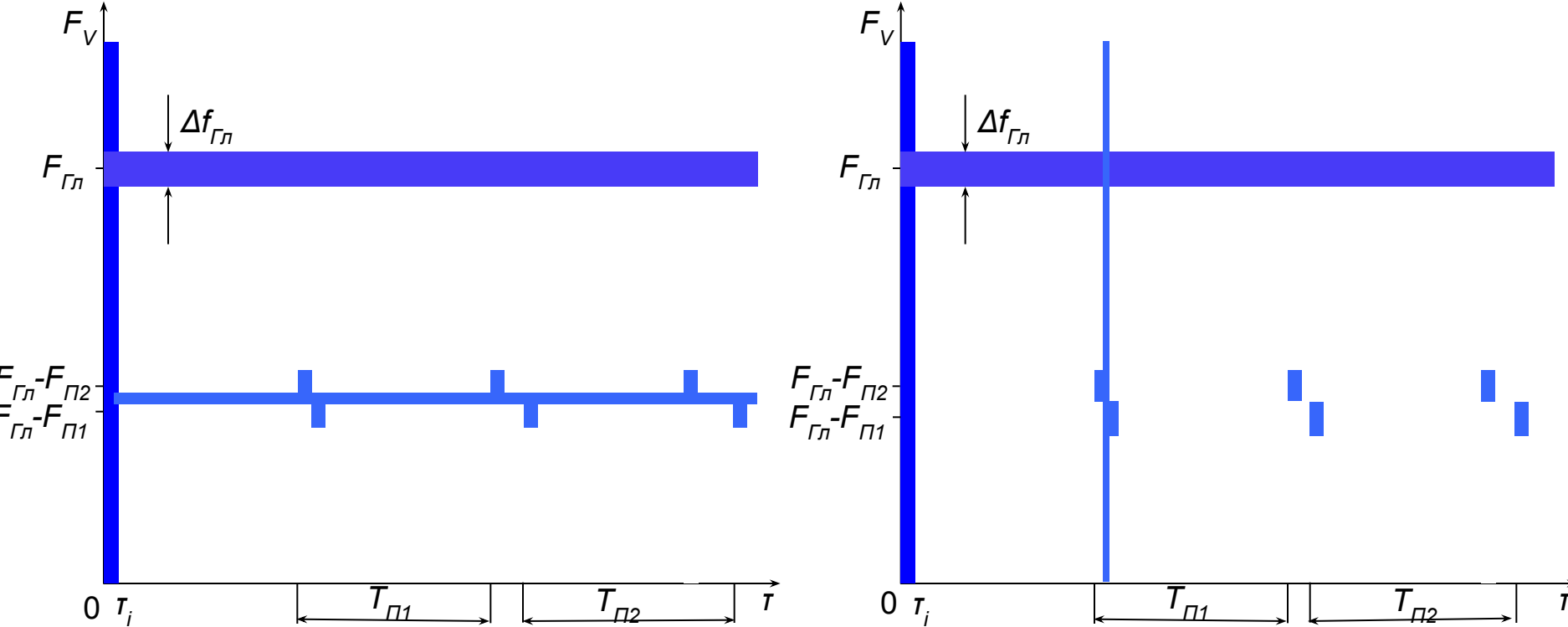


Для забезпечення суцільної прозорості у потрібному діапазоні дальностей по черзі здійснюється зондування на декількох спеціально підібраних частотах повторення.

*

При СЧП мають місце “сліпі” швидкості і дальності. Для їх усунення теж здійснюється зондування на декількох частотах повторення. Задача ускладнюється тим, що треба забезпечити *прозорість по дальності і швидкості одночасно*.

Якщо спробувати позбавитись смуги непрозорості по швидкості (горизонтальна темноблакитна смуга) шляхом збільшення частоти повторення $F_{П1}$, то з'явиться смуга суцільної непрозорості по дальності (вертикальна темноблакитна смуга) - це є наслідком принципу невизначеності: збільшення розміру діаграми невизначеності впродовж осі F призводить до її стискання впродовж осі τ .

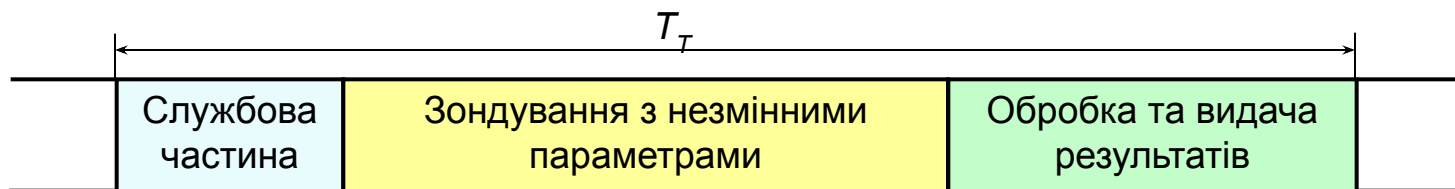


При СЧП скважність – 10 ... 20, а частота повторення 15 ... 45 кГц.

*

Часовий графік роботи ІД РЛС складається з *послідовності тактів* – інтервалів часу T_T , впродовж яких при незмінних параметрах РЛС вирішується одна або кілька часткових задач. Тривалість такту в залежності від режиму роботи 10 ... 30 мс.

Службова частина такту призначена для розрахунку потрібних параметрів роботи РЛС впродовж такту, видачі і відпрацювання відповідних команд управління: антена орієнтується в потрібному напрямку, задаючий генератор передавача і гетеродини приймача виводяться на робочі частоти, встановлюються потрібні параметри зондуючих сигналів. За 1 ... 2 мс до кінця службової частини починається **випромінювання** зондуючих сигналів.



Основна частина такту призначена для прийому і когерентного накопичення відбитих сигналів, аналізу перешкодової ситуації.

Заключна частина такту призначена для обробки результатів зондування і видачі отриманої інформації (наявність цілі, напрямок на ціль, первинна інформація про дальність цілі та швидкість зближення з нею, тощо) в ЕОМ для рішення відповідних задач, зокрема, для відображення інформації системою єдиної індикації (СЄІ).

Огляд повітряного простору і пошук цілей

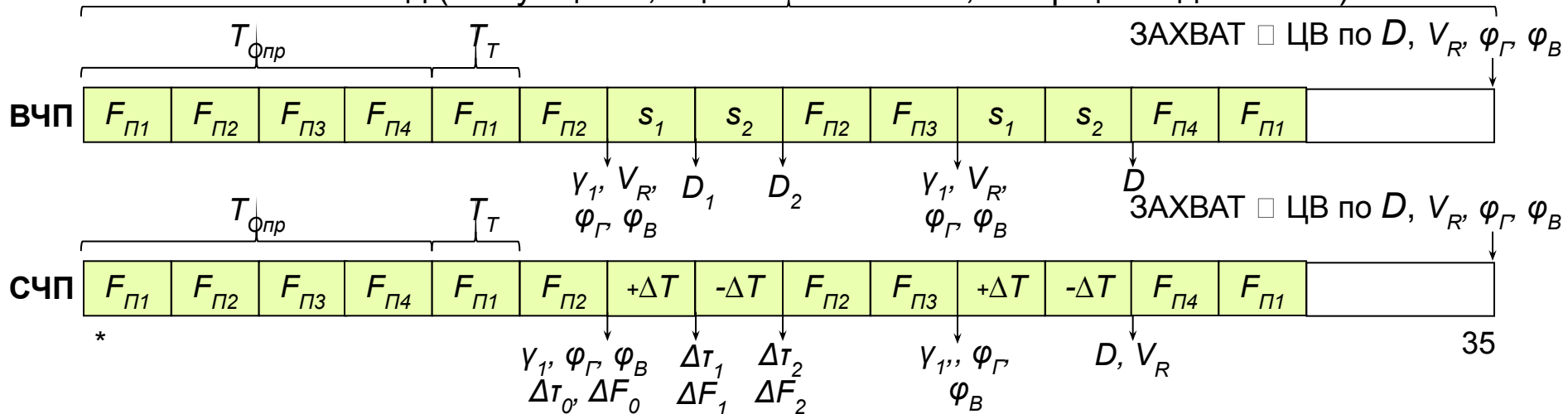
Контроль потрібного сектору повітряного простору здійснюється по зовнішньому або по внутрішньому (ручному) цілевказанню. Визначаються положення і розміри сектору та дальність пошуку, режим випромінювання (ВЧП чи СЧП) та параметри роботи каналів РЛС.

Швидкість пошукового руху ДСА обирається такою, щоб за час опромінювання цілі $T_{Опр}$ здійснити зондування на всіх частотах повторення $F_{П}$ і однозначно визначити дальність та швидкість (такти s або ΔT). В кінці тактів виявлення і вимірювання отримана інформація про ціль видається в ЕОМ (показано стрілкою) для подальшої обробки.

Отримана від інших джерел і власна інформація про повітряну обстановку аналізується відповідними алгоритмами ЕОМ, яка управляє роботою РЛС і видає рекомендації екіпажу щодо подальших дій.

Перебір частот повторення, наприклад, $F_{П1}, \dots, F_{П4}$, здійснюється до моменту, коли на одній з частот, наприклад, на частоті $F_{П2}$ не буде виявлена ціль.

Огляд (пошук цілей, оцінка обстановки, вибір цілей для атаки)



Інформація про виявлення цілі (γ_1), поточне положення антени, тобто кутові координати цілі (φ_{Γ} φ_B) видаються в ЕОМ.

При СЧП в кінці такту $F_{\Pi 2}$, на якому виявлена ціль, в ЕОМ видаються ще і номери доплерівського фільтру ΔF_0 та каналу дальності Δt_0 . а при СЧП інформація про номери каналів швидкості ΔF_0 і дальності Δt_0 запам'ятовуються для усунення неоднозначності у наступних вимірювальних тактах. У двох наступних вимірювальних тактах з періодами повторення $T_{\Pi 2} \pm \Delta T$ для однозначного визначення дальності і швидкості зближення видаються номери каналів швидкості ΔF_1 і дальності Δt_1 та каналів швидкості ΔF_2 і дальності Δt_2 .

На ВЧП по номеру доплерівського фільтру визначається радіальна швидкість цілі V_R . У двох наступних вимірювальних тактах зондування здійснюється ЛЧМ сигналами з крутизною s_1 і s_2 для однозначного визначення дальності.

Після вимірювальних тактів продовжується зондування з перебором частот повторення, починаючи з $F_{\Pi 2}$ – здійснюється пошук і виявлення решти цілей у секторі огляду.

По команді ЗАХВАТ огляд та пошук цілей припиняються і починається перехід до супроводження вказаної цілі. Для цього видаються команди цілевказання про дальність (D), радіальну швидкість (V_R) та кутові координати (φ_{Γ} φ_B) цілі, обраної для атаки.

Перехід до супроводження цілі

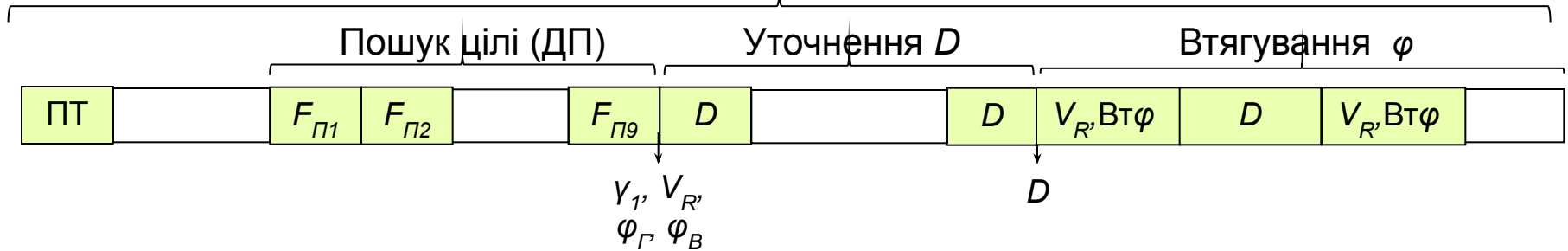
ДСА припиняє пошук і вона найкоротшим шляхом з максимальною швидкістю переміщується до вказаного напрямку ($\varphi_{Г}$ $\varphi_{В}$) - відпрацьовуються *такти переходу в точку* (ПТ).

При досягненні вказаного напрямку відновлюється пошуковий рух ДСА для встановлення контакту з ціллю, призначеною для атаки – здійснюється *кілька циклів додаткового пошуку* (ДП). Він виконується двома горизонтальними рядками “по коробочці”, центр якої знаходиться у вказаному напрямку. ДП здійснюється з меншою швидкістю, ніж пошук при огляді, і з більшою кількістю частот повторення, величина яких забезпечує суцільну прозорість по дальності і швидкості в районі призначеної для атаки цілі.

Якщо впродовж кількох циклів ДП призначена для атаки ціль не виявляється, спроби її виявлення припиняються і РЛС переводиться у звичайний режим пошуку в секторі.

В разі виявлення цілі в ході ДП рух ДСА припиняється і здійснюється більш точне вимірювання дальності цілі методом перебору спеціально підібраних частот повторення впродовж кількох десятків тактів *Д уточнення дальності*.

Перехід до супроводження (початок атаки)



Після уточнення дальності здійснюється “втягування” антени в супроводження цілі по напрямку з одночасним супроводженням по швидкості зближення (такти $V_{R'}, Вт\varphi$) і дальності (такти D). З початком “втягування” тривалість тактів подвоюється.

З початку “втягування” антена формує чотири незалежні ДСА, головні пелюстки яких мають спільний фазовий центр і відхилені від осі антени у двох взаємно перпендикулярних площинах – створюються передумови для пеленгації моноімпульсним амплітудним методом з сумарно-різницевою обробкою сигналів і модуляційним ущільненням каналів.

Для обробки пеленгаційних сигналів в приймачі використовуються два спеціальних канали, які відкриваються стробом D_2 . Для супроводження по дальності використовуються ще два канали, які управляються стробами D_1 і D_3 . Для супроводження по швидкості використовується один з кутомірних каналів.

Робота при супроводженні цілі

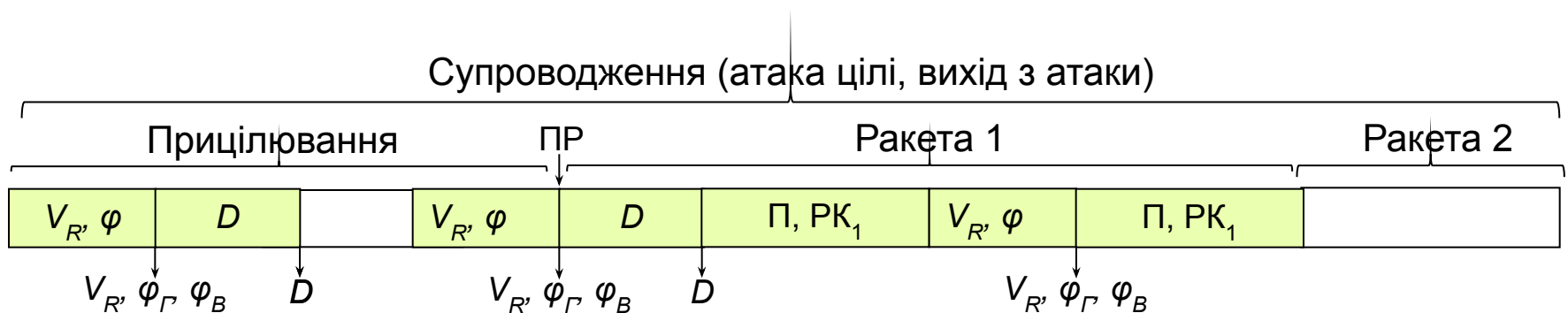
Супроводження цілі по її координатам

Супроводження однієї вибраної для атаки цілі забезпечує контроль її поточних координат з точністю, достатньою для прицілювання будь-яким видом зброї винищувача і цілевказання голівкам самонаведення ракет.

При супроводженні чергуються такти супроводження по швидкості і напрямку ($V_{R'}$, φ) та по дальності (D). На тактах φ застосовується чотирьохпелюсткова ДСА, а на тактах D – однопелюсткова. В алгоритмах супроводження реалізується принцип α - β фільтру або навіть фільтру Калмана.

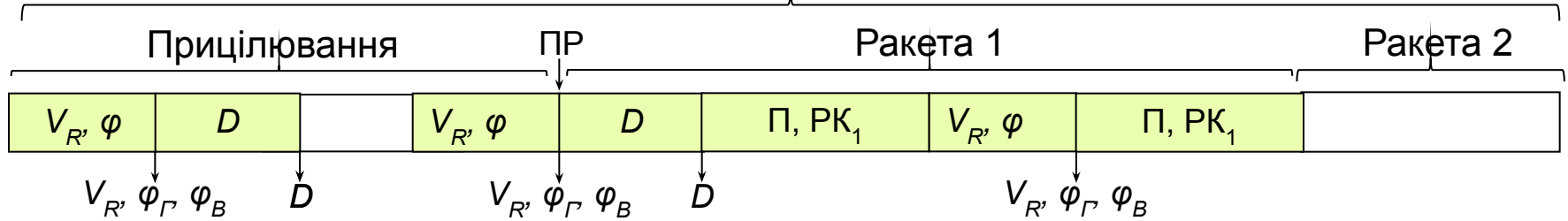
На тактах φ супроводження по дальності здійснюється в режимі екстраполяції, а на тактах D в режимі екстраполяції здійснюється супроводження по напрямку.

В разі пропадання контакту з ціллю впродовж кількох секунд всі координати супроводжуються в режимі екстраполяції.



Підсвітлювання і радіокорекція

Супроводження (атака цілі, вихід з атаки)



Інформація про поточні координати і параметри руху цілі при застосуванні будь-якого виду зброї використовується для її підготовки до застосування, для прицілювання (наведення зброї в упереджену точку зустрічі з ціллю), для цілевказання голівкам самонаведення (ГСН), для визначення моменту застосування зброї і для забезпечення виходу винищувача з атаки. По команді ПР (пуск ракет) вибрані для враження ракети сходять з підвісок послідовно, а РЛС продовжується супроводження цілі, такти ($V_{R'}$, φ) та (D) тривалістю 20 мс.

При застосуванні ракет з радіолокаційними голівками самонаведення (РГС) напівактивного типу передавач РЛС застосовується і для "підсвітлювання" цілі. "Підсвітлювання" (такти П, РК тривалістю 30 мс) здійснюється в квазібезперервному режимі. Для цього передавач РЛС формує когерентний гармонічний сигнал великої тривалості на визначеній частоті підсвітлювання, який випромінюється голчатою ДСА, орієнтованою на ціль. Орієнтація ДСА забезпечується супроводженням цілі в режимі екстраполяції (такти П, РК). В цих тактах також передаються ракеті команди радіокорекції (РК), які вводять в канал управління ракети інформацію про зміни в параметрах руху цілі, що сталися після пуску ракети. супроводження.

Такти супроводження та підсвітлювання і радіокорекції чергуються.

Питання для самоконтролю

1. Особливості ІД РЛС з ВЧП.
2. Особливості РЛС з СЧЛ.
3. Принципи побудови ІД РЛС
4. Вимірювання швидкості в ІД РЛС.
5. Вимірювання дальності в ІД РЛС некогерентних імпульсних РЛС.
6. Тактова організація роботи ІД РЛС,
7. Перехід до супроводження цілі.
8. Обмеження у взаємному положенні і співвідношенні швидкостей винищувача і цілі.

Завдання на самостійну роботу

1. Конспект по темі заняття доповнити матеріалом з навчального посібника і рекомендованих підручників.
2. Отримати практичні навички по застосуванню функцій невизначеності.
3. П.И.Дудник. Авиационные радиолокационные устройства. – М.: ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1976, с.395-408.
4. Радиоэлектронное оборудование. Под ред. В.М. Сидорина. – М.: Воениздат, 1990, с. 195-197.
5. В.А.Войчук та ін.. Бортові радіоелектронні системи. Ч.1. – К.: НАУ, 2006, с. 121-124.
6. В.А.Войчук, В.І.Романенко, Д.В.Васягін. Експлуатація й ремонт радіоелектронного обладнання літаків, вертольотів та авіаційних ракет. (Електронний підручник). – К.: НАУ, 2011, тема 9.