

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра авіоніки

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____ С.В. Павлова

“ _____ ” _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ

МАГІСТРА

**Тема: МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ ДО
ОБ'ЄКТУ ЛАЗЕРНИМ ДАЛЕКОМІРОМ
НА БОРТУ ЛІТАКА**

Виконавець:

Туз О.К.

Керівник:

Слободян О.П.

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

Охорона праці _____ .

Охорона навколишнього середовища _____ .

Нормоконтролер: _____

Левківський В.В.

Київ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Спеціальність 173 “Авіоніка”

(шифр, найменування спеціальності)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ С.В. Павлова

“ _____ ” _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломного проекту

ТУЗА ОЛЕКСАНДРА КОСТЯНТИНОВИЧА

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема дипломної проекту Методика оцінки точності вимірювання відстані до об'єкту лазерним далекоміром на борту літака

затверджена наказом ректора від “02” жовтня 2020 р. № 1899 /ст

2. Термін виконання роботи (проекту): з 05.10.2020 р. по 24.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту): Імпульсний лазер з напівпровідниковим ОКГ. Пачковий сигнал. Робоча довжина хвилі напівпровідникового лазера 0,840–0,900 мкм. Вихідна потужність – 100 Вт; робочий струм – 600 А; площа випромінення – 3x500 мк.

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Аналіз методів і принципів вимірювання дальності. 2. Принципи побудови лазерних далекомірів. 3. Розробка каналу вимірювання дальності лазерного далекоміра. 4. Оцінка методів вимірювання дальності лазерних далекомірів. 5. Охорона праці та техніка безпеки. 6. Охорона навколишнього середовища

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстрованого) матеріалу:

1. Структурна схема імпульсного далекоміра. 2. Структурна схема фазового далекоміра. 3. Функціональна схема далекоміра з напівпровідниковим ОКГ. 4. Лазерний далекомір з напівпровідниковим ОКГ. 5. Схема передавальної частини далекоміра з напівпровідниковим ОКГ. 6. Схема каналу вимірювання дальності в структурі ЛІВС. 7. Функціональна схема лазерного каналу вимірювання дальності.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Аналіз методів і принципів вимірювання дальності	17.10.20	Виконано
2.	Принципи побудови лазерних далекомірів	25.10.20	Виконано
3.	Розробка каналу вимірювання дальності лазерного далекоміра	10.11.20	Виконано
4.	Оцінка методів вимірювання дальності лазерних далекомірів	23.11.20	Виконано
5.	Охорона праці	02.12.20	Виконано
6.	Охорона навколишнього середовища	10.12.20	Виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки	16.12.20	Виконано
8.	Підготовка графічного матеріалу	18.12.20	Виконано

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці			
Охорона навколишнього середовища			

8. Дата видачі завдання: “01” жовтня 2020 р.

Керівник дипломної роботи (проекту) _____ Слободян О.П.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Туз О.К.
(підпис випускника) (П.І.Б.)

Реферат

Пояснювальна записка до дипломної роботи “Методика оцінки точності вимірювання відстані до об’єкту лазерним далекоміром на борту літака” сторінки, рисунків, таблиць, використаних джерел.

ЛІТАК, ДАЛЕКОМІР, ОПТИЧНА СИСТЕМА, ЛАЗЕР, ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ.

Об’єкт дослідження – система вимірювання дальності, предмет дослідження – лазерний імпульсний далекомір з напівпровідниковим лазером.

Мета дипломної роботи – розробка лазерного далекоміра з цифровою обробкою сигналів літака для польотів в умовах підвищеного ризику.

Метод дослідження – математичні та аналітичні методи визначення дальності, синтез схеми вимірювання дальності.

Установлено, що розроблена структура бортової системи вимірювання дальності відповідає сучасним технологіям; проведені розрахунки та запропоновані пропозиції щодо зондування пачковим сигналом, значно підвищують ефективність та зменшують вартість лазерного вимірювача дальності.

Матеріали дипломного проекту рекомендуються використовувати при проведенні наукових досліджень, навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців авіаційних конструкторських бюро.

Прогнозовані припущення щодо розвитку об’єкта дослідження – проведення експериментальних досліджень лазерних імпульсних далекомірів, встановлених на літаках цивільної авіації.

ЗМІСТ

СПИСОК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПРИНЦИПІВ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ..	10
1.1 Частотний метод радіодальнометрії.....	10
1.2 Фазовий метод вимірювання дальності.....	13
1.3 Двохчастотний фазовий метод вимірювання дальності.....	16
1.4 Лазерні методи вимірювання дальності.....	18
1.4.1. Фазові методи вимірювання дальності.....	18
1.4.2. Імпульсні методи вимірювання дальності.....	26
РОЗДІЛ 2 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРІВ.....	33
2.1. Основні принципи оптичної локації.....	34
2.2. Різновидності конструкцій оптичних далекомірів	42
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА КАНАЛУ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО ОБ'ЄКТУ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА.....	58
3.1. Обґрунтування вибору каналу вимірювання дальності.....	58
3.2. Зниження сумарної потужності лазерного далекоміра	64
3.2.1. Основний підхід щодо реалізації методу	64
3.2.2. Узгодження оптичних полів приймача і передавача.....	67
3.2.3. Оцінка характеристик виявлених при моноімпульсному зондуванні.....	69
3.2.4. Оцінка характеристик виявлення при «пачковому зондуванні».....	70
3.2.5. Післядетекторна обробка сигналу.....	74
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВИМІРЮВАННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДАЛЬНОСТІ ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРІВ.....	78
4.1. Оцінка основних параметрів лазерних далекомірів.....	78
4.2. Дослідження оцінки максимальної дальності імпульсного лазерного далекоміра.....	89
4.3. Дослідження максимальної дальності лазерних далекомірів й побудова графіків	93
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	103

5.1. Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	103
5.2. Організаційні і технічні заходи щодо виключення або зменшення рівня небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	104
5.3. Заходи пожежної і вибухової безпеки.....	108
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	109
6.1. Екологічна експертиза.....	109
6.2. Технічно-організаційні заходи щодо зниження забруднення навколишнього середовища	110
ВИСНОВОК.....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	115

СПИСОК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АМ	- амплітудна модуляція
БКД	- блок керування дефлекторами
БД	- блок дефлекторів
КЕ	- керуючий елемент
ККД	- коефіцієнт корисної дії
ЛА	- літальний апарат
ЛДЛ	-лазерні діодні лінійки
ЛД	- лазерний далекомір
ОКГ	- опто-квантовий генератор
ПРТ	- приймальний телескоп
ПРДО	- передавальна оптика
ПРМО	- приймальна оптика
РП	- резонансний підсилювач
РЛС	- радіолокаційна станція
СПМ	- селектор подовжніх мод
ФЕП	- фотоелектронний помножувач
ФІ	- формувач імпульсів
ФОС	- формуюча оптична система
ФТД	- фотодетектор
ЧМ	- частотна модуляція
УФ	- ультрафіолетовий діапазон
ШП	- широкосмуговий підсилювач

ВСТУП

Поява лазерів відразу надала і продовжує робити вплив на різні області науки і техніки, де стало можливим застосування лазерів для вирішення конкретних наукових і технічних задач. Проведені дослідження підтвердили можливість значного поліпшення багатьох оптичних приладів і систем при використанні як джерело світла лазерів і привели до створення принципово нових пристроїв (підсилювачі яскравості, квантові гірметри, швидкодійні оптичні схеми і ін.). На очах одного покоління відбулося формування нових наукових і технічних напрямів - голографії, нелінійної і інтегральної оптики, лазерних технологій, лазерної хімії, використання лазерів для керованого термоядерного синтезу і інших задач енергетики.

Лазерна локація відноситься до області оптоелектроніки яка виявляє і визначає місцезположення різних об'єктів за допомогою електромагнітних хвиль оптичного діапазону, що випромінюється лазерами. Об'єктами лазерної локації можуть бути танки, кораблі, ракети, супутники, промислові і військові споруди. Принципово лазерна локація здійснюється активним методом. Створення лазерів відкрило нові перспективи в техніці локації

Радіолокація як науково-технічний напрям в радіотехніці зародився 30-х роках. Досягнення авіаційної техніки зумовили необхідність розробки нових засобів вимірювання дальності, що мають високі характеристики (дальності, точності).

В сучасній лазерній локації використовуються два основні методи вимірювання дальності – імпульсний і фазовий. Відразу обмовимося, що в системах повітряного базування в даний час використовується тільки імпульсний метод, а в наземних – імпульсний і фазовий. Реалізація імпульсного методу вимірювання похилої дальності припускає визначення часу розповсюдження короткого лазерного імпульсу від джерела випромінювання до об'єкту і назад до приймача.

Для імпульсного методу повинна забезпечуватись мінімальна тривалість зондуєчого імпульсу і його максимальна добротність (тобто максимально крутий

передній фронт). Абсолютно аналогічні вимоги до форми зондуючого імпульсу пред'являються в радіолокації і інших технологіях активного зондування на рівні землі.

Подальшим розвитком імпульсного методу є так званий метод реєстрації форми відображеної хвилі (wave form registration). Практичну реалізацію даного методу забезпечують, наприклад, лідари ALTM 30/70 і ALTM 3100 як опція до базового імпульсного методу вимірювання.

Фазовий метод на відміну від імпульсного дозволяє отримати точності проведеного вимірювання за рахунок аналізу взаємної кореляційної функції випромінюючого і прийнятого випромінювання. Достовірне (і як наслідок точне) вимірювання характеризуватиметься наявністю виразно вираженого максимуму взаємної кореляційної функції, а у недостовірному вимірюванні відповідна функція матиме розмитий вигляд, і значення максимуму визначатимуться не так точно.

Розділ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПРИНЦИПІВ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ

1.1. Частотний метод радіодальнометрії

Суть даного методу характеризується тим, що зондує випромінювання безперервне і модульоване по частоті. Модуляція дозволяє розрізнити прямий і відображений сигнали відносно різниці їх частот і тим самим не тільки визначити ціль, але і виміряти її дальність.

Частоту передавача $f_{\text{прд}}$, природно, не можна необмежено збільшувати або зменшувати. Її змінюють по пилкоподібному або синусоїдальному закону з частотою модуляції $F_m = 1/T_m$. Девіацію, тобто максимальне відхилення частоти, позначають:

$$Df_m = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}.$$

Частота відбитого сигналу $f_{\text{від}}$ повторює частоту випромінюючого сигналу (переданого) $f_{\text{прд}}$ із деяким запізнюванням $t_d = 2D/c$. В один і той же момент часу t різниця частот переданого ($f_{\text{прд}}$) і відбитого ($f_{\text{від}}$) сигналів, тобто частота биття, дорівнює:

$$F_b = |v_m|t_d = 2|v_m|D/c \quad (1.1)$$

де $|v_m|$ - швидкість зміни частоти.

В один напівперіод модуляції $T_m/2$ частота передавача $f_{\text{прд}}$ зростає і швидкість $v_m > 0$, а в інший напівперіод – навпаки; разом з тим частота F_b фізично не може бути від'ємною величиною. Тому у формулу (1.1) введено абсолютне значення швидкості модуляції $|v_m|$. При пилкоподібному законі ця швидкість постійна і дорівнює розподілу частоти Df_m до її тривалості $T_m/2$.

<i>Кафедра авіоніки</i>				<i>НАУ 20 16 06 000 ПЗ</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Туз О.К.</i>			Аналіз методів і принципів вимірювання дальності	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Керівник</i>	<i>Слободян О.П.</i>					10	116
<i>Консульт.</i>					10		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Левкієвський В.</i>				173 201 «Авіоніка»		
<i>Затверд.</i>	<i>Павлова С.В.</i>						

Із вищезазначеного формулу (1.1) можна представити у вигляді:

$$F_{\delta} = 2|v_m|D/c = 4Df_m D/c T_M = 4Df_m F_M D/c \quad (1.2)$$

Величини Df_m , F_M і c – постійні, а це значить, що в ЧМ далекомірі вимірювання поточної дальності до об'єкту D зводиться до вимірювання різниці частот F_{δ} прямого і відбитого сигналів, причому D і F_{δ} зв'язані між собою прямо пропорційною залежністю. Звідси й інша назва величини F_{δ} – частота дальності.

За способом обробки сигналів частотні вимірники діляться на кореляційні, з фільтровою обробкою і з кореляційно-фільтровою. Третій варіант, найбільш простий і представлений функціональною схемою далекоміра (рис.1.1).

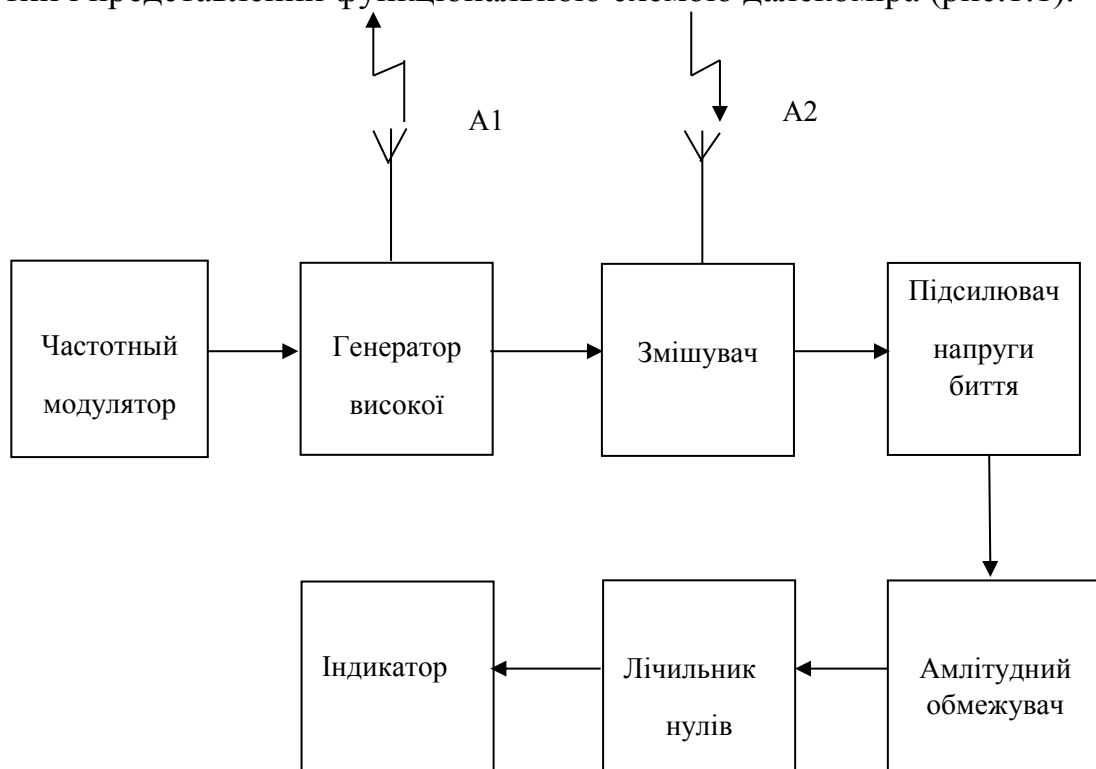


Рис. 1.1. Функціональна схема частотного радіодалекоміра з кореляційно-фільтровою обробкою сигналів

Передавальний пристрій складається з генератора високої частоти, модулятора, який змінює частоту генерування коливань, за пилкоподібним або синусоїдальним законом, і передавальної антени А1. Першим каскадом приймача є змішувач, з якого починається кореляційно-фільтрова обробка: в змішувачі перемножуються відбитий сигнал $u_{\text{від}}(t)$, який підводиться від приймальної антени А2, з опорним сигналом $u_{\text{оп}}(t)$, який підводиться по короткому кабелю від

передавача; накопичення енергії відбувається в RC-фільтрах нижніх частот. Як у всякому змішувачі, перемножування відбувається в нелінійному елементі і в результаті утворюються складові сумарної і різницевої частот відбитого і опорного (прямого) сигналів. Сигнал з частотою биття подається на підсилювач низької частоти, а складові сумарних частот подавляються фільтрами нижніх частот змішувача.

Коли частота $F_{\text{б}}$ відхиляється від свого основного значення, синусоїдальність цієї напруги порушується. Двохсторонній обмежувач амплітуди, що слідує за підсилювачем низької частоти, перетворює отриману несинусоїдальну напругу з періодом $T_{\text{м}}$ в прямокутні коливання $u_{\text{гр}}$. Лічильник нулів визначає частоту биття $F_{\text{б}}$ за числом переходів через нуль, які створюють перепади цих коливань за період модуляції $T_{\text{м}}$. Якщо число їх $N_{\text{м}}$ помножити на частоту модуляції $F_{\text{м}}$, то вийде частота дальності, яка фіксується індикатором:

$$F_{\text{б}} = N_{\text{м}} F_{\text{м}} \quad (1.3)$$

Якщо лічильник аналоговий (рис. 1.2), то вихідна напруга $u_{\text{вих}}$ постійна, а якщо лічильник цифровий, то робота його зводиться до підрахунку еталонних імпульсів, пропорційних, як і напруга $u_{\text{вих}}$, частоті дальності. Очевидно, що індикатор такого лічильника повинен вказувати дальність до об'єкту в цифровій формі.

У зв'язку з тим, що лічильники підраховують число повного биття, свідчення частотного далекоміра змінюються скачками. В найпростішій функціональній схемі частотного радіодалекоміра з кореляційно-фільтровою обробкою сигналів дальність D_{min} , яку здатний зміряти далекомір, відповідає одному повному биттю за період модуляції ($N_{\text{м}} = 1$). Згідно (1.3) це означає, що $F_{\text{б}} = F_{\text{м}}$, а з урахуванням (1.2), що $F_{\text{м}} = 4Df_{\text{м}}F_{\text{м}}D_{\text{min}}/c$. Звідси знаходимо мінімальну дальність частотного далекоміра:

$$D_{\text{min}} = c/4Df_{\text{м}} \quad (1.4)$$

Наступні показники далекоміра відповідатимуть вже двом ($N_m = 2; F_6 = 2F_m$), трьом ($F_6 = 3F_m$) і т.д. повному битті за один період модуляції. Значить, є похибка дискретності вимірювання дальності, рівного стрибку:

$$\Delta D = c/4\Delta f_m \quad (1.5)$$

При вимірюванні дальності декількох цілей вимірник повинен мати спектроаналізатор, розрахований на послідовний або паралельний аналіз частот биття.

Послідовний аналіз проводиться плавною зміною частоти гетеродина приймача або оптимального фільтру. Це вимагає великих витрат часу і пов'язано з неповним використанням енергії відбитого сигналу під час перенастроювання.

1.2. Фазовий метод вимірювання дальності

Вимірювання дальності фазовими методами полягає у вимірюванні приросту фази гармонічного коливання масштабної частоти за час запізнювання відбитого сигналу:

$$\Delta\varphi = \Omega_m t_d = 2\pi F_m \cdot D/c = 4\pi D/\lambda_m \quad (1.6)$$

Частота F_m і довжина хвилі $\lambda_m = c/F_m$ називаються масштабними тому, що від них залежить масштаб шкали дальності, тобто коефіцієнт пропорційності між фазовим зсувом $\Delta\varphi$ і дальністю вимірювальної цілі D .

Через фазові інтервали $\Delta\varphi = 2\pi$ гармонійне коливання, а з ним і показання фазометра повторюються. Звідси згідно формулі (1.6) максимальна межа дальності, що однозначно вимірюється буде рівна:

$$D_{\text{одн}} = \lambda_m/2 \quad (1.7)$$

Найпростішим пристроєм був би фазовий радіодалекомір з випромінюванням коливань тільки однієї – несучої частоти f_0 . Але тоді масштабна частота $F_m = f_0$ і довжина хвилі $\lambda_m = \lambda_0 = c/f_0$, а оскільки РЛС звичайно працюють на ультракоротких хвилях, то це обмежило б вимірювальну дальність декількома метрами ($D_{\text{одн}} = \lambda_m/2$).

Разом з тим масштабна частота впливає на точність визначення дальності. Дійсно, з формули (1.7) дальність $D = c\Delta\varphi/4\pi F_M = \lambda_M\Delta\varphi/4\pi$, і якщо фазометр вимірює $\Delta\varphi$ з середньоквадратичною похибкою $\sigma\Delta\varphi$, то дальність визначається з середньоквадратичною похибкою:

$$\sigma_D = c\sigma\Delta\varphi/4\pi F_M = \lambda_M\sigma\Delta\varphi/4\pi \quad (1.8)$$

Шуми перешкоджають точному визначенню фазового зсуву і збільшенням відношення сигнал/шум q_0 похибка $\sigma\Delta\varphi_{\text{п}}$ зменшується: $\sigma\Delta\varphi_{\text{п}} = 1/\sqrt{q_0}$ [рад]. З урахуванням цього з формули (1.8) знаходимо потенційну середньоквадратичну похибку вимірювання дальності фазовим методом:

$$\sigma_{\text{ДП}} = c\sigma\Delta\varphi_{\text{п}}/4\pi F_M = c/4\pi F_M \sqrt{q_0} = \lambda_M/4\pi \sqrt{q_0} \quad (1.9)$$

Як видно, всім фазовим далекомірам властиво суперечність: збільшення масштабної частоти сприяє підвищенню точності вимірювань, але зменшує межу вимірювальної дальності.

Передавальна антена випромінює радіохвилі несучої частоти f_0 , модульовані по амплітуді гармонійними коливаннями низької частоти F , а порівняння фаз випромінюваного і відбитого сигналів проводиться на огинаючій частоті F_M цих сигналів. Пропорційно зменшенню масштабної частоти від f_0 до $F_M = F$ (збільшенню масштабної довжини хвилі $\lambda_M = c/F$) зростає вимірювальна дальність D .

Наприклад, при частоті модуляції $F = 300$ Гц довжина хвилі $\lambda_M = 3 \cdot 10^8 / 300 = 10^6$ м і $D = \lambda_M/2 = 10^6/2 = 5 \cdot 10^5$ м = 500 км.

В передавачі далекоміра (рис. 1.3) коливання генератора високої частоти модулюються за амплітудою коливаннями генератора масштабної частоти. Відбиті від цілі АМ коливання підсилюються і демодулюються амплітудним детектором. Отже, вихідна напруга приймача $u_{\text{прм}}$ має частоту, рівну масштабній $\Omega_M = 2\pi F_M$, але відрізняється за фазою від напруги u_M на $\Omega_M t_{\text{д}}$. Цей фазовий зсув вимірюється фазометром.

На функціональній схемі показаний вимірник фази з дискретним рахунком дальності. Вимірювання зводиться до рахунку числа еталонних імпульсів $N_{\text{ет}}$, що генеруються за час запізнювання сигналу $t_{\text{д}}$. Очевидно, що період проходження

цих імпульсів $T_{\text{ет}}$ повинен бути стабільним й істотно менше за запізнювання сигналу t_d навіть при мінімальній дальності до цілі.

Порівняльні за фазою синусоїдальні напруги u_m і $u_{\text{прм}}$ перетворюються амплітудними обмежувачами в прямокутні коливання $u_{\text{ом}}$ і $u_{\text{опрм}}$, які потім перемножуються. Щоб отримати коливання від'ємної полярності на протязі часу t_d і позитивної полярності для решти частини напівперіоду модуляції. Каскад збігу має два входи: на один від генератора від'ємних еталонних імпульсів поступають коливання $u_{\text{ет}}$, а на іншій від перемножувача коливання $u_{\text{ом}}$ і $u_{\text{опрм}}$. Оскільки ті чи інші співпадають за знаком тільки в інтервали часу t_d , то еталонні імпульси $u_{\text{ет}}$ проходять до лічильника пачками $N_{\text{ет}} = t_d/T_{\text{ет}}$ і цифровий лічильник вказує дальність до об'єкту пропорційно числу $N_{\text{ет}}$:

$$D = ct_d/2 = cN_{\text{ет}}T_{\text{ет}}/2 = cN_{\text{ет}}/2F_{\text{ет}}. \quad (1.10)$$

Похибка дискретності вимірника відповідає періоду еталонних імпульсів:

$$\Delta D_{\text{дкр}} = \pm cT_{\text{ет}}/2 = \pm c/2F_{\text{ет}} \quad (1.11)$$

Збільшення частоти $F_{\text{ет}}$ зменшує похибку $\Delta D_{\text{дкр}}$, але ускладнює реалізацію рахунку імпульсів. При $F_{\text{ет}} = 10^7 \text{ Гц}$ матимемо $\Delta D_{\text{дкр}} = \pm 3 \cdot 10^8 / 2 \cdot 10^7 = \pm 15 \text{ м}$.

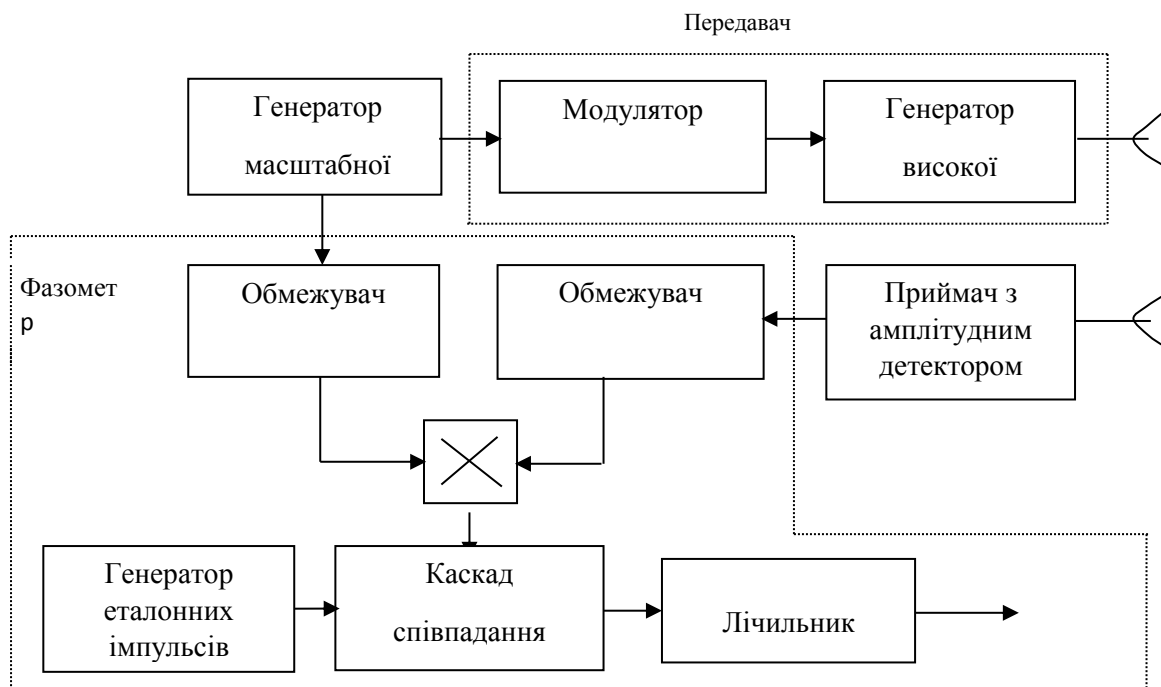


Рис. 1.3. Функціональна схема фазового далекоміра з модуляцією несучої

Суперечність у виборі масштабної частоти дозволяє застосувати багатошкальний відлік: подібний вимірюванню часу за допомогою годинникової, хвилинної і секундної стрілок годинника, дальність визначають одночасно або послідовно за допомогою грубої шкали, відповідної самої низької модульованої частоти F_{m1} , і більш точної шкали, що відповідає масштабній частоті F_{m2} , яка кратна F_{m1} , і якщо потрібно – за ще більш точними шкалами, проградуйованих для більш високих масштабних частот $F_m = F_{m3}, F_{m4}$ і т.д. Частоту F_{m1} вибирають виходячи із заданої дальності, що максимально вимірюється, а найбільшу масштабну частоту – згідно з необхідною точністю вимірювань.

1.3. Двохчастотний фазовий метод вимірювання дальності

В двухчастотних фазових далекомірах масштабна частота утворюється в результаті биття синусоїдальних коливань двома несучими частотами f_1, f_2 , які генеруються з початковими фазами ψ_{01}, ψ_{02} в передавачі (рис. 1.4). Коливання слідує через суматор в передавальну антену і, крім того, в змішувач I – як опорні сигнали. На виході цього змішувача виходять коливання різницевої частоти $\Delta f = f_1 - f_2$ з фазою:

$$\psi_1 = (2\pi f_1 - 2\pi f_2)t + (\psi_{01} - \psi_{02}) = 2\pi \Delta f t + (\psi_{01} - \psi_{02}) \quad (1.12)$$

Відбиті від цілі сигнали схвачуються приймальною антеною, розгалужуються за частотами f_1, f_2 , проходять через підсилювач-обмежувач і перетворюються змішувачем II в коливання різницевої частоти $f_1 - f_2$. Частоти f_1, f_2 вибираються близькими один до одного і для них фазові зсуви, обумовлені віддзеркаленням хвиль від цілі і затримкою в РЛС, можна вважати однаковими. На виході змішувача II ці зсуви повністю віднімаються і з урахуванням часу запізнювання сигналу $t_d = 2D/c$ фазовий кут вихідної напруги дорівнює:

$$\psi_{11} = (2\pi f_1 - 2\pi f_2)(t - 2D/c) + (\psi_{01} - \psi_{02}) = \pi \Delta f (t - 2D/c) + (\psi_{01} - \psi_{02}) \quad (1.13)$$

Фазометр вимірює різницю фаз ψ_1, ψ_{11} виражених формулами (1.11), (1.12), і визначає дальність до об'єкту згідно з виразом:

$$\Delta \psi = \psi_1 - \psi_{11} = 2\pi \Delta f (t - t + 2D/c) + (\psi_{01} - \psi_{02}) - (\psi_{01} - \psi_{02}) = 4\pi \Delta f D/c = 4\pi D/\Delta \lambda \quad (1.14)$$

Легко помітити, що фазометр двухчастотного далекоміра не реагує на зсув фази, викликаний віддзеркаленням хвиль від об'єкту, і дозволяє отримати

необхідний діапазон однозначного вимірювання дальності за рахунок малої різниці довжин хвиль $\Delta\lambda = c/\Delta f$, яка відіграє роль масштабної довжини хвилі: $\lambda_m = \Delta\lambda$. Відповідно масштабна частота $F_m = \Delta f$.

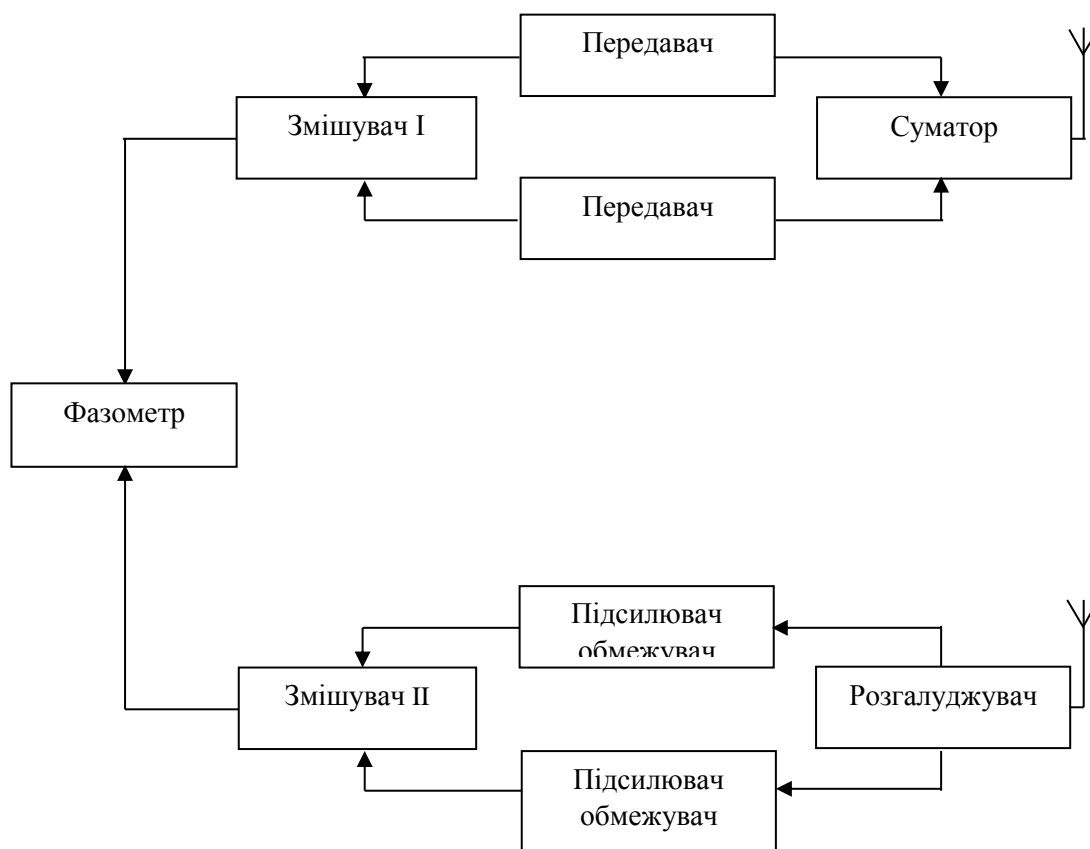


Рис.1.3. Функціональна схема двохчастотного фазового радіодалекоміра

Підбором величини Δf добиваються однозначних вимірювань в заданому діапазоні дальності, а багатоскальним відліком забезпечують необхідну точність. Висока стабільність і кратність частот F_m цих шкал досягається тим, що спочатку одержують різні пари частот f_1 і f_2 множенням і зміщенням коливань первинного кварцового генератора, а потім утворюють необхідні масштабні частоти F_m , в якості битті частот f_1, f_2 .

Реалізація фазового радіодалекоміра на битті ускладнюється тим, що неможливо розділити безперервні прямий і у відповідь сигнали однакової частоти. З цієї причини метод биття застосовується тільки в системах з активною відповіддю, де у відповідь сигнал випромінюється за частотою, відмінною від частоти сигналу запиту.

1.4. Лазерні методи вимірювання дальності

1.4.1. Фазові методи вимірювання дальності

Застосування фазових вимірів для визначення великих довжин базуються на високій точності наближення геометричної оптики, що застосовується для поширення модульованих електромагнітних хвиль оптичного діапазону в умовах неоднорідної земної атмосфери, і дуже слабкій відмінності траєкторій світлових променів у цих умовах від прямих ліній.

Нехай плоска монохроматична хвиля з амплітудою A_0 , частотою f_0 і модульованої за законом $P(t)=1+m\cos(2\pi Ft)$ інтенсивністю (F, m – частота й глибина модуляції, відповідно) поширюється в неоднорідній атмосфері, яка характеризується показником заломлення повітря $n=n(\vec{r}, f)$, що залежить від координат і частоти електромагнітного поля. У геометрично оптичному наближенні поле цієї хвилі можна представити у вигляді

$$E(\vec{r}, t) = A_0 \left\{ 1 + m \cos \left[2\pi F \left(t - \int_0^s \frac{ds}{V_G(\vec{r}(s), f_0)} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ i 2\pi f_0 \left[t - \int_0^s \frac{ds}{V_\phi(\vec{r}(s), f_0)} \right] \right\} \quad (1.15)$$

У цьому співвідношенні V_ϕ, V_G – фазова й групова швидкості поширення оптичного випромінювання із частотою f_0 , відповідно, а інтеграли беруться за траєкторією світлового променя, яка визначається рівнянням

$$\frac{d}{ds} n(\vec{r}, f_0) \frac{d\vec{r}}{ds} = \text{grad } n(\vec{r}, f_0), \quad (1.16)$$

де $\vec{r}(s) = \vec{i}x(s) + \vec{j}y(s) + \vec{k}z(s)$ – радіус-вектор точки, що лежить на промені; s – поточна координата, яка відліковується за траєкторією променя.

Якщо електромагнітне поле (1.15) проходить вимірювану довжину в прямому й зворотному напрямках і попадає на пристрій, який містить квадратичний детектор, то на його виході одержимо сигнал

$$j = \mu \langle EE^* \rangle = \mu A_0^2 [1 + m \cos(2\pi Ft - \varphi_{L_{T..L}})] \quad (1.17)$$

де μ – коефіцієнт перетворення оптичного випромінювання в струм фотодетектора; в дужках $\langle \rangle$ позначають усереднення за проміжок часу $t \gg f_0^{-1}$;

$\varphi_{L_{T.П}}$ – фаза сигналу на частоті модуляції, причому $\varphi_{L_{T.П}} = 2\pi F \tau$, де час τ , що затрачується інформаційним сигналом на подвійне для проходження

вимірювальної довжини, визначається як: $\tau = 2 \int_0^{L_{T.П}} \frac{ds}{V_r[\vec{r}(s), f_0]}$.

З урахуванням зв'язку $V_r(\vec{r}, f_0) = c / [n_r(\vec{r}, f_0)]$ (n_r – груповий показник заломлення повітря, c – швидкість світла у вакуумі) величину τ можна виразити через середнє інтегральне уздовж вимірюваної лінії значення групового показника заломлення повітря

$$\bar{n}_r(f_0) = \frac{1}{L_{T.П}} \int_0^{L_{T.П}} n_r(s, f_0) ds \quad (1.18)$$

і довжину траєкторії променя $L_{T.П}$ за формулою $\tau = [2L_{T.П} \bar{n}_r(f_0)] / c$. Звідси для довжини $L_{T.П}$ одержимо співвідношення

$$L_{T.П} = \frac{c\tau}{\bar{n}_r(f_0)} = \frac{c\varphi_{L_{T.П}}}{4\pi F \bar{n}_r(f_0)}, \quad (1.19)$$

що є основним для фазової лазерної далекометрії.

Формула (1.19) пов'язує час проходження сигналу τ або його фазу $\varphi_{L_{T.П}}$, що вимірюють експериментально, з відстанню $L_{T.П}$, яку пройшов сигнал, і з визначеним незалежним чином середнім інтегральним значенням групового показника заломлення повітря \bar{n}_r .

Таким чином, структурна схема фазового лазерного далекоміра повинна включати наступні основні елементи (рис. 1.4): передавальний пристрій 1, що містить джерело модульованого по інтенсивності оптичного випромінювання (у якості такого джерела може бути використаний двохчастотний лазер або одночастотний лазер з модулятором); відбивач 2, який встановлений у кінцевій точці вимірюваної довжини; прийомний пристрій 3 із квадратичним детектором;

фазометричний пристрій (пристрій індикації) 4, що вимірює різницю фаз випромінюваного і прийнятого інформаційних сигналів.

При реалізації фазового методу в конкретному вимірювана різниця фаз містить у собі крім корисного фазового збігу, пов'язаного із проходженням інформаційного сигналу вимірюваної довжини, ще й фазовий збіг інформаційного сигналу всередині приладу, який залежить від особливостей його конструкції. Тому формула для визначення вимірюваної довжини повинна мати вигляд:

$$L_{т.п} = \frac{c\varphi_{L_{т.п}}}{4\pi F\bar{n}_r(f_0)} + \hat{P} = \frac{c}{2F\bar{n}_r(f_0)} \left[N + \frac{\varphi}{2\pi} \right] + \hat{P}, \quad (1.20)$$

де \hat{P} – постійне виправлення, яке визначається експериментально, і додається до показання далекоміра;

N й $\varphi/2\pi$ – ціла й дробова частини числа укладань одиниць масштабу $c/2F$ у вимірюваній довжині.

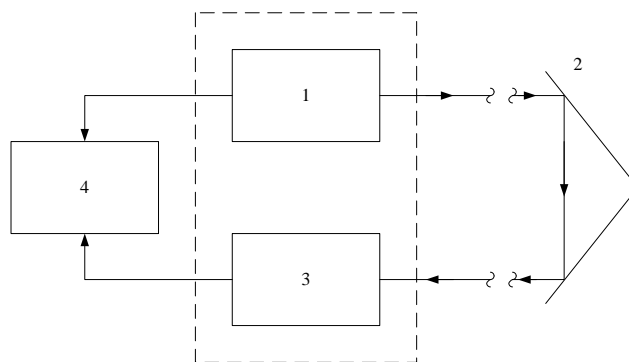


Рис. 1.4. Узагальнена структурна схема фазового лазерного далекоміра

Використовуючи значення дробової частини різниці фаз φ і постійного виправлення \hat{P} , на підставі співвідношення (1.20) можна визначити шукану довжину L , якщо вважати, що інформаційний сигнал поширюється в приземному шарі атмосфери відносно прямої лінії.

До теперішнього часу розроблено багато варіантів реалізації фазового лазерного модуляційного методу виміру великих довжин, причому більшість із них з метою підвищення точності вимірів. Однак технічні рішення, що забезпечують високу точність вимірювання великих довжин, можуть бути зведені до двох узагальнених схем: з компенсаційним і безпосереднім виміром різниці

фаз. Спрощена структурна схема, що пояснює принцип роботи фазового лазерного модуляційного далекоміра з компенсаційним виміром різниці фаз, наведена на рис. 1.5.

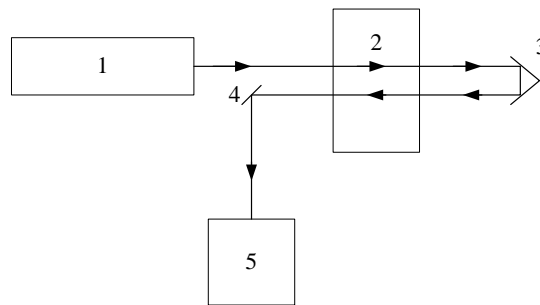


Рис. 1.5. Узагальнена структурна схема фазового лазерного модуляційного далекоміра з компенсаційним виміром різниці фаз

Випромінюваний промінь світла лазером 1 проходить через модулятор 2 і направляється уздовж вимірюваного базису. Відбившись від встановленого на віддаленому кінці вимірюваного базису відбивача 3, він повертається й удруге проходить через цей же модулятор у зворотному напрямку (у ряді моделей приладів використовують два окремих паралельно працюючих модулятора). Після повторної модуляції інтенсивність цього променя буде залежати від відстані між модулятором і відбивачем, причому мінімальне значення інтенсивності буде при укладанні в ньому цілого числа довжин хвиль огинаючої модуляції променя, що поширюється. Мінімальне значення інтенсивності реєструється за допомогою фотоелектричного перетворювача 5, на який цей промінь направляється дзеркалом 4. При цьому вимірювана довжина буде визначатися виразом

$$L = \frac{c}{2F \cdot \overline{n_g}} \cdot N + L' + \hat{P}, \quad (1.23)$$

де $c = 299792458 \pm 1,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ – швидкість світла у вакуумі;

F – частота модуляції; $\overline{n_g}$ – середнє інтегральне значення групового показника заломлення повітря;

N – ціле число укладень довжини хвилі огинаючої на вимірюваній довжині;

L' – довжина уведеної частини оптичної лінії затримки змінної довжини;

\hat{P} – постійне виправлення, що додається до показань далекоміра.

Зрівнювання кратності шляху, який проходить зондувальний промінь, і довжини хвилі огинаючої модуляції цього променя в реальних далекомірах виконується або шляхом плавної зміни частоти модуляції, або переміщенням на відому величину модулятора, або введенням у тракт зондувального променя оптичної лінії затримки змінної L' довжини.

Методи розкриття неоднозначності, застосовувані в прецизійних фазових лазерних далекомірах, аналогічні застосовуванім у широко розповсюджених фазових світлодалекомірах.

Спрощена структурна схема, що пояснює принцип роботи модуляційного лазерного далекоміра з безпосереднім виміром різниці фаз, наведена на рис. 1.6.

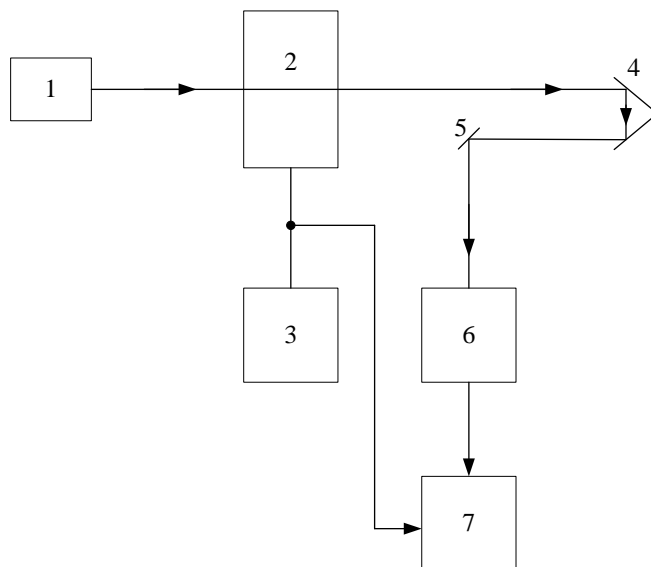


Рис. 1.6. Узагальнена структурна схема модуляційного лазерного далекоміра з безпосереднім виміром різниці фаз

Випромінювальний лазером 1 промінь світла проходить через модулятор 2, який збуджується сигналом від генератора масштабної частоти 3, і направляється уздовж вимірюваного базису. Відбившись від встановленого на віддаленому кінці вимірюваного базису відбивача 4, він повертається й дзеркалом 5 направляється на фотоелектричний демодулятор 6. Фаза електричного сигналу, що виділяється на виході фотоелектричного демодулятора, несе інформацію щодо значення вимірюваної довжини. Вимір фази цього сигналу виконується фазометром 7. В якості опорного значення приймається фаза електричного сигналу, яка надходить на модулятор від генератора масштабної частоти (у ряді моделей приладів опорний сигнал отримують від додаткового фотоелектричного демодулятора, на який подається частина оптичного променя, що пройшов крізь модулятор).

При цьому, вимірювана довжина буде визначатися виразом

$$L = \frac{c}{2F \cdot n_r} \cdot \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right) + \hat{P}, \quad (1.22)$$

де F – частота модуляції;

φ – фазовий зсув сигналів, що надходять на фазометр.

N – ціле число укладань довжини хвилі огинаючої на вимірюваній довжині.

Двохчастотний фазовий метод виміру довжини, так само як і модуляційні, можуть бути об'єднані в дві групи: з компенсаційним і безпосереднім виміром різниці фаз. Зупинимося на загальних особливостях, що властиві даному методу й створеним на його основі засобам вимірювань.

Великі успіхи, що досягнуті в квантовій електроніці, дозволили розробити й створити стабілізоване лазерне джерело випромінювання, яке стійко генерує дві частоти оптичного діапазону довжин хвиль.

На базі цього джерела випромінювання розроблений метод вимірювання та створені прецизійні далекоміри, які працюють за принципом двухчастотного інтерферометра. Цей метод виміру великих довжин оптимально поєднує високу точність, властиву інтерференційним методам вимірювання, з великою дальністю дії, малим часом вимірювання, а також помірних вимог до атмосферних умов, які характерні для лазерних модуляційних далекомірів.

На рис. 1.7 наведена спрощена структурна схема двохчастотного лазерного далекоміра з компенсаційним виміром різниці фаз.

Принцип його роботи полягає в наступному. Стабілізований двохчастотний (He-Ne) лазер 1 генерує оптичні електромагнітні коливання двох частот, які лежать у загальному контурі лазера ($\lambda \approx 0,63$ мкм). Інтервал частот між генеруємими коливаннями визначається числом « n » й « $n+1$ » напівхвиль цих коливань, що укладаються відносно довжини оптичного резонатора лазера, і, як правило, становлять ~ 500 МГц. Так як оптичний резонатор лазера є загальним для двох генеруючих коливань, то їхні фази жорстко зв'язані на дзеркалах цього резонатора. Оптичний промінь, що складається із цих двох коливань, напівпрозорим дзеркалом 2 ділиться на два промені – опорний і вимірювальний.

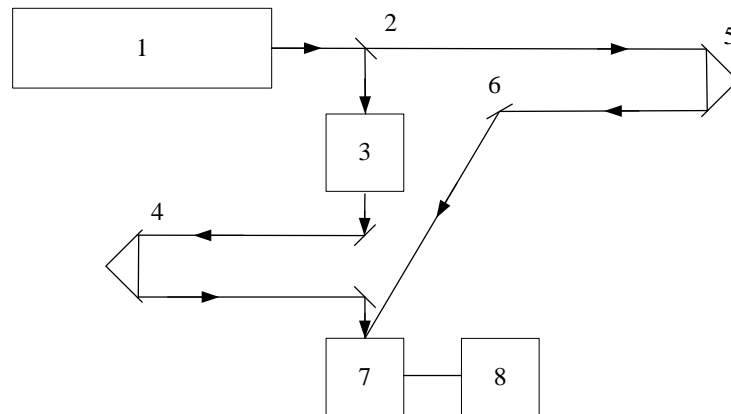


Рис. 1.7. Спрощена структурна схема двохчастотного лазерного далекоміра з компенсаційним виміром різниці фаз

Вимірювальний промінь направляєється уздовж вимірюваного базису, а опорний – в опорне плече двохчастотного далекоміра, що складає з вирівнювального оптичного атенюатора 3 й оптичної лінії затримки змінної довжини 4. Відбившись від розташованого на віддаленому кінці вимірюваного базису оптичного відбивача 5, вимірювальний промінь повертається й дзеркалом 6 поєднується із променем, що пройшов опорне плече двохчастотного далекоміра, на вхідному вікні фотоелектричного перетворювача 7. У випадку точного сполучення цих променів, при переміщенні оптичного відбивача 5 або при зміні довжини оптичної лінії затримки 4 інтенсивність освітленості в точці сполучення

цих променів буде періодично змінюватися. Переміщення відбивача, яке відповідає одному періоду зміни інтенсивності, визначається періодом сумарної інтерференційної картини, що утвориться в результаті суперпозиції інтерференційних картин від кожної частотної складової сполучених двохчастотних променів, і визначається виразом

$$L = c / (2\bar{n}_r F),$$

де F – різниця частот, генеруємих лазером коливань.

Однак візуальна реєстрація інтерференційних мінімумів (максимумів) сумарної інтерференційної картини надзвичайно ускладнена.

Для відділення корисної частини оптичного сигналу, що створює інтерференційні мінімуми (максимуми), від частини, яка створює «засвітку», рішення завдання точної індикації положення інтерференційних мінімумів виконує фотоелектричний перетворювач частот γ й індикатор «нуля» δ , що реєструє лише змінну складову електричного сигналу на виході фотоелектричного перетворювача частоти.

Такий спосіб індикації мінімумів сумарної інтерференційної картини також полегшує завдання сполучення оптичних пучків, не вимагаючи сполучення їхніх площин коливань, тому що остаточне додавання відбувається в результаті фотоелектронної емісії під впливом сумарного оптичного променя.

Фотоелектричний перетворювач частоти, як правило, являє собою фотоелектронний помножувач (ФЕП), у зоні фотокатода якого створене сильне змінне електричне поле із частотою, трохи відмінної від різниці частот, випромінюваних лазером оптичних коливань.

У такому фотоелектричному перетворювачі частоти відбувається подвійне перетворення частоти генеруючих лазером електромагнітних коливань і виробляється електричний сигнал низької частоти, що надходить на індикатор «нуля» δ . Оптична складова «засвітки» перетвориться в постійний струм і легко відфільтровується.

Дійсно, оптичні коливання на виході лазера можуть бути записані у вигляді

$$E_1 = E_1^S \cos(\omega_1 t + \varphi_1); \quad E_2 = E_2^S \cos(\omega_2 t + \varphi_2),$$

де ω_1 й ω_2 – циклічні частоти випромінюваних лазером оптичних коливань;
 φ_1 й φ_2 – фази випромінюваних коливань на виході лазера.

Струм емісії фотокатода ФЕП за рахунок оптичних пучків опорного й вимірювального каналів далекоміра описується наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned} i_1' &= I_{01}' + \left\{ I_1' + I_1' \cos \left[2\pi F \left(t + \frac{2L'}{c} \right) + \psi_1' \right] \right\}; \\ i_2' &= I_{02}' + \left\{ I_2' + I_2' \cos \left[2\pi F \left(t + \frac{2L\bar{n}_r}{c} \right) + \psi_2' \right] \right\}; \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

де i_1' – струм емісії фотокатода ФЕП за рахунок оптичного пучка опорного плеча далекоміра;

i_2' – струм емісії фотокатода ФЕП за рахунок світлового потоку оптичного пучка вимірювального плеча далекоміра;

$F = (\omega_2 - \omega_1)/2\pi$ – частота биттів між оптичними коливаннями, які генеруються двохчастотним лазером;

L' – довжина уведеної частини оптичної лінії затримки змінної довжини.

Величина $2L'/c$ являє собою час проходження оптичним сигналом уведеної частини оптичної лінії затримки, $2L\bar{n}_r/c$ – час проходження вимірювальним оптичним сигналом до віддаленого відбивача й назад, а $\varphi = \psi_2' - \psi_1'$ – фазове зрушення між струмами емісії фотокатода за рахунок різниці довжин оптичних шляхів опорного (при виведеній оптичній лінії затримки) і вимірювального променів усередині приладу.

1.4.2. Імпульсні методи вимірювання дальності

Завдяки лазерам, що здатні випромінювати світлові імпульси дуже високої потужності і малої тривалості, будувалися прецизійні оптичні далекоміри, які працюють за принципом радіодалекомірів, але на відміну від них мають високу

спрямованість і точність дії. Через мале кутове розходження променя лазера далекоміри застосовують разом з радіодалекомірами, оскільки вони мають деякі принципові переваги. Одна з них – велика перешкодостійкість, яку одержують внаслідок високої спрямованості і монохроматичності випромінювання. Для створення ефективних перешкод необхідно генерувати сигнал перешкоди, ідентичний по частоті робочого сигналу і орієнтований в тому ж напрямі. Далекомірний лазерний пристрій, може працювати при значно менших потужностях, ніж радіодалекомір, і визначати дальність та кутові розміри об'єкта з великою точністю. Припускають, що за допомогою оптичного далекоміра можна отримати велику деталізацію зображення, аж до описання контура об'єкту.

Функціональна схема далекоміра з оптоквантовим генератором (ОКГ), що працює в імпульсному режимі, показана на рис. 1.8. За допомогою ОКГ 6 і коліматорної оптичної системи 7 у напрямку до об'єкта, до якого вимірюється відстань, випромінюються потужні імпульси малої тривалості. Початок відліку часу для вимірювання дальності забезпечується запуском лічильника імпульсів 3, що виробляються генератором 1. Для цього служить фотодіод 8, який відбирає невелику частину зондуючого сигналу ОКГ.

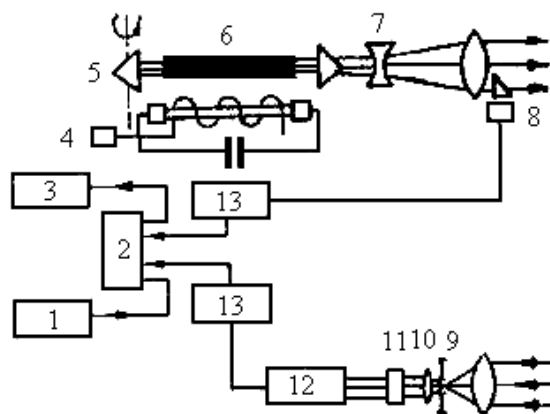


Рис.1.8. Функціональна схема далекоміра з ОКГ:

1 – генератор хронуючих імпульсів; 2 – стробуючий пристрій; 3 – лічильник імпульсів; 4 – тригер для запуску лампи накачування; 5 – призма, що обертається; 6 – кристал ОКГ (активна речовина); 7 – коліматорна оптична система; 8 – фотодіод; 9 – діафрагма; 10 – лінза; 11 – фільтр; 12 – фотопомножувач; 13 – підсилювач.

Струм фотодіода після підсилення поступає на стробуючий пристрій 2 з лічильником імпульсів.

Відбитий об'єктом імпульс оптичного випромінювання сприймається приймальним пристроєм, що складається з оптичної системи, фільтру 11, фотопомножувача 12 і підсилювача 13. Імпульс струму з виходу підсилювача поступає на стробуючий пристрій з лічильником імпульсів. Кількість хронуючих імпульсів, що пройшли через лічильник від моменту випромінювання імпульсу ОКГ до моменту прийому відбитого імпульсу, пропорційно дальності вимірювання. Особливість такого пристрою полягає в тому, що результат вимірювання дальності виходить безпосередньо після кожного вимірювання. Розглянемо рівняння, що визначає максимальну дальність дії оптичного далекоміра з ОКГ, працюючим в імпульсному режимі. Припустимо, що весь променевий потік, що випромінюється ОКГ, потрапляє на об'єкт (це припущення можна зробити у зв'язку з тим, що кут розбіжності променя малий, а відстань, що вимірюється, порівняно невелика). Якщо розміри об'єкту малі в порівнянні з відстанню між ним і далекоміром, то можна також припустити, що об'єкт перевипромінює падаючу енергію подібно точковому джерелу, а розсіяння від поверхні об'єкту відповідає закону Ламберта. При таких припущеннях енергія сигналу, що приймається буде визначатися як:

$$E_{np} = P_{np} t = \frac{P_i \rho t_i \cos \alpha \tau_a^2 S_{opt} \tau_{opt}}{\pi D^2} \quad (1.24)$$

де P_{np} – потужність прийнятого сигналу; P_i – пікова потужність випромінювання; t_i – тривалість імпульсу; ρ – коефіцієнт дифузного віддзеркалення об'єкту; α – кут між напрямом на об'єкт і нормаллю до його поверхні; τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери при односторонньому розповсюдженні випромінювання ОКГ; D – відстань до об'єкту (дальність); S_{opt} – площа об'єктиву оптичної системи приймача; τ_{opt} – коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Припустимо, що приймальний сигнал потрапляє на фотопомножувач. Тоді середнє число фотоелектронів, випромінюваних з катода фотопомножувача за час імпульсу буде:

$$\frac{1}{m_t} = \frac{\eta E_{np}}{h\nu} \quad (1.25)$$

де η – квантовий вихід; ν – центральна робоча частота.

Рівняння дальності для імпульсного лазерного далекоміра має вигляд:

$$D_{\max} = \tau_a \sqrt{\frac{P_i \rho \eta t_i \cos a S_{\text{онм}} \tau_{\text{онт}} \nu}{\pi (\overline{m_t})_{\min} h \nu}} \quad (1.26)$$

Рівняння (3.8) при фотонній границі може використовуватися, якщо вплив випромінення фону і темного струму незначне. На практиці, деяка частина фотоелектронів завжди з'являється за рахунок темного струму і випромінювання зовнішніх джерел (Сонця, Місяця, зірок, хмар, нагрітих тіл), що попадають в поле зору оптичної системи приймального пристрою і називаються фоном.

Випромінення фону є некогерентним і відрізняється широкосмуگیстю, що займає видиму та інфрачервону область електромагнітного спектру. Головним джерелом фонового випромінення вдень є випромінювання Сонця, що відбивається об'єктом та навколишніми його предметами. Величина енергії $E_{\text{пр.ф}}$, що сприймається приймальною частиною оптичного пристрою, залежить від його кола зору, характеристики середовища, навколо об'єкту та метрологічних умов.

Припустимо, що поле зору приймача обхватує частину протягнутого фронту, що має функцію розсіяння $F(\varphi, \psi)$, де φ – це кут між напрямленням падаючого випромінення і нормаллю до розсіюваної поверхні, а ψ – кут між віссю поля зору і нормаллю до цієї поверхні. Для спрощення підрахунку часто функцію $F(\varphi, \psi)$ приймають рівній одиниці.

Енергію прийнятого випромінювання фону можна визначити за формулою:

$$E_{\text{пр.ф}} = \frac{B_{\lambda\phi} \Delta\lambda_{\phi} t_i \rho_{\phi} S_{\text{онт}} \tau_{\text{онм}} \tau_a \Omega F(\varphi, \psi)}{\pi} \quad (1.27)$$

де $B_{\lambda\phi}$ – спектральне опромінювання поверхні фону, $Bm/m^2 \cdot \text{Å}$;

$\Delta\lambda_{\phi}$ – ширина смуги пропускання оптичного фільтру, Å ;

ρ_{ϕ} – коефіцієнт відбиття візуючої поверхні;

Ω – тілесний кут поля зору оптичної системи приймача, *стер*;

t_i – час спостереження, що рівне тривалості імпульса, сек;

Коефіцієнти пропускання в атмосфері τ_a і оптичної системи $\tau_{\text{опт}}$ прийняті однаковими для робочого сигналу і фонового випромінювання.

Середнє число фотоелектронів, створених випромінюванням фону, зареєстрованих за час t_i , визначається як:

$$m_\phi = \frac{E_{\text{пр.}\phi} \eta}{h\nu} = \frac{t_i B_{\lambda\phi} \rho_\phi \Delta\lambda_\phi S_{\text{опт}} \Omega \tau_a \tau_{\text{опт}} \eta F(\phi, \psi)}{\pi h\nu} \quad (1.28)$$

Постійна складова катодного струму фотопомножувача, обумовлена випромінюванням фону:

$$I_\phi = \frac{B_{\lambda\phi} \rho_\phi \Delta\lambda_\phi S_{\text{опт}} \Omega \tau_a \tau_{\text{опт}} \eta F(\phi, \psi) e}{\pi h\nu} \quad (1.29)$$

Розглянемо випадок, коли дальність дії оптичного далекоміра обмежується зворотнім розсіюванням променевого потоку в напрямку приймача. Зворотнє розсіювання має особливе значення при розподіленні випромінювання в тумані, коли частина випромінювання пропускається шаром атмосфери, а частина відбивачем в результаті розсіювання частинками туману.

На рис. 1.9 а) зображено світловий промінь випромінюваний передавачем і поле зору оптичної системи приймача. Вони не перекриваються в області, близької до далекомірної пристрою, але починаючи з деякої відстані D_0 від нього в полі зору приймача попадає променевий потік, який розсіюється частиною атмосфери (заштрихована ділянка). У випадку тумана однорідної густини сигнал, змінюється в залежності з відношенням D/D_0 так, як показано на рис. 1.9 б).

Сигнал, створений розсіюванням атмосфери в напрямку приймача, значно впливає на пороговий рівень приймача, отже, на максимальну дальність дії оптичного далекоміра. Тому розглядаючи залежність цього сигналу від дальності і параметрів, що характеризують густину туману. Можна вважати, що зворотнє розсіювання, тобто розсіяння в напрямку до джерела, є ізотропним і що світловий промінь, випромінюючий ОКГ, а також промінь, що розсіюється в напрямку відносно приймача, на великих відстанях перекривається. При цих умовах

променевий потік на відстані D від генератора, випромінюючого P_i , описується виразом:

$$P_D = P_i e^{-kD} = P_i * 10^{\frac{\sigma D}{10}} \quad (1.30)$$

де k – постійна, що характеризує природу туману;

σ – затухання променевого потоку в децибелах за одиницю довжини, що пов'язане з коефіцієнтом k співвідношенням $k = 0,043\sigma$.

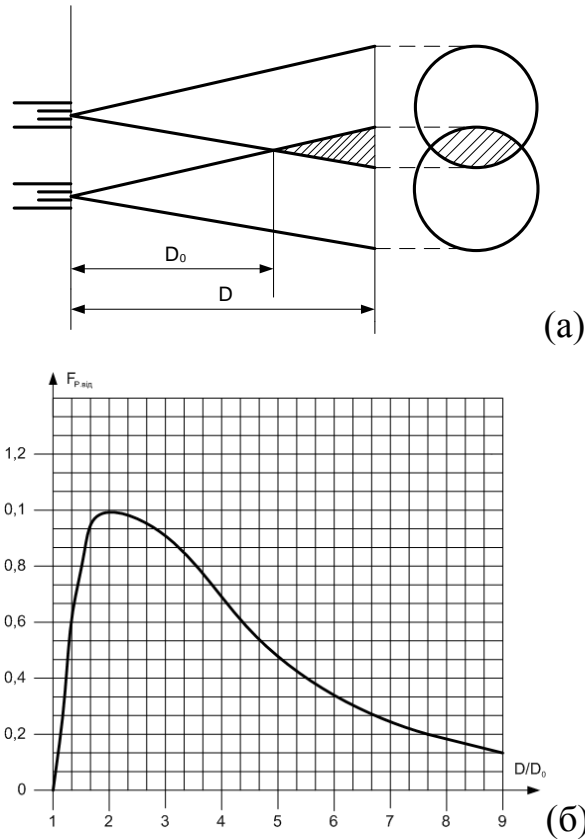


Рис. 1.9. Випромінюваний передавачем світловий промінь, поле зору оптичної системи приймача і величина сигналу, визваного зворотнім розсіюванням атмосфери

В напрямку відносно приймача розсіюється світловий промінь, створюючи в результаті відбиття від шару атмосфери товщиною ct_i . Величина променевого потоку, що розсіюється таким шаром на відстані D в напрямку приймача і попадаючий на оптичну систему з площею $S_{\text{опт}}$ вхідного дзеркала, визначається виразом:

$$P_{\text{п}} = \frac{kP_D ct_i S_{\text{опт}}}{4\pi D^2} = \frac{kct_i S_{\text{опт}}}{4\pi D^2} P_i * 10^{\frac{\sigma D}{10}} \quad (1.31)$$

При досягненні приймача, розсіяний атмосферний променевий потік послаблюється, так як відбите випромінювання проходить через шар туману товщиною D . Тому на вхід приймача попадає променевий потік:

$$P_{\text{п}} = P_i \frac{0.043act_i S_{\text{опт}}}{4\pi D^2} \cdot 10^{-\frac{2\sigma D}{10}} \quad (1.32)$$

Для σ можна прийняти наступну наближену залежність від оптичної дальності зору d :

$$\sigma \approx \frac{20}{d} \quad (1.33)$$

Тому в кінченому результаті отримуємо:

$$P_{\text{п}} = P_i \frac{0.86ct_i S_{\text{опт}}}{4\pi} \cdot \frac{1}{dD^2} \cdot 10^{-\frac{4D}{d}} \quad (1.34)$$

Перший множник у виразі (1.34) характеризує можливість далекоміра, а інший – виражає функцію дальності.

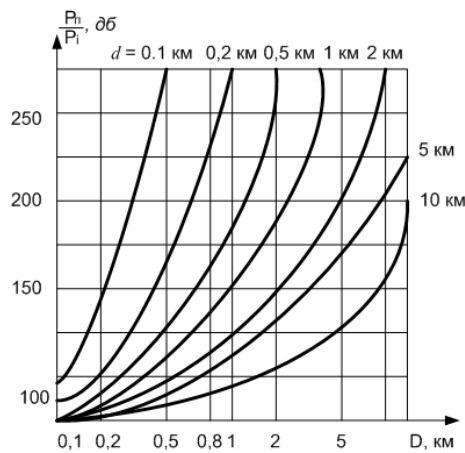


Рис. 1.10. Криві залежності відношення $\frac{P_{\text{п}}}{P_i}$ від дальності для різних значень визначення дальності

Розділ 2

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРІВ

Вступ до розділу

З появою лазерів, здатних випромінювати світлові імпульси дуже високої потужності і малої тривалості, вдалося побудувати прецизійні оптичні далекоміри, діючі за принципом радіодалекомірів, але відмінні від них високою спрямованістю і точністю дії. Через мале кутове розходження променя лазера далекоміри застосовують разом з радіодалекомірами, оскільки вони мають деякі принципові переваги. Одна з них – велика перешкодостійкість, що одержується внаслідок високої спрямованості і монохроматичності випромінювання. Для створення ефективних перешкод необхідно генерувати сигнал перешкоди, ідентичний по частоті робочого сигналу і орієнтований в тому ж напрямі.

Далекомірний лазерний пристрій, може працювати при значно менших потужностях, ніж радіодалекомір, і визначати дальність та кутові розміри об'єкта з великою точністю. Припускають, що за допомогою оптичного далекоміра можна отримати велику деталізацію зображення, аж до описання контура об'єкту.

Область застосування оптичних локаторів розвивається особливо успішно, що пояснюється в першу чергу тим, що особливість квантових генераторів як джерел випромінювання видимого і інфрачервоного діапазону роблять можливим найефективніше рішення ряду задач по управлінню і забезпеченню діяльності як повітряних, так і космічних кораблів.

<i>Кафедра авіоніки</i>				<i>НАУ 20 16 06 000 ПЗ</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Туз О.К.</i>			Принципи побудови та конструктивні особливості лазерних далекомірів	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Слободян О.П.</i>					33	116
<i>Консульт.</i>					33		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Левківський В.</i>				173 201 «Авіоніка»		
<i>Затверд.</i>	<i>Павлова С.В.</i>						

Застосування оптичних локаторів в навколосемному просторі пов'язано з обмеженнями, що вносяться поглинаючою дією атмосфери, хоча по роздільній здатності, перешкодостійкості і невеликим габаритам прийомо-передавальних пристроїв оптичні локатори перевершують аналогічні засоби.

2.1. Основні принципи оптичної локації

Оптична локація може проводитися з використанням некогерентних (прожекторних) і когерентних (лазерних) оптичних сигналів.

Прожекторна локація використовувалася в період першої і другої світових війнах. Відображені сигнали видимого діапазону спостерігалися візуально. Прожектори забезпечували велику енергетику випромінювання, проте його некогерентність знижувала можливості кутової концентрації. Прожектори інфрачервоного (ІЧ) діапазону використовуються в сучасних системах нічного бачення, що містять перетворювачі ІЧ прийнятих зображень у видимі.

Лазерна локація з'явилася на початку 60-х років в результаті створення джерел оптичного когерентного випромінювання лазерів. Лазерній локації властивий ряд важливих особливостей.

По-перше, когерентність і мала довжина хвилі випромінювання лазерів дозволили одержувати вузькі діаграми спрямованості (від одиниць до десятків кутових секунд) навіть при невеликих розмірах випромінювачів (одиниці дециметрів). При розходженні випромінювання, рівній одній кутовій секунді (при цьому $1'' \sim 5 \times 10^{-6} \text{ рад}$), поперечний розмір опромінюваної області на дальності 200 км складає 1 м, що дозволяє роздільно спостерігати окремі елементи цілі.

По-друге, часова і просторова когерентності випромінювання лазерів забезпечують стабільність частоти при високій спектральній густині їх потужності. Останнє, а також гостро направленість лазерного випромінювання обумовлює високу перешкодозахисну лазерних локаційних засобів від дії природних джерел випромінювання.

По-третє, висока частота коливань призводить до великих доплерівських зсувів частоти при взаємних переміщеннях цілі і локатора. Це забезпечує високу точність вимірювання радіальної швидкості елементів цілі, але вимагає розширення смуги приймальних пристроїв.

По-четверте, розповсюдження хвиль оптичного діапазону в газоподібних і рідких середовищах супроводжується їх значним розсіянням. Це призводить до атмосферних перешкод зворотного розсіяння на вході приймального пристрою і є, крім того, демаскуючим чинником.

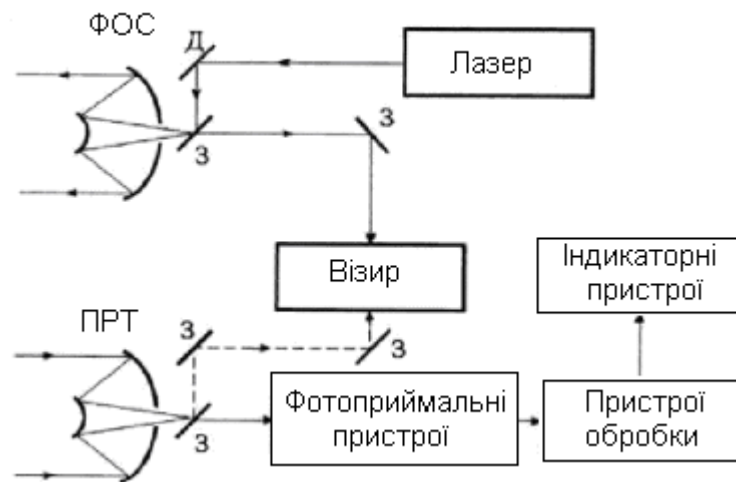


Рис. 2.1. Структурна схема і особливості побудови лазерного локатора

Основним елементом передаючого пристрою є лазер. Спектральна лінія випромінювання робочого тіла лазера визначає несучу частоту локатора.

В сучасній локації використовуються лазери:

- а) на двоокисі вуглецю CO_2 ;
- б) на іонах неодиму;
- в) на рубіні;
- г) на парах міді і др;
- д) напівпровідникові.

Газові CO_2 -лазери володіють високими середніми вихідними потужностями (до десятків кіловатів), високої монохроматичністю (ширина спектру декілька кілогерців), високим КПД (до 20%), працюють як в безперервному, так і в імпульсному режимі, компактні. Твердотільні неодимові і рубінові лазери

використовуються в основному в імпульсному режимі (частота повторення 0,1...100 Гц); енергія їх випромінювання в імпульсі до одиниць джоулів; кпд одиниці відсотків. Лазери на парах міді забезпечують високу частоту повторення (до десятків кілогерців) при середній потужності до 100 Вт.

Необхідний розподіл потоку зондуєчого (лазерного) випромінювання в просторі забезпечується формуючою оптичною системою (ФОС). В неї може входити система некерованих дзеркал (З), лінз і керованих дефлекторів (Д), забезпечуючих переміщення променя. Відображені від цілей лазерні сигнали концентруються приймальним телескопом (ПРТ) на фотоприймальних пристроях. Об'єднання передаючої і приймальні систем лазерних локаторів на відміну від РЛС використовується рідко через перевантаження фотоприймальних пристроїв і наростання рівня перешкод. Як передаюча, так і приймальна оптична система перспективних лазерних локаторів виконується в даний час в адаптивному варіанті для компенсації спотворень хвильових фронтів сигналів в атмосфері і середовищах лазерних генераторів.

У фотоприймальних пристроях лазерного локатора на відміну від РЛС практично не використовують посилення сигналів на несучій частоті. При цьому ускладнюється конструкція і затрудняє огляд простору. Використовується лише пряме посилення відеосигналів, а при гетеродинному прийомі - радіосигналів проміжної частоти. Відеочастотне посилення використовується переважно у видимому і ультрафіолетовому (УФ) діапазоні. Для цього діапазону є малощумні приймачі із зовнішнім фотоефектом (тобто з вибиванням електронів квантами оптичного випромінювання з фотокатода). Радіочастотне посилення використовується в ИЧ діапазоні, в якому зовнішній фотоефект не реалізується через недостатню енергію кванта випромінювання, зате гетеродинний прийом знижує значущість шумів внутрішнього фотоефекту.

Особливості гетеродинного прийому. До складу фотоприймального пристрою вводять лазерний гетеродин і змішувач у вигляді напівпрозорого дзеркала або світлорздільної призми. При цьому, у разі взаємної когерентності випромінювань лазерного гетеродина і передаючого пристрою, можлива

когерентна обробка сигналу, що приймається. Тому гетеродинний прийом використовується не тільки для придушення внутрішніх шумів в ИК діапазоні, але і для витягання інформації з фазової структури поля, що приймається, у видимому і УФ діапазоні.

Особливості інтерферометричного прийому. На вході фотоприймального пристрою підсумовують поля від двох або декількох просторово-рознесених точок (областей) площини приймальної апертури. За результатами інтерференції полів визначають їх взаємну когерентність і фазові співвідношення.

По набору вимірювань при різному рознесенні точок прийому можуть відновлювати просторовий розподіл амплітуди і фази поля, що приймається. Інтерферометричний прийом використовується за відсутності гетеродина для витягання інформації з фазової структури поля, що приймається, а також для збільшення кутового дозволу і синтезу апертури.

Області вживання лазерних локаторів:

- вимірювання дальності і кутових координат цілей кораблів, літаків, штучних супутників землі і т.д., що рухаються (лазерні далекоміри, локатори типу MCMS, PAIS і ін.);
- високоточні вимірювання швидкостей переміщення цілей і потоків рідин і газів (лазерні доплерівські вимірники швидкостей і анемометри);
- отримання некоординатної інформації про цілі: параметрів поверхні (шорсткості, кривизни), параметрів вібрації і руху навкруги центру мас, зображень і ін. (багатофункціональні лазерні локатори типу НО-98, Lotaws і ін.);
- високоточне наведення систем зброї (лазерні локатори підсвітла цілей, огляду простору і цілерозподілення);
- забезпечення стиковки космічних апаратів, посадки літаків, судноводіння (лазерні навігаційні системи);
- елементи технічного зору в автоматичних і роботизованих системах (системи вимірювання дальності, формування зображення, селекції і розпізнавання цілей і ін.);

- діагностика параметрів і вимірювання варіацій характеристик навколишнього середовища, включаючи атмосферу, а також контроль її забруднення продуктами господарської діяльності людини (радары типу DIAL і др.; Lidar - Light Detection And Ranging - виявлення світла і визначення дальності).

Напівактивна оптична локація використовує явище вторинного випромінювання (віддзеркалення) цілями оптичних хвиль від джерела природного інтенсивного первинного випромінювання. Частіше за все таким джерелом є Сонце. Засоби напівактивної локації, засновані на цьому принципі, називають оптико-електронними станціями. До засобів напівактивної оптичної локації можна віднести також біологічні зорові системи. Нехтуючи чинником використання вторинного випромінювання, оптико-електронні станції часто відносять до засобів пасивної оптичної локації.

Пасивна оптична локація використовує власне оптичне випромінювання нагрітих ділянок поверхні мети або іонізованих утворень в її околиці. Відомо, що максимум випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі T (по Кельвіну) доводиться на довжину хвилі $\lambda \sim 2898/T$ мкм. Довжина хвилі, на яку доводиться максимум випромінювання реальних цілей, звичайно знаходиться в інфрачервоній області спектру (лише при $T \sim 4000$ К максимум співпадає з червоною, а при $T \sim 5000$ К - з жовтою областю видимого спектру). Тому засоби пасивної оптичної локації звичайно працюють в ближньому ІЧ діапазоні. До подібних засобів відносять ІЧ пеленгатори, тепловізори, теплові головки самонаведення, пасивні прилади нічного бачення і ін. Вони грають важливу роль в системах попередження про ракетний напад і протиракетної оборони.

Загальні особливості оптичної локації визначаються діапазоном частот, що використовується. Висока спрямованість зондуючого випромінювання і вузькі поля зору приймальних каналів істотно обмежують можливості оптичних локаційних засобів по огляду простору. Тому пошук і виявлення цілі оптичними локаційними засобами здійснюються в більшості випадків з використанням зовнішнього цілевказування, для чого вони сполучаються з системами

радіолокації. В процесі прийому слабких сигналів виявляється квантова природа електромагнітних хвиль. Квантові шуми сигналу обмежують чутливість ідеального оптичного приймача у відсутність перешкод на рівні енергії хоча б одного фотона ($hf = (2,65 \dots 4,97) \times 10^{-19} \text{ Дж}$ для видимого діапазону). В оптичному діапазоні полегшується отримання некоординатної інформації про ціль, її розміри, форму, орієнтацію і т.д. При отриманні використовують поляризаційні і фотометричні характеристики розсіяного випромінювання, реєструють зображення цілі. Отримання некоординатної інформації часто є основною задачею оптичних локаційних засобів. Створення навмисних перешкод для оптичної локації можливе, але складніше, ніж для радіолокації.

Схема оптичного локатора, призначеного для вимірювання чотирьох основних параметрів об'єкту (дальності, азимута, кута, місця і швидкості) приведена на рис.2.2. Локатор складається з передаючого, приймального, індикаторного блоків і «блоку живлення».

Основне призначення передаючого блоку – генерація випромінювання, формування його в просторі, в часі і напрямі в район цілі. Передаючий блок складається з оптичного квантового генератора з джерелом збудження,

Q-модулятора, скандуючого пристрою і передаючої оптичної системи.

Оптичний квантовий генератор одержує енергію від джерела збудження імпульсно або безперервно генерує електромагнітну енергію оптичного діапазону. Q-модулятор призначений для управління тривалістю імпульсу, якщо генератор працює в імпульсному режимі.

Модулятор призначений для амплітудної модуляції потоку електромагнітної енергії на виході з оптичного генератора.

Передаюча оптична система формує кутовий розподіл випромінювання в необхідну діаграму спрямованості.

Призначенням скандуючого пристрою є розподіл випромінювання оптичного генератора в заданому секторі для опромінювання в ньому об'єкту.

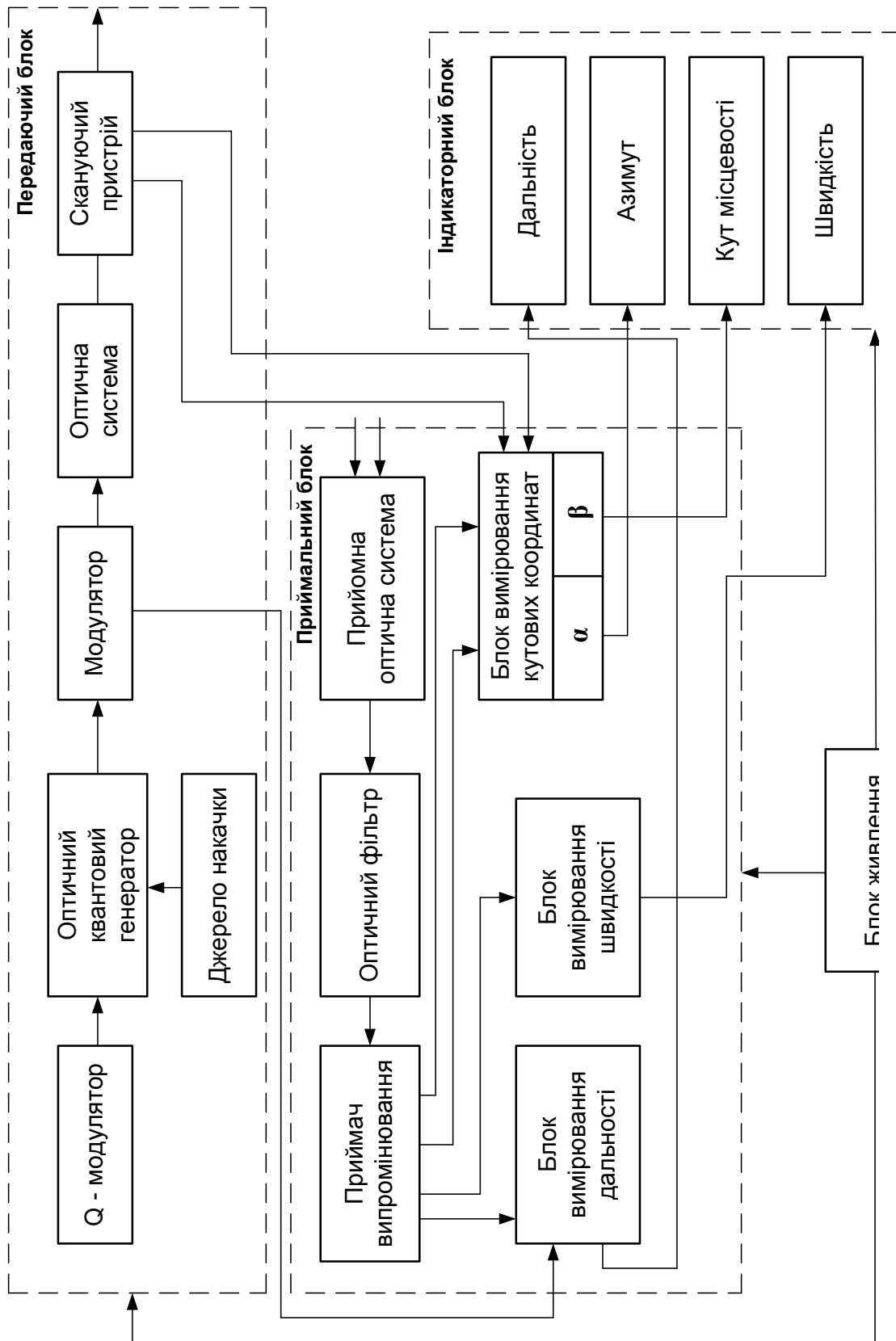


Рис. 2.2. Функціональна схема оптичного лазерного лоцатора

Основне призначення приймального блоку – прийом випромінювання, відображеного ціллю, трансформація його в електричний сигнал і обробку сигналу для виділення інформації про об'єкт.

В загальному вигляді ця інформація про об'єкт говорить про кутові координати, дальність і швидкість її. Для визначення кожного параметра об'єкту сигнал з приймача випромінювання поступає на відповідні блоки (цільове призначення ряду оптичних локаторів – вимірювання одного з цих параметрів.

Тоді він носить ще одну назву або далекоміра, або вимірника швидкості, зберігаючи загальну назву локатора). Сигнали з блоків дальності швидкості і кутових координат поступають на індикаторний блок, який видає ці дані на електронно-променеу трубку або у вигляді цифрової форми.

Якщо оптичний локатор працює в слідкуючій системі, то дані про ціль поступають в систему управління носієм, який стежить за ціллю.

Блок живлення забезпечує електроенергією всі три блоки. На схемі він показаний у вигляді одного блоку, проте конструктивно розташовує частин локатора, може бути таке, що об'єднання джерел живлення в одному блоці недоцільне.

Виявлення об'єкту представляє одну з найважливіших задач оптичної локації, яка передує виконанню інших задач, таких як вимірювання відносної швидкості.

В загальному вигляді для порівняння різних систем виявлення вводять певні кількісні характеристики якості цих систем. Характеристикою достовірності приймаемого рішення про наявність об'єкту в заданому районі є вірогідність пропуску її при огляді або пошуку. У зв'язку з тим, що випромінювання оптичних квантових генераторів зосереджено у вузькому голкоподібному пучку, очевидно, що використання оптичних квантових локаторів в режимі огляду недоцільне. Він може бути використаний тільки в режимі пошуку за даними ціленаведення. При відшуканні оптимальної програми пошуку звичайно приймають такі критерії, як мінімальний період і висока якість

пошуку, які визначаються в першу чергу діаграмою спрямованості оптичного локатора.

Для сканування променя оптичного локатора можна застосовувати як механічний, так і оптичний метод. При використанні першого методу оптичний генератор встановлюють на спеціальному скануючому механічному пристрої, який змінює просторове положення оптичної осі генератора так, що сканування відбувається по необхідному закону. Проте такий метод має крупний недолік, що обмежує його вживання, полягаючий в тому, що швидкість сканування обмежена, оскільки просторовий рух скоює пристрій, що має значну масу.

Найширше вживання в оптичних локаторах одержав метод оптичного сканування, для чого використовують відбивну або заломлюючу оптику.

2.2. Різновидності конструкцій оптичних далекомірів

Лазерний далекомір складається з передавача, приймача, синхронізатора, індикатора і пристрою обробки даних. Передавач містить ОКГ з рубіновим стержнем діаметром 10 і довжиною 37 мм, оптичний затвір і оптичну систему, що зменшує кутове розходження пучка з 9 мрад (31') до 0,3 мрад (1,14'). Приймач складається з оптичної частини (дзеркального телескопу діаметром дзеркала 200 мм, інтерференційного фільтра зі смугою пропускання 13 Å) і електричної частини (фотопомножувача з охолодженням і підсилювача). Оптична частина виконана у виді телескопічної трубки довжиною 250 мм, на вісі якої закріплені квантовий генератор та телескоп, призначений для пошуку цілі і наведення на її далекоміра. Сигнал, що знімається з навантаженого опору фотопомножувача, підсилюється двухкаскадним підсилювачем. Попередній підсилювач зібраний на транзисторах і має коефіцієнт підсилення по напрузі 100 і вихідний опір 200 Ом.

Дальність до цілі визначають за часом затримки відбитої частини випромінення генератора. Синхронізуючий імпульс отримується при вібірці незначної частини випромінення генератора. Для цього за колімаційною

оптичною системою поміщають під кутом до її осі проволочну сітку. Відбите від сітки випромінення збирається лінзою на фотокатод фотопомножувача. Після підсилення вихідний сигнал з фотопомножувача подається на індикатор для запуску розгорток і на підсилювач вертикального нахилу другого променю.

Активним елементом квантового генератора є рубіновий стержень довжиною 76 і діаметром 6,35 мм, що розташовується на одній із фокальних осей електрооптичного відбивача. На іншій осі знаходиться імпульсна лампа накачки. Оптичний затвор виконаний у виді призми, що обертається зі швидкістю 15 000 об/хв. При модуляції добротності оптичного генератора в ОКГ встановлюється в режим генерації потужних імпульсів тривалістю 40 нсек. Ширина спектральної лінії випромінення складає $0,1 \text{ \AA}$, робоча довжина хвилі $0,6943 \text{ мкм}$ і потужність в імпульсі 4 МВт .

Функціональна схема далекоміра зображена на рис. 2.3.

Енергія випромінення в виді імпульсу виникає в момент, коли грань обертаючої призми стає паралельно частково напівпрозорому дзеркалу оптичного резонатора. Більша частина випромінення ОКГ відводиться через призму до фотодіоду, вихідний сигнал якого підсилюється і поступає на стробуючий каскад, відкриваючи його.

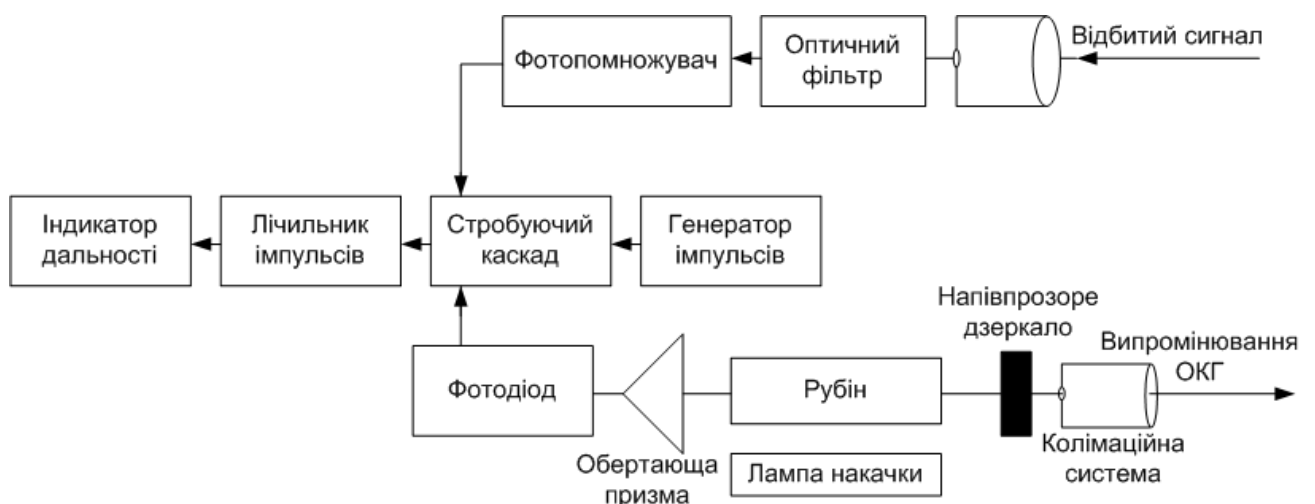


Рис. 2.3. Функціональна схема оптичного далекоміра з ОКГ на рубіні

Стробуючий каскад закривається імпульсом, відбитий об'єктом, до якого вимірюється дальність. Відбитий сигнал сприймається оптичною системою і через фільтр подається на фотокатод ФЕУ. Оптичний фільтр, що має смугу пропускання 20Å і прозорість 65%, служить для границі власного випромінення фону. Відлік дальності проводиться лічильником імпульсів, які виробляються генератором імпульсів з частотою 30 МГц . Генератор підключений до стробуючого каскаду.

Конструкція оптичного далекоміра з напівпровідниковим лазером, що працює на довжині хвилі $0,840\text{--}0,900\text{ мк}$ має деякі переваги від інших далекомірів. Це незначна вага; високий ККД; хороша працездатність при стабільній температурі; можливість безпосередньої модуляції короткими імпульсами або високочастотними коливаннями. Але недолік основний в напівпровідниковому лазері – мала пікова потужність (в межах $10\text{--}100\text{ Вт}$), що забезпечує вимірювання дальності значно менших відстаней.

Функціональна схема далекоміра з напівпровідниковим лазером представлена на рис. 2.4.

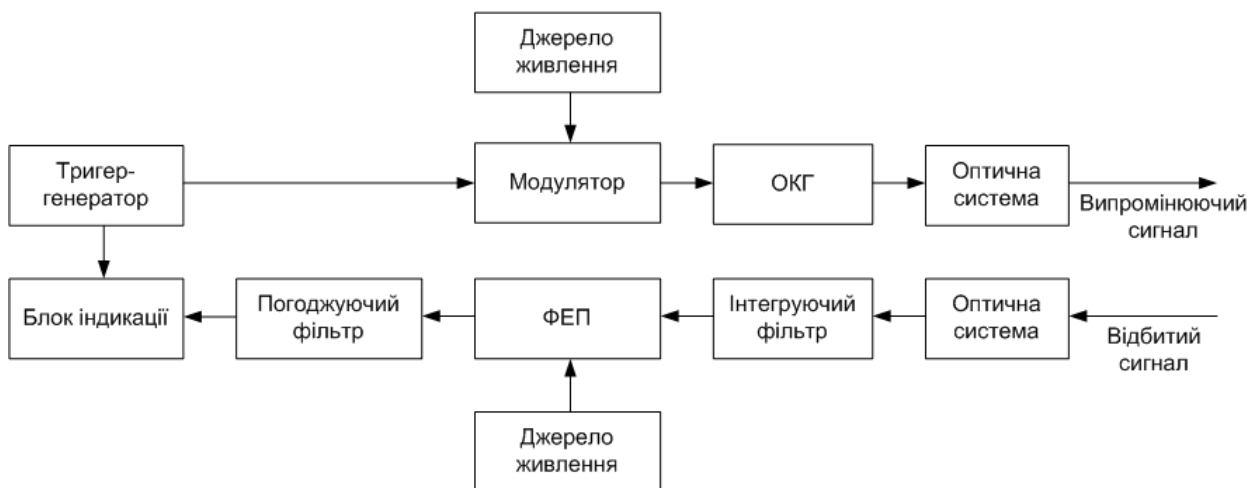


Рис. 2.4. Функціональна схема далекоміра з напівпровідниковим ОКГ

Основним елементом є напівпровідниковий ОКГ, поміщений в посуд Дюара і працюючий при температурі 77°K . ОКГ збуджується імпульсами струму амплітудою 40 а , тривалістю 100 нсек и частотою повторювання 330 Гц ,

генеруюча пікова потужність складає 9 Вт , робоча довжина хвилі випромінення $\lambda = 0,844 \text{ мкм}$

Імпульси струму збудження формуються модулятором, що виконаний на штучній лінії з зосередженими параметрами. Схема модулятора зображена на рис. 2.5. Лінія затримки представляє собою 5-звенову LC-контур з характеристичним опором 4 Ом ; в якості розрядного ключа застосовують р-п-р-п- транзистор T . Послідовно з лінією і напівпровідниковим діодом D включений для погодження резистор R_2 опором 4 Ом .

Випромінення ОКГ проходить через скляне вікно в сосуді Дюара і колімується об'єктивом діаметром 45 мм і фокусною відстанню 90 мм . Об'єktiv формує пучок з кутовою шириною $0,4 \times 0,8 \text{ мрад}$; тілесний кут розходження пучка $3,2 \times 10^{-7} \text{ степен}$. В приймальній оптичній системі використовується об'єktiv діаметром 140 мм і фокусною відстанню 508 мм . Для зменшення впливу випромінення фону є інтерференційний фільтр з смугою пропускання 76 Å на довжині хвилі $0,844 \text{ мкм}$; коефіцієнт пропускання в центрі смуги дорівнює $0,42$ при $+21^\circ\text{C}$ і $0,31$ при $-17,6^\circ\text{C}$.

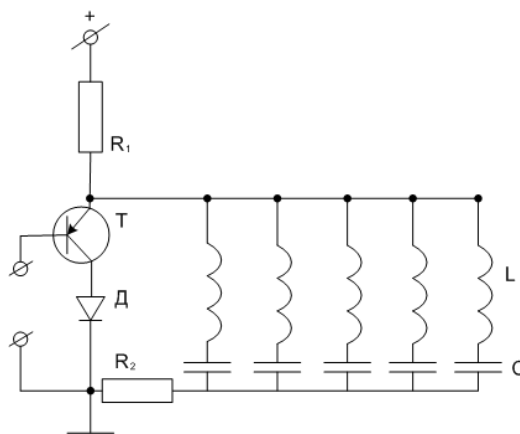


Рис. 2.5. Схема модулятора оптичного далекоміра

Однією з проблем, що виникає при розробці далекомірів з напівпровідниковим ОКГ, є створення генератора коротких імпульсів для модуляції випромінювання діода. Вихідний опір генератора повинен бути погоджений з дуже низьким ($0,1 \text{ Ом}$) опором діода.

В імпульсному генераторі застосовується RC-схема, що перемикається тригерною лампою з холодним катодом (рис. 2.6). В якості елемента накопичення в генераторі імпульсів застосовується малоіндуктивна ємність, заряджається через великий опір до напруги 3,6 кВ. Ємність розряджається через діод, з'єднаний з генератором коаксіальною лінією 5 з хвильовим опором 1 Ом. Генератор 3 закріплений на кришці сосуда Дюара 7. Через кришку сосуда пропускається коаксіальна лінія 8 з хвильовим опором 50 Ом. Приймальна частина далекоміра складається з параболічного відбивача 1 з фокусною відстанню 66 см, фото-помножувача 2, розташованого в його фокусі, і широкосмугового підсилювача. Чутливість фотопомножувача 400 мкА/Вт, час оновлення 2 нсек.

Останнім часом розробка потужних напівпровідникових ОКГ дала можливість їх застосування для вимірювання дальності значно далі. Функціональна схема оптичного далекоміра з потужним напівпровідниковим ОКГ на арсеніді галію представлено на рис. 2.6.

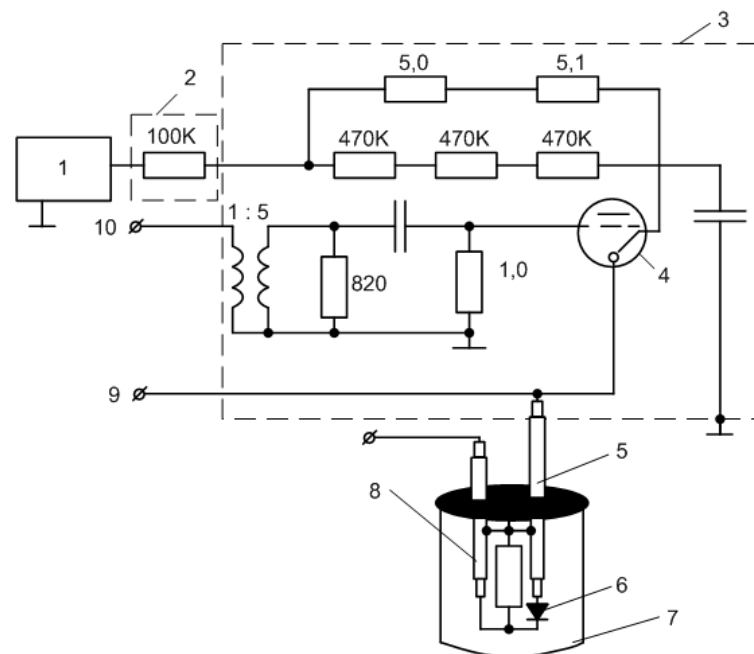


Рис. 2.6. Схема передавальної частини далекоміра з напівпровідниковим ОКГ

1 – Джерело живлення (6 кВ, 100мА); 2 – генератор розвязки; 3 – генератор імпульсів у мідному екрані; 4 – підпалюючий електрод; 5 – коаксіальна лінія; 6 – арсенід галія; 7 – сосуд Дюара; 8 – вимірювальна коаксіальна лінія; вхід сигналу звукової модуляції; 10 – імпульсні сигнали (амплітуда 50 В, тривалість 10 мкс, частота 50 Гц)

Джерелом випромінювання є потужний напівпровідниковий ОКГ на арсеніді галія (рис. 2.7), з параметрами: вихідна потужність – 100 Вт; робочий струм – 600 А; площа випромінення – 3x500 мк; кутове розходження випромінення – 20x20 град; частота повторення імпульсів – 1000 імн/сек; ККД – 15%. Діод містить радіатор, що забезпечує рівномірний розподіл струму, і зовнішнє дзеркало для відбиття випромінення від одного з кінців переходу. Спектральна ширина випромінення лежить в межах 10 - 20 Å; переміщення довжини хвилі при зміні температури складає біля 1,75 Å/град. За допомогою колімаційної лінзи кут розходження випромінення $\Omega_{\text{кол}}$ зменшується до 2 мрад:

$$\Omega_{\text{кол}} = l/f$$

де l – ширина випромінюючої площини (p-n-переходу); f – фокусна відстань колімаційної лінзи.

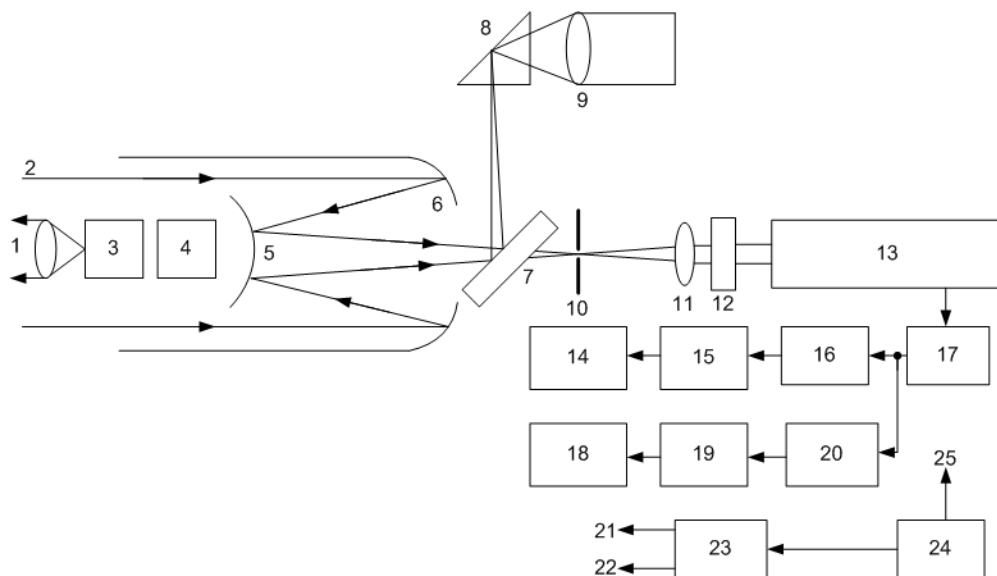


Рис. 2.7. Функціональна схема оптичного далекоміра з потужним напівпровідниковим ОКГ

1 – колімаційне випромінення ОКГ; 2 – відбите від об'єкта випромінення; 3 – напівпровідниковий ОКГ; 4 – модулятор; 5 – вторинне дзеркало приймальної оптичної системи; 6 – первинне дзеркало; 7 – напівпрозоре дзеркало; 8 – призма; 9 – оптичний візир; 10 – діафрагма; 11 – лінза; 12 – вузькосмуговий фільтр; 13 – ФЕП; 14 – індикатор дальності; 15 – цифровий обчислювач; 16 – порогова схема; 17 – предпідсилувач; 18 – індикатор дальності; 19 – аналоговий обчислювач; 20 – порогова схема; 21 – до ФЕП; 22 – до модулятора; 23 – перетворювач напруги; 24 – джерело живлення; 25 – до електронної схеми.

Накачка ОКГ здійснюється малогабаритним імпульсним генератором приведенного на рис. 2.8. Принцип дії заключається в зарядженні конденсатора до відповідної напруги з подальшим його розрядом на діод через лампу з холодним катодом. Внутрішній опір діода $0,2 \text{ Ом}$. Послідовно з'єднаний з ним резистор служить для контролю параметрів імпульсу за допомогою індикаторів відображення. Цей резистор складається з десяти резисторів, що з'єднані паралельно для зменшення власної індуктивності.

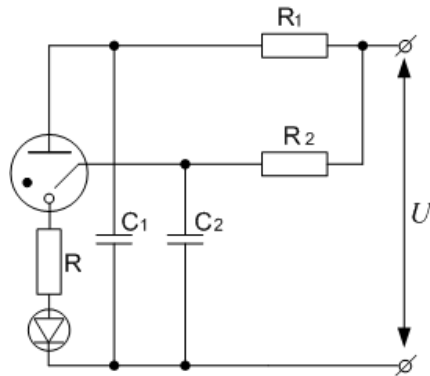


Рис. 2.8. Схема малогабаритного імпульсного генератора накачки ОКГ

Енергія накопичується на конденсаторі C_1 . Якщо $R_1 C_1 \ll R_2 C_2$, частота послідовності імпульсів визначається постійною часу $\tau = R_2 C_2$. Зміна напруги U впливає на амплітуду імпульсів струму і частоту повторювання імпульсів. Діод на арсеніді галія і колімаційна лінза виконана в одному латунному корпусі, розташовані перед вторинним дзеркалом приймача (рис.3.10).

Для приймання відбитого оптичного випромінення служить дзеркальна оптична система з фокусною відстанню 500 мм і площею апертури 100 см^2 . Випромінення фокусується на діафрагму діаметром $2,5 \text{ мм}$ і направляється далі на сферичну лінзу, за допомогою якої на інтерференційний вузькосмуговий фільтр падає пучок паралельних променів. Фокусна відстань лінзи 20 мм ; ширина смуги пропускання фільтру 100 \AA ; коефіцієнт пропускання при довжині хвилі $0,902 \text{ мкм}$ складає 60% .

За спектральним фільтром знаходиться фотопомножувач з фотокатодом типу S-1. Квантова ефективність фотокатоду на довжині хвилі $0,902 \text{ мкм}$ дорівнює $3 \cdot 10^{-3}$. Фотопомножувач поміщений в металевий корпус разом з дільником

напруги, інтерференційним фільтром, лінзою, діафрагмою і напівпрозорим дзеркалом, що необхідне для роботи оптичного візиря. Дзеркало має високий коефіцієнт пропускання в інфрачервоній області спектра і великий коефіцієнт відбиття у видимій частині спектра.

Відеопідсилювач на виході фотопомножувача має три каскаду на транзисторах з коефіцієнтом підсилення 55 дБ при ширині смуги пропускання 40 МГц . Підсилений сигнал з фотопомножувача подається на цифровий та аналоговий обчислювачі. Цифровий обчислювач видає сигнал на цифровий індикатор, який вираховує дальність через кожну секунду. Показання на цифровому табло запам'ятовуються до наступної зміни дальності, що необхідно для визначення дальності до нерухомих або до рухомих об'єктів.

Аналоговий обчислювач безперервно вимірює дальність, яка фіксується на індикаторі по відхиленню стрілки приладу за допомогою самописців. Функціональна схема аналогового обчислювача зображена на рис. 2.9.

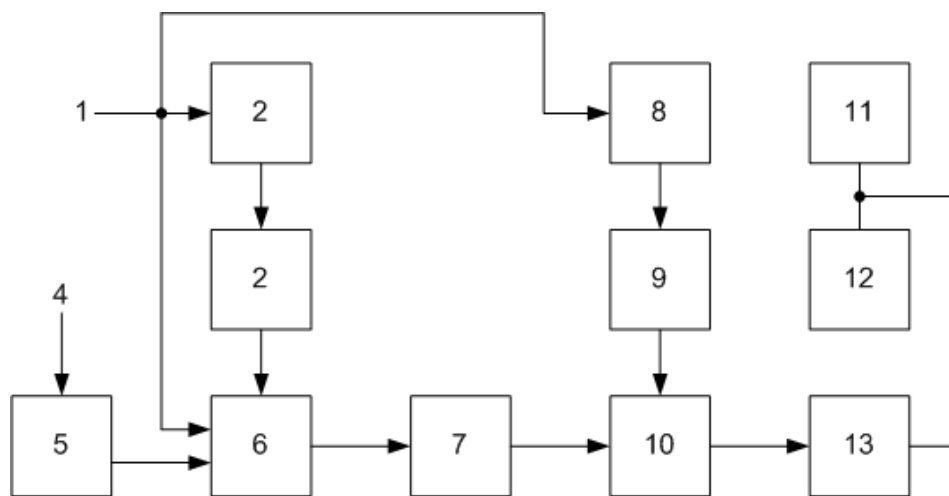


Рис. 2.9. Функціональна схема аналогового обчислювача далекоміра

Пусковий імпульс 1 формується за допомогою зміни напруги на інжекційному діоді, а стоповий імпульс 4 – сигналом з фотопомножувача, якщо він не перевищує рівень, раніш встановленого пороговою схемою 5. Пусковий і стоповий імпульси подаються на бістабільний мультівібратор 6, перетворюючий обидва імпульси в один імпульс, тривалість t якого рівна часовому інтервалу між пусковим і стоповим імпульсами. Прямокутний імпульс тривалістю t подається

через підсилювач 7 на інтегруючу RC -ланцюг 10. Постійна часу цього ланцюга велика по відношенню з інтервалом часу t , тому можна враховувати, що напруга на конденсаторі лінійно зростає з збільшенням тривалості імпульсу. З інтегруючого ланцюга напруга подається на підсилювач 13 з високоомним входом і далі – до стрілочного індикатора 11 або самописця 12.

Якщо проміжок часу між двома сусідніми пусковими імпульсами менше постійної часу приладу, здійснюється усереднення імпульсів. Перед новою послідовністю пускового і стопового імпульсів конденсатор повністю розряджається за допомогою двох мультивібраторів 8, 9 і перемикаючого транзистора. Якщо амплітуда відбитого сигналу нижче встановленого рівня, мультивібратори 2 і 3 встановлюють мультивібратор 6 в первинний стан.

Функціональна схема цифрового обчислювача приведено на рис. 2.10.

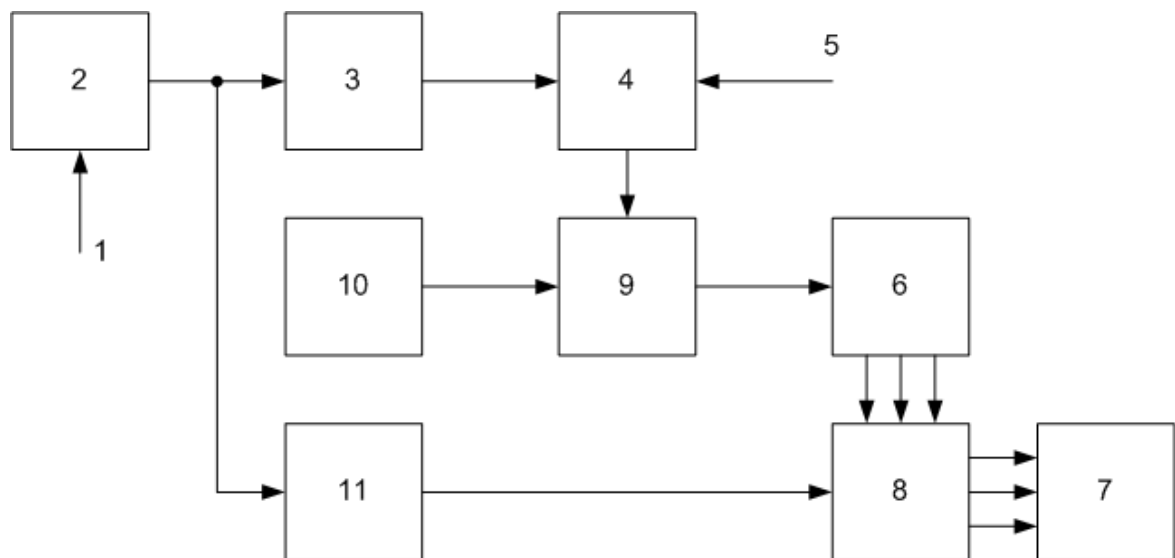


Рис. 2.10. Функціональна схема цифрового обчислювача далекоміра

Пусковий імпульс 1 через Порогова схема 2 поступає разом із Стоповий імпульс 5 на Бістабільний мультивібратор 4. На виході мультивібратора створюється прямокутний імпульс, тривалість якого пропорційна вимірювальній відстані до об'єкта. Цей імпульс відкриває Схема співпадіння 9, на котру подається напруга частотою 15 МГц, що виробляється Кварцовий генератор з кварцовою стабілізацією (частота 15 МГц відповідає вирішальній спроможності по дальності 10 м). Імпульси хронуючого генератора вимірюються Трьохкаскадна

схема обчислення 6, на виході якої є Дешифратор 8 з електромагнітним реле. Вимірювальна дальність відраховується по Цифровий індикатор 7. При включенні обчислювача лічильник автоматично встановлюється на нуль Схема скидання на нуль 11. Імпульс для запуску схеми повернення можна подати також вручну.

Максимальна затримка строга дальності забезпечується Мультивібратор 3, який вмикається пусковим імпульсом і виробляє затриманий імпульс тривалістю 6 мкс, відповідний відстані 914 м. Цим імпульсом перемикається мультивібратор 4 при відсутності відбитого від цілі сигналу.

При теоретичному підрахунку максимальної дальності дії D_{\max} далекоміра коефіцієнт пропускання атмосфери визначається за формулою (2.1):

$$\tau_a = e^{-\sigma D_{\max}} \quad (2.1)$$

де σ – коефіцієнт затухання на одиницю довжини шляху променя ОКГ.

Залежність коефіцієнта σ від візуальної дальності видимості d приведено на рис. 2.11. Для отримання високої точності вимірювання дальності в оптичних далекомірах почали застосовувати газові ОКГ, що працюють в безперервному режимі, і метод порівняння фаз високочастотних сигналів. При вимірюванні дальності з помилкою, що не перевищує 5 м, необхідна часова спроможність менше 20 нс, тобто граничним для систем, що працюють в імпульсному режимі.

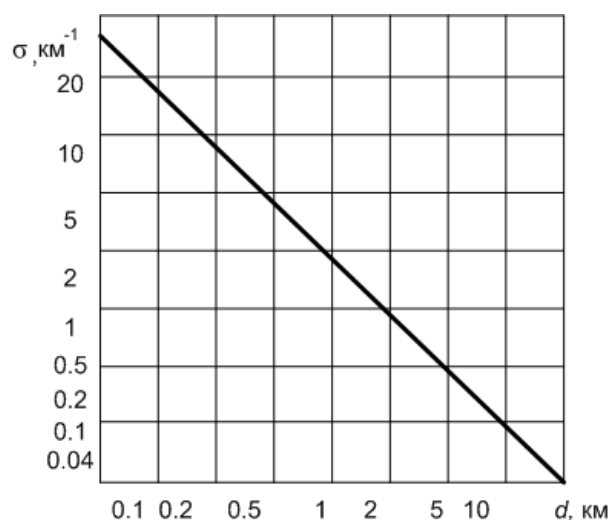


Рис. 2.11. Графік залежності коефіцієнта залежності затухання випромінювання в атмосфері від візуальної дальності видимості ($\lambda = 0,9$ мкм)

Недолік фазового методу, пов'язаний з неоднозначністю вимірювання дальності, легко уборонити, виміряв фазові співвідношення одночасно для декількох частот. В цьому випадку неоднозначність виключається, якщо для кожної частоти відомий зсув фази за час розповсюдження сигналу до цілі і назад. У випадку рухомих цілей в розрахунках необхідно враховувати ефект Доплера.

Якщо зсув фаз між передавальним і приймальним сигналами дорівнює нулю, то на дальності D вкладається ціле число півхвиль. Ця умова математично виражається слідуючою формулою (2.2):

$$D = \frac{n\lambda}{2} = \frac{nc}{2f} \quad (2.2)$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$.

Для двох частот, що задовольняють умову (2.2), можна записати:

$$D = \frac{n_1 c}{2f_1}; D = \frac{n_2 c}{2f_2},$$

На основі отриманих виразів маємо:

$$D = \frac{mc}{2(f_2 - f_1)} = \frac{mc}{2\Delta f} \quad (2.3)$$

де m – число інтервалів між нульовими фазами при неперервній зміні частоти від f_1 до f_2 .

Якщо Δf підтримувати постійною, то величина m буде пропорційна дальності. Практично необхідно обчислювати не величину m , а число N нулів фаз при зміні частоти від f_1 до f_2 , причому $m = N + 1$.

Щоб виміряти дальність з великою точністю, необхідно, крім цілого числа інтервалів між нульовими фазами, виміряти також дробні частини цих інтервалів (дробні нулі). Якщо величина помилки повинна бути 1 м на дальності 10 км при $\Delta f = 10$ МГц, величину m необхідно вимірювати з точністю 1/32 частини інтервалу між нулями фаз. Для вимірювання дробних нулів необхідно частотну модуляцію сигналу виконати по окремому закону.

Розглянемо схему оптичного далекоміра, що працює в безперервному режимі випромінення приведено на рис. 2.12. Джерелом випромінення є гелій-неоновий ОКГ 7 потужністю 50 МВт, працюючий на довжині хвилі $\lambda = 0,6328$

мкм. Вихідний сигнал ОКГ після проходження через електрооптичний модулятор 8 і оптичну систему 3 випромінюється у напрямку до об'єкта. Ширина пучка дорівнює 1 мрад . Відбитий від об'єкта сигнал проходить через фільтр 4 з смугою пропускання 10 \AA , що зрізує випромінювання фону, і направляється в ПЛЭ – ФЕП 6 з фотокатодом S-20. Вихідний сигнал з ФЕП поступає до схеми вимірювання дальності.

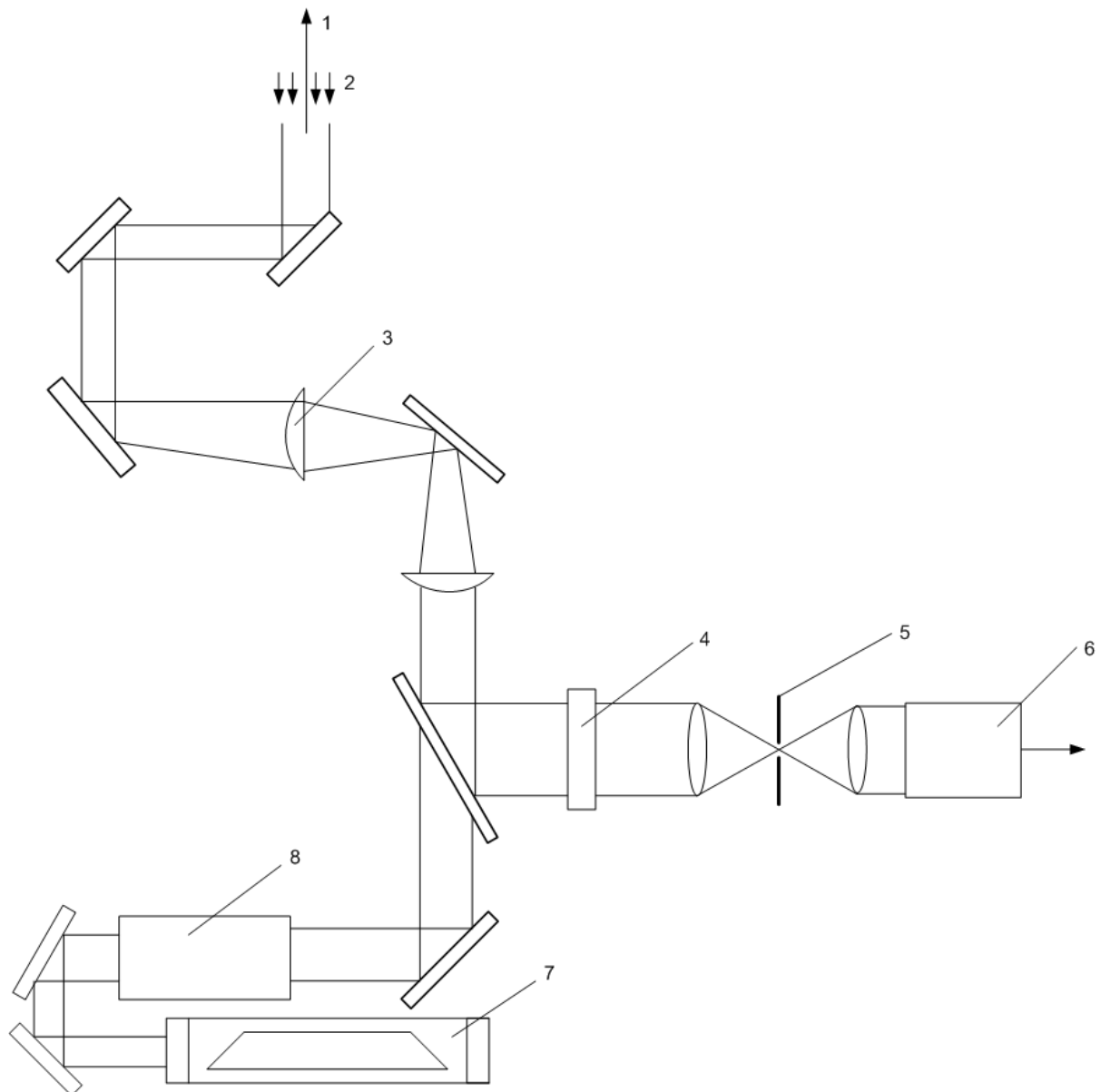


Рис. 2.12. Оптична схема далекоміра з ОКГ, що працює в режимі безперервного випромінювання:

1 – випромінювальний сигнал; 2 – проходячий сигнал; 3 – об'єктив; 4 – оптичний фільтр; 5 – діафрагма; 6 – ФЕП; 7 – напівпровідниковий ОКГ; 8 – електрооптичний модулятор.

Випромінення ОКГ модулюється електрооптичним модулятором, що складається з двох кристалів ADP діаметром 12,7 мм, до яких прикладено модулюючу напругу від генератора розкачки частоти. Розкачка частоти здійснюється механічним способом за допомогою електродвигуна, що повертає ротор конденсатора. Форма ротора дозволяє отримати трикутний закон зміни частоти (рис. 2.13).

Діапазон розкачки частоти $\Delta f = 9,369$ МГц і вибраний так, що множник $\frac{c}{2\Delta f} = 16$ м.

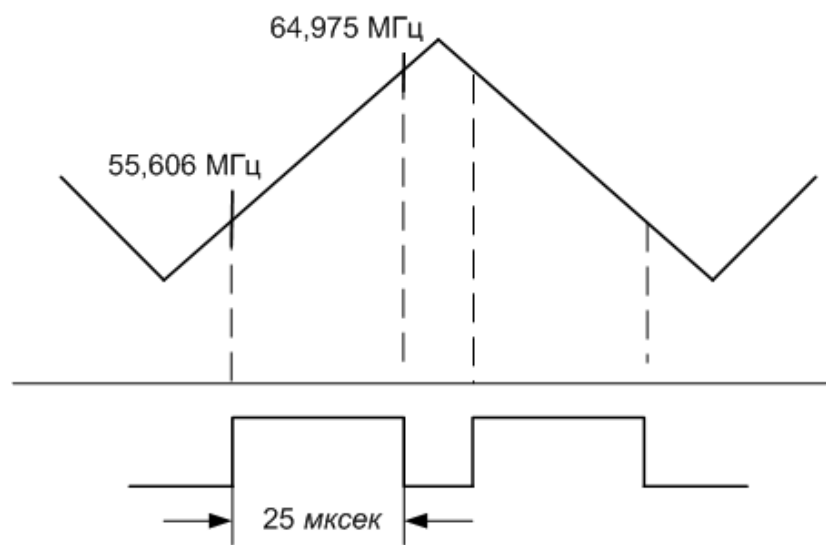


Рис. 2.13. Закон частотної модуляції і форма головного стробуючого імпульсу підрахунку

Головний стробуючий імпульс підрахунку запускається і гаситься сигналами, що отримуються в баланській мостовій схемі, в якій використані кристали кварцу 2 і 5 з частотами 64,975 і 55,606 МГц відповідно. Схема збалансована для всіх частот, крім частот слідування відміток (рис. 2.14).

Сигнал із змінною частотою, що знімається з ФЕП, підводиться до підсилювача з центральною частотою підсилення 60 МГц і потім подається до фазового детектора з робочою смугою також в області 60 МГц. На фазовий детектор одночасно поступає опорний сигнал, в якості якого використовується ослаблений сигнал від генератора розкачки частоти. Імпульси на виході фазового

детектора, що відповідають нулям фази, підсилюються і вводяться в обчислювальний пристрій.

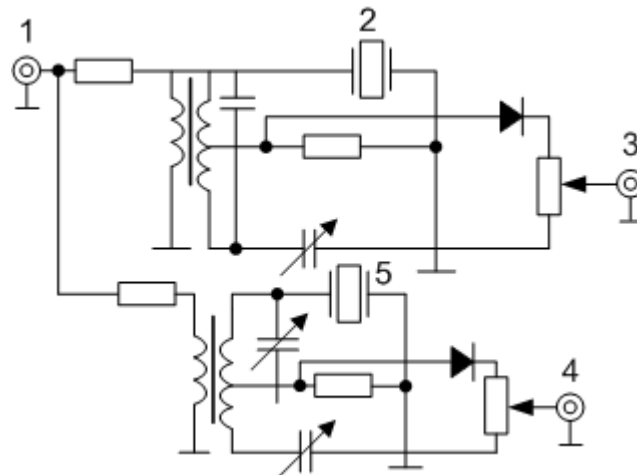


Рис. 2.14. Схема генератора контрольних сигналів (частотних відміток):

1 – сигнал від генератора розкачування частоти; 2 і 5 – кристали кварцу; 3 – сигнал частоти 55,606 МГц; 4 – сигнал частоти 64,975 МГц

Ефект доплерівської частоти, який міг би виявлятися джерелом помилок при вимірюванні дальності, виключається усередненням значень дальності, виміряних на ділянках підвищення і зменшення частоти розкачки. Величини доплерівського зсуву частоти на цих ділянках рівні, але різні по знаку, тому при усередненні результатів вимірювання доплерівський зсув виключається.

По декілька іншій схемі виконаний оптичний далекомір, працюючий разом з перевідбивачем, встановленим на об'єкті. В умовах денного освітлення при незамкненій атмосфері за допомогою газового He-Ne ОКГ потужність 100 Мвт та розходженням променя 1,5 мкрад можна отримати достатній по потужності відбиваючий сигнал від перевідбивача площею 10 см², віддаленого на відстань 30 км.

Система визначення дальності працює у цифровому режимі і видає данні з частотою вибірки 200 1/сек. Джерелом випромінювання у системі є He-Ne ОКГ з довжиною хвилі 0,6328 мк. Плоскополяризоване випромінювання ОКГ модулюється прямокутною хвилею, період якої визначається часом

розповсюдження випромінювання до об'єкту і назад. Вимірюючи частоту модуляції, можна знайти дальність до об'єкту.

Функціональна схема далекоміра показана на рис. 2.15. В момент часу $t = 0$ включається модулятор 2. Через проміжок часу $t_1 = \frac{2D}{c}$, відбиваючий сигнал поступає на ПЛЕ 4, а потім через час затримки t_0 передній фронт відбиваючого сигналу запускає тригер 12, який включає модулятор. З моменту виключення модулятора до моменту часу $t_2 = 2\left(\frac{2D}{c} + t_0\right)$ відбиваюче випромінювання попадає на ПЛЕ. В кінці цього періоду знову включається модулятор і описаний процес повторюється.

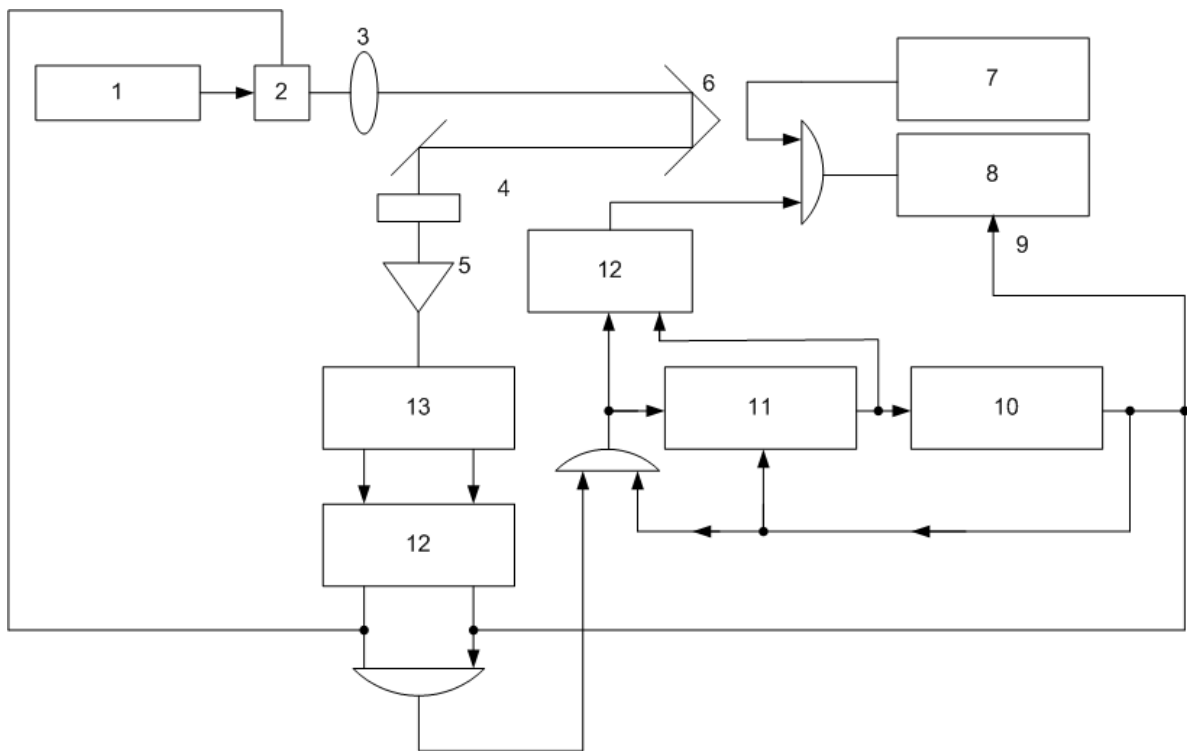


Рис. 2.15. Функціональна схема далекоміра

1 – ОКГ; 2 – модулятор; 3 – лінза; 4 – ПЛЕ; 5 – предпідсилювач; 6 – перевідбивач;
7 – генератор імпульсів; 8 – лічильник дальності; 9 – імпульс скидання; 10 – мультивібратор;
11 – бінарний лічильник; 12 – тригер; 13 – схема формування

Тривалість відбиваючого сигналу вимірюється по кількості імпульсів, що виробляються зовнішнім стабільним генератором імпульсів – електронним годинником 7, що працює на частоті 10 МГц. Електронний годинник запускається

переднім фронтом працюючого сигналу, а зупиняється заднім фронтом. Кількість імпульсів, пропорційна дальності до об'єкту, підраховується лічильником дальності.

Дальність до цілі в системі що розглядається визначається наступними рівняннями:

$$N = \left(\frac{2D}{c} + t_0 \right) M f_0 \quad (2.4)$$

$$M = \left[S \left(\frac{2D}{c} + t_0 \right) \right]^{-1} \quad (2.5)$$

Із рівняння (3.34) знаходимо:

$$D = N \frac{c}{2 f_0 M} - \frac{c t_0}{2},$$

звідси

$$\Delta D \approx \frac{\partial D}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial D}{\partial f_0} \Delta f_0 + \frac{\partial D}{\partial t_0} \Delta t_0 + \frac{\partial D}{\partial c} \Delta c \quad (2.6)$$

Якщо передбачено синхронізація і фазове порівняння імпульсів електронного годинника і сигналу ОКГ, тоді $\Delta N = 1$. При дальностях:

$$D > 1000 \text{ м і } t_0 \approx 10^{-6} \text{ с } D \gg \frac{c}{2} t_0.$$

Після деяких перетворень для частоти повторювання 200 с^{-1} отримаємо:

$$\Delta D = \frac{200D}{f_0} - \frac{D \Delta f_0}{f_0} - \frac{c}{2} \Delta t_0 + \frac{D \Delta c}{c}$$

При частоті імпульсів, що виробляються електронним годинником, 10 МГц і дальностях більш 300 м основним членом, що визначає помилку вимірювання дальності, є $\frac{200D}{f_0} = 2 \cdot 10^{-5} D$.

Висновки

Отже, в даному розділі розглянуто основні конструктивні особливості принципів побудови лазерних далекомірів, що можуть застосовуватися для вимірювання дальності до об'єкту на борту літака.

Розділ 3

ОЦІНКА КАНАЛУ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ ДО ОБ'ЄКТУ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА

3.1. Обґрунтування вибору каналу вимірювання дальності

Аналіз публікацій показує, що недоліками квантово-оптичної системи є мала точність вимірювання дальності на великій відстані та кутів азимута і місця, неоперативність супроводження та неможливість вимірювання кутової і радіальної швидкостей.

Отже, наведемо технічну пропозицію щодо створення каналу вимірювання дальності при одночасному інформаційному взаємозв'язку з ЛА на основі додаткового виділення мод (частот міжмодових биттів) із синхронізованого одномодового багаточастотного спектра випромінювання лазера для синтезу ЛІВС з МЧЧМВ.

У каналі вимірювання дальності, принцип роботи якого ґрунтується на використанні МЧЧМВ, частота проходження імпульсів лазера не може бути малою, оскільки, інакше, неможливо буде розрізняти частоти міжмодового биття. Це призводить до того, що використовувати часово-імпульсний метод на дуже великих відстанях неможливо, зважаючи на неоднозначність вимірювань. Дійсно, при частоті проходження імпульсів $F_{\text{пр}} = 108$ Гц інтервал однозначних вимірювань дальності складає: $R_{\text{н}} = 2Cl/F_{\text{пр}} = 6$ (м).

Низька частота проходження імпульсів у спектрі випромінювання лазера в режимі активної синхронізації подовжніх мод відсутня.

<i>Кафедра авіоніки</i>				<i>НАУ 20 16 06 000 ПЗ</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Туз О.К.</i>			Оцінка каналу вимірювання дальності до об'єкту лазерного далекоміра	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Слободян О.П.</i>					58	116
<i>Реценз.</i>					58		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Левківський В.</i>				173 201 «Авіоніка»		
<i>Затверд.</i>	<i>Павлова С.В.</i>						

Тому пропонується передавати зондуєчий імпульс методом “бланкування” випромінювання або зняттям його на малий час ($t_{\text{бл}}$ випромінювання). Зняття випромінювання на частоті міжмодового биття $\Delta\nu_m$ не може бути коротше, ніж на $t_{np} = 10^2 T_{\Delta\nu} = 10^{-6}$ с.

При цьому реалізується лише груба шкала вимірювання. Використовуючи рециркулятор при обробці пачки “бланкуючих” імпульсів, можливо досягти точності $\Delta R_n < 6$ м і вирішити неоднозначність вимірювань для найточнішої шкали. Похибка визначення дальності в далекомірному каналі за умовою вимірювань на частоті міжмодових биттів визначається

$$\Delta R_n = CT_{\text{МБ}} / 2 = 0,15 \text{ м}$$

де $T_{\text{МБ}} = 10^{-8}$ с – період частоти міжмодових биттів.

Оскільки дисперсія похибки визначення часового інтервалу дорівнює

$$\sigma_\tau^2 = \frac{\dot{O}_{\text{IA}}}{q},$$

де q – відношення сигнал/шум, тоді

$$\sigma_R^2 = C^2 \sigma_\tau^2 = 0,14 \text{ м}^2,$$

де $\sigma_R = 0,3$ м.

Запропонований канал вимірювання дальності для ЛІВС з МЧЧМВ включає: КЕ – керуючий елемент; БКД – блок керування дефлекторами; Лн – лазер з накачкою; СПМ – селектор подовжніх мод з призмою для частоти міжмодових биттів $\Delta\nu_m$; БД – блок дефлекторів, перемикач для частот міжмодових биттів $\Delta\nu_m$ і $2\Delta\nu_m$, призму для частоти міжмодових биттів $\Delta\nu_m$; ПРДО – передавальну оптику; ПРМО – приймальну оптику; ФТД – фотодетектори; ШП – широкосмуговий підсилювач; ІБ – інформаційний блок; РП – резонансні підсилювачі, настроєні на відповідні частоти міжмодових биттів; ФІ – формувач імпульсів, „1”|„0” – тригер, «І» – схему «і»; Лч – лічильник; Фп – фільтр із заданою смугою пропускання; Д – детектор; ДО – диференційовану оптику; П – підсилювач; Ф – фільтр; ДЛ – диференційований ланцюжок; Вип – випрямляч; Лч – лічильник; ЕЦОМ – електронно-цифрову обчислювальну машину та БВІ – блок відображення вимірювальної інформації відносно дальності R (рис. 3.1, 3.2).

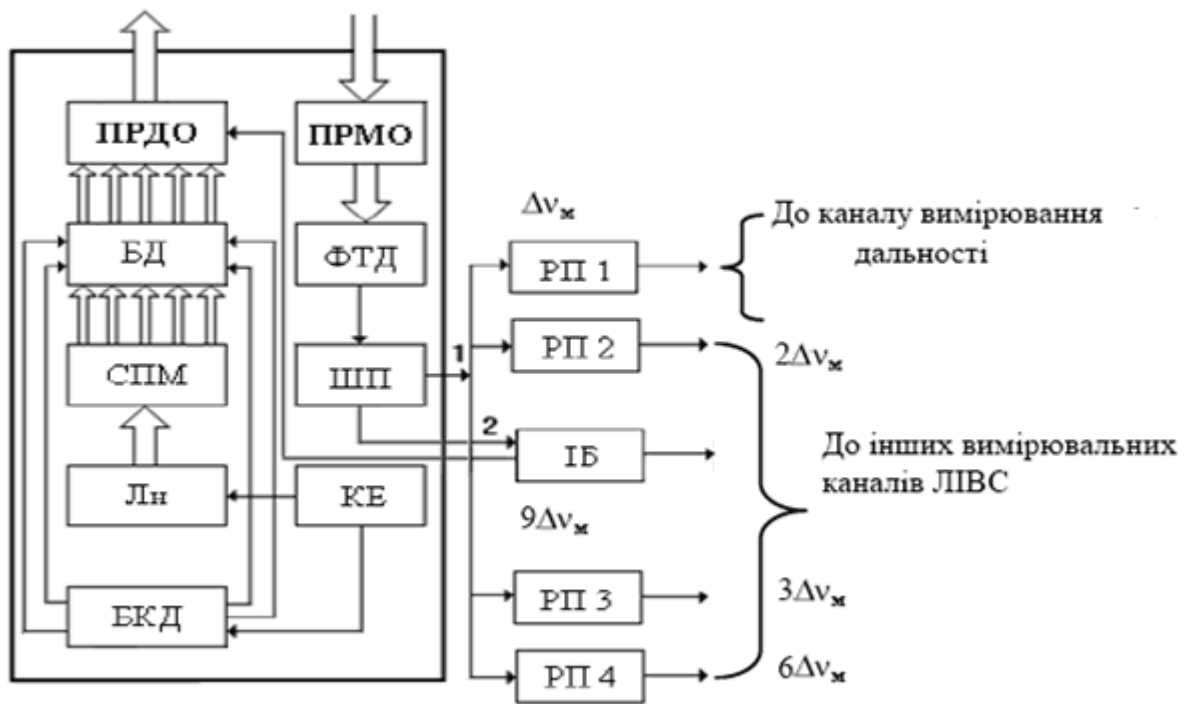


Рис. 3.1. Загальна схема каналу вимірювання дальності в структурі ЛІВС

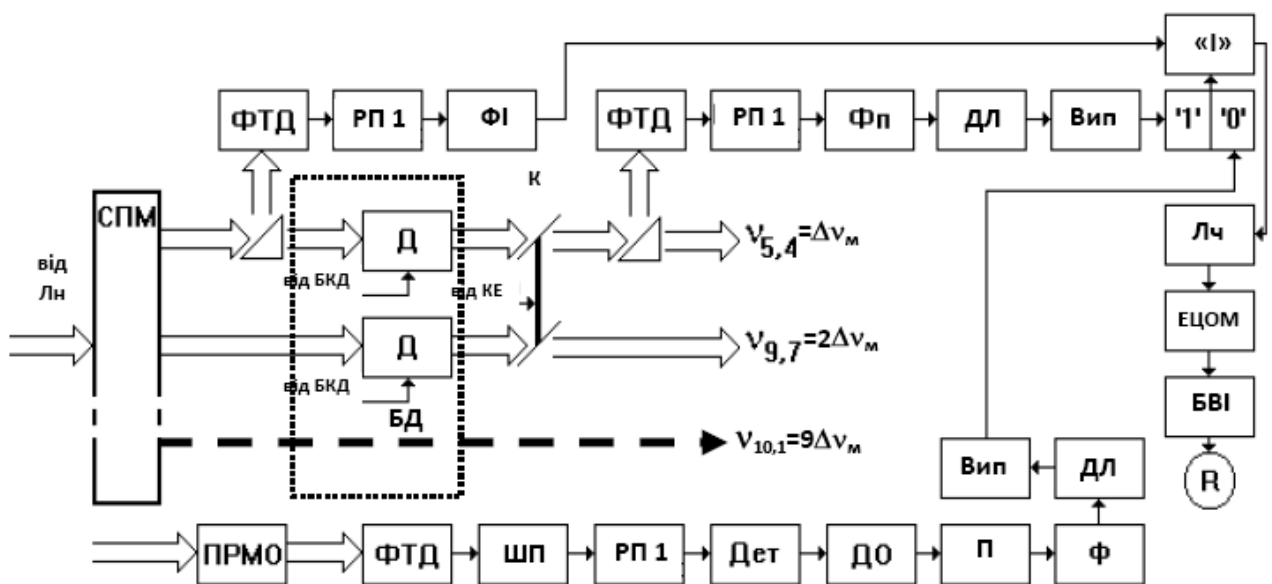


Рис. 3.2. Функціональна схема лазерного каналу вимірювання дальності

Принцип роботи запропонованого каналу полягає в наступному. Із синхронізованого одномодового багаточастотного спектра випромінювання лазера (Лн) за допомогою СПМ виділяються необхідні пари частот для створення:

- інформаційного каналу зв'язку, при умові використання сигналу з різницевих частот міжмодових биттів

$$\Delta v_{101} = v_{10} - v_1 = 9\Delta v_M$$

– рівносигнального напрямку (РСН) на основі формування сумарної діаграми спрямованості (ДС), завдяки частково перетинним чотирьом парціальним ДС, при умові використання різницевої частоти міжмодових биттів:

$$\Delta v_{54} = v_5 - v_4 = \Delta v_M;$$

$$\Delta v_{97} = v_9 - v_7 = 2\Delta v_M;$$

$$\Delta v_{63} = v_6 - v_3 = 3\Delta v_M;$$

$$\Delta v_{82} = v_8 - v_2 = 6\Delta v_M;$$

Сигнал частотою міжмодових биттів $9\Delta v_M$, минаючи БД, потрапляє на ПРДО, де змішується з сигналом від ІБ та формує передавальну інформацію для ЛА (рис. 3.1, 3.2). Водночас сигнал частот міжмодових биттів Δv_M , $2\Delta v_M$, $3\Delta v_M$ та $6\Delta v_M$ потрапляє на БД, який створений з 4-х дефлекторів. Парціальні діаграми спрямованості попарно зустрічно сканують БД у кожній із двох ортогональних площин.

Період сканування задається БКД, який разом з Лн забезпечується необхідним живленням від КЕ. Проходячи через ПРДО, груповий лазерний імпульсний сигнал пар частот: $v_5, v_4 = \Delta v_M$; $v_9, v_7 = 2\Delta v_M$; $v_6, v_3 = 3\Delta v_M$; $v_8, v_2 = 6\Delta v_M$ та $v_{10}, v_1 = 9\Delta v_M$ фокусується в скановані точки простору, оскільки здійснюється зустрічне сканування двома парами діаграм спрямованості у кожній із двох ортогональних площин α і β або X і Y .

Принцип роботи грубої шкали каналу вимірювання дальності полягає в наступному. Виділена СПМ із спектра випромінювання лазера перша пара частот v_{54} розщеплюється під дією розчіплювача (Р) (призми) на два оптичні сигнали (рис. 3.2):

1) основний – сканований дефлектором (Д) під певним кутом (з часом $T_{пр}$, що задається від БКД), проходить через ключ (К) (для виділення “бланкуючого” імпульсу (бланк - нуль)) і розчіплювач, де відбувається виділення додаткового сигналу (2) – надходить на ПРДО і далі на ЛА;

2) додатковий (1) – перетворюваний ФТД в електричний імпульсний сигнал різницевої частоти міжмодового биття v_M – надходить на формувач імпульсів ФІ1, де відбувається виділення «пачок» імпульсів, що приймаються схемою “Г”.

Прийняті ПРМО відбиті від ЛА інформаційний та в процесі сканування чотирьох ДС лазерні імпульсні сигнали й обвідні сигнали ДС за допомогою ФТД перетворюються в електричні імпульсні сигнали на різницевих частотах міжмодових биттів, які підсилюються ШП, і розподіляються в ІБ $9\Delta\nu_m$ отр для обробки приймальної інформації від ЛА та по РП, побудованих на відповідні частоти: $\Delta\nu_m$, $2\Delta\nu_m$, $3\Delta\nu_m$, $6\Delta\nu_m$. При цьому, отриманий від ФТД, перетворений додатковий оптичний сигнал частоти $\nu_{5,4}$ з “бланкуючими” імпульсами в сигнал $\Delta\nu_m$ набуває чітких меж “бланкуючого” імпульсу, проходячи ДО, підсилюється (П). Фільтр зі смугою пропускання $\Pi = 1/\tau_i$ (де τ_i – тривалість імпульсу) виділяє з загального сигналу “бланкуючі” імпульси в імпульси сигнали, що, проходячи ДЛ і Вип – (ФІ = ДЛ + Вип), виділяються у вигляді одного короткого імпульсу за початок “бланкуючого” імпульсу, надходять на тригер з індексом “1”, включаючи його.

На приймальному боці. Відбитий від об’єкту основний сигнал частот $\nu_{5,4}$, у сумі з груповим, минуючи ПРМО, перетворюється ФТД в електричний імпульсний сигнал $\Delta\nu_m$, підсилюється ШП, виділяється в РП, як сигнал міжмодової частоти $\Delta\nu_m$ і, проходячи через Дет, перетворюється точно так, як і додатковий електричний сигнал (2) частоти $\Delta\nu_m$, надходить тільки на тригер с індексом “0”, “перекидаючи” його. Сигнал, що надходить з тригера на схему “Г”, здійснює періодичне “відкриття” і “закриття” проходу для “пачок” імпульсів з ФІ1, що підраховуються Лч і відпрацьовуються у вигляді числа R, через ЕЦОМ на БВІ.

Таким чином відбувається вимір дальності на грубій шкалі (рис. 3.3). Перехід на точну шкалу (генерація пікосекундних імпульсів) здійснюється одразу після припинення включення ключа (для формування “бланкуючого” імпульсу).

Оскільки канал виміру R пропонується ввести до складу структури лазерної інформаційно-вимірювальної системи з МЧЧМВ, то вмикання та вимикання ключа (К) відбувається одночасно для двох (пар) частот $\nu_{5,4}$ і $\nu_{9,7}$.

Апаратурні помилки виміру дальності в пропонованому каналі – це похибки визначення початку і кінця відліку часового інтервалу, похибки за рахунок

дискретності і нестабільність частоти проходження тактових (рахункових) імпульсів.

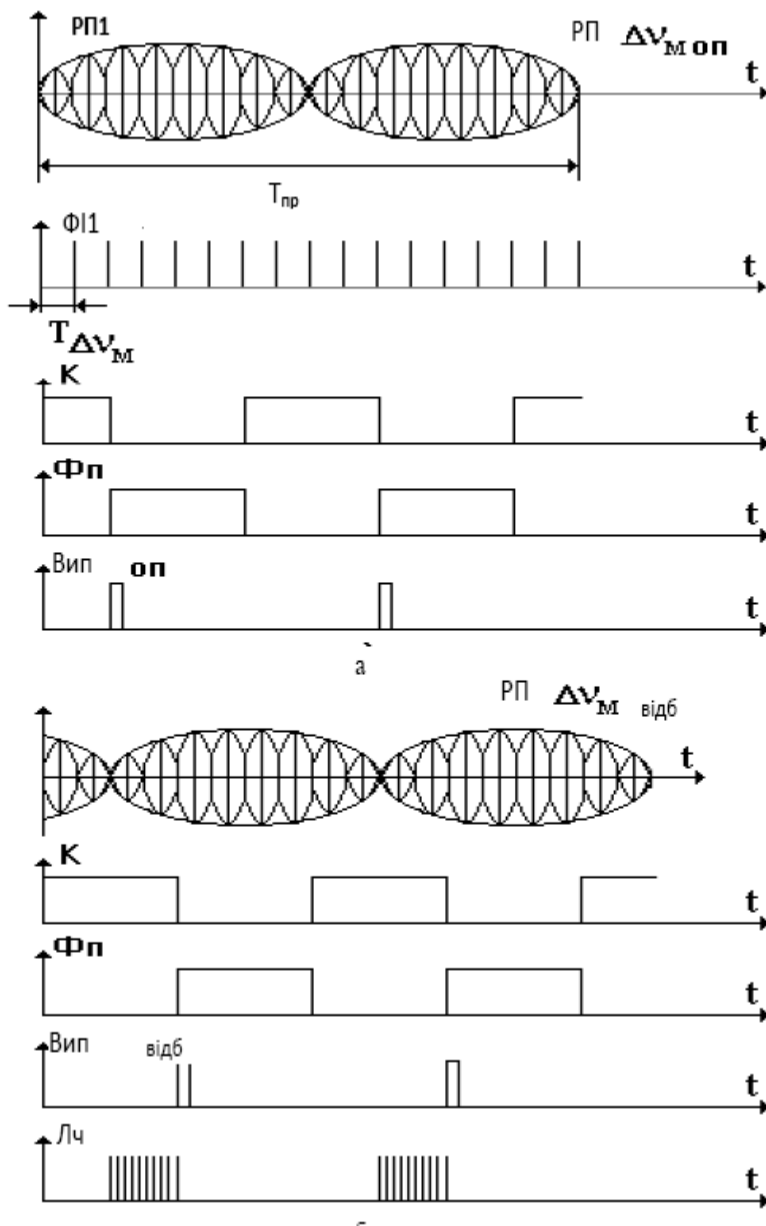


Рис. 3.3. Епюри напруг з виходів блоків вимірювання дальності:
а – від блока опорного сигналу; б – від блока відбитого сигналу

Слід зазначити, що в даному випадку точність оцінки інтервалу визначається крутістю обвідної при заданому граничному значенні напруги $U_{п}$. Це значить, що точність залежить від форми скануючої діаграми спрямованості і відношення сигнал/шум.

Таким чином, запропонований канал вимірювання дальності забезпечить:

– створення інформаційного каналу взаємозв'язку з літальним апаратом, при умові використання сигналу з різницевих частот міжмодових биттів

– створення рівносигнального напрямку на основі формування сумарної ДС, завдяки частково перетинним чотирьом парціальним ДС, при умові використання різницевих частот міжмодових биттів:

- сканування чотирма ДС у заданому куті;
- вимірювання похилої дальності до ЛА;
- синтез частки ЛІВС з МЧЧМВ.

3.2. Зниження сумарної потужності лазерного далекоміра

3.2.1. Основний підхід щодо реалізації методу

В системах оптичної локації, потрібна висока енергія випромінювання (> 0.1 Дж) і малі тривалості випромінювання (< 20 нс) для забезпечення точного визначення по дальності, а також великий ресурс роботи ($> 10^5$ випромінювань). Цим вимогам задовольняють твердотільні лазери з діодною накачкою. Велика кількість лазерних діодів при їх високій ціні обмежує їх застосування. Зменшення кількості лазерних діодів можливо при розподілі необхідної енергії випромінювання на декілька імпульсів («пачку»). Перевагою «пачкового сигналу» є можливість збільшення енергії випромінювання лазера в «пачці» без збільшення потужності джерела накачування.

Для обробки сигналу, що приймається, використаний метод когерентного післядетекторного складання всіх імпульсів «пачки». Визначається граничне значення тривалості «пачки».

Проведене порівняння енергетичних характеристик моноімпульсного далекоміра і далекоміра з пачковим сигналом. Отримана залежність коефіцієнта зниження енергії окремого імпульсу від числа імпульсів в «пачці», що дозволяє визначити вимоги і оптимізувати параметри лазера.

Робота оптичних систем локації в основному базується на моноімпульсному режимі, коли параметри об'єкту вимірюються по одному лазерному імпульсу.

Застосування лазерних далекомірів для визначення дальності до об'єкту накладає ряд істотних вимог на апаратуру, що використовується. До них відноситься мала тривалість (~ 7.15 нс) випромінювання лазера при розходженні випромінювання < 1 мрад, високий ККД при енергії лазера (0,1...0,3) Дж і ресурсі роботи 10^5 випромінювань. Всім цим вимогам відповідає лазер АІГ з напівпровідниковою накачкою.

Останнім часом в якості джерела накачки застосовуються лазерні діоди, які мають ряд переваг: компактність, висока ефективність, вузька спектральна смуга випромінювання, висока яскравість. Створення потужних лазерних діодних лінійок (ЛДЛ) і ґрат (ЛДГ) з питомою потужністю (20-30) Вт/мм при постійному зниженні вартості призвело до їх широкого застосування як безперервних джерел накачки твердотільних лазерів. Ефективність таких лазерів досягає 15 % і більш.

Відомі також розробки лазерів з імпульсним діодним накачуванням, але забезпечення високих рівнів енергії випромінювання вимагає великого числа лазерних діодів, що ускладнює конструкцію і збільшує габарити. При великому числі діодних джерел, що використовуються, вартість таких лазерів різко зростає, що обмежує їх застосування. Наприклад, для лазера на гранаті з енергією випромінювання 100 мДж необхідна потужність лінійок складає ~ 3 кВт. Вартість лінійок з такою потужністю (~ 40000 разів), що може скласти основну частину вартості лазера.

Рішення цього питання можливо при застосуванні активних середовищ з великим часом життя метастабільного рівня τ . Наприклад, кристал ІЛФ, активований іонами Nd, (Nd: YLF) має час життя $\tau = 0,54$ мс - в два рази більше, ніж гранат (Nd: IAG) (0,24мс). Застосування кристала ІЛФ дозволяє понизити необхідну потужність накачки і відповідно число діодних лінійок більш ніж в 1,5 рази.

Іншим рішенням є застосування «пачкового режиму» лазерного локатора, коли для вимірювання характеристик об'єкту використовується не один імпульс з енергією E_0 , а пачка N_i імпульсів з меншою енергією E_i з періодом T_n . Період проходження імпульсів в «пачці» приблизно рівний інтервалу накачки і обмежений часом життя активного середовища ϕ лазера. Процес зондування у такому разі розподіляється на якийсь час, рівний тривалості пачки імпульсів t_n , необхідна енергія випромінювання лазера також розподіляється на N_i імпульсів. При цьому енергія випромінювання в пачці більша одиночного імпульсного випромінювання, що забезпечує тактико-технічні характеристики далекоміра.

Тривалість «пачки» багато більше тривалості моноімпульсу. Тому існують обмеження на діапазон вимірювання дальності для вибраної частоти повторення випромінювання «пачки» і тривалості «пачки».

Вважатимемо, що фотодетектор (ФЕП або лавинний фотодіод) має посилення M_{fd} і коефіцієнт шуму F . Проведемо спрощений аналіз, тобто не враховуватимемо темновий струм, оскільки в нашому випадку їм можна знехтувати.

Нехай коефіцієнт передачі післядетекторного фільтру дорівнює 1. Імпульсна характеристика фільтру має вид прямокутника, тобто амплітудно-частотна характеристика фільтру представляється у вигляді $\sin(\omega\tau_p/2)/(\omega\tau_p/2)$.

За відсутності апіорної інформації про дальність, тривалість «пачки» імпульсів залежить від відстані H відносно зондованого об'єкту згідно з нерівністю:

$$t_n < \frac{2H}{c} < T_0 - t_n, \quad (3.1)$$

де c – швидкість світла, t_n – тривалість пачки, T_0 – період зондування або період випромінювання імпульсів моноімпульсного локатора.

Число імпульсів в пачці визначається формулою

$$N_i = 1 + t_n/T_n \quad (3.2)$$

Повна енергія імпульсів випромінювання в пачці $E_{\text{п}} = N_i E_i$ визначається з умови збереження характеристик виявлення, забезпечувальних в моноімпульсному режимі. E_i – це енергія одного імпульсу випромінювання при «пачковому зондуванні».

На рис. 3.4 представлена тимчасова діаграма зондуючого сигналу для двох випадків: моноімпульсного і «пачкового» зондування.

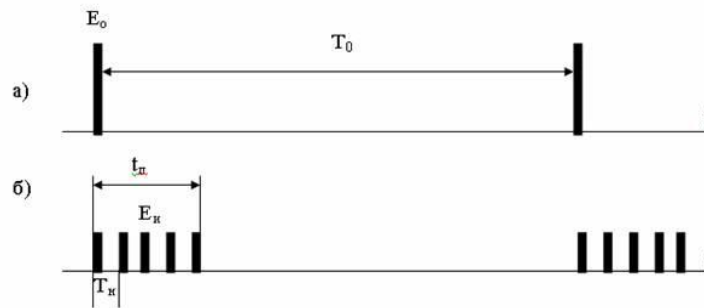


Рис. 3.4. Часова діаграма зондуючого сигналу:
а) моноімпульсний сигнал, б) пачковий сигнал

3.2.2. Узгодження оптичних полів приймача і передавача

При установці далекоміра на борту літального апарату (ЛА) виникає ефект швидкісної аберації. Для її компенсації оптичну вісь фотоприймача зміщують до осі передавача вбік, протилежний напрямку руху ЛА.

Кут швидкісної аберації визначають у відповідності до виразу:

$$\varphi_{\text{аб}} = 2 * V / c$$

де: V – швидкість літального апарату, c – швидкість світла.

При $V = 7,8$ км/с, $\varphi_{\text{аб}} = 10,7$ кут. сек.

Для моноімпульсного далекоміра поле зору приймання пов'язано з розходженням пучка випромінювання передавача із-за умови компенсації швидкісної аберації пучка випромінювання:

$$\varphi_{\text{пр}} = gt + D_j$$

де $\varphi_{\text{пр}}$ - плоский кут поля зору приймання, gt - плоский кут розходження випромінювання передавача, D_j - технологічний запас, пов'язаний з помилками юстирувань.

Для «пачкового зондування» через тимчасову розстановку між 1-им і останнім імпульсом зондування в «пачці» виникає переміщення плями лазерного засвічення на підстилаючій поверхні. Так само, як і для випадку моноімпульсного зондування при компенсації швидкісної аберації приймальна антена приймає сигнал, сформований всією поверхнею, що засвічується лазерним випромінюванням.

Для оцінки перекриття плям введемо коефіцієнт перекриття, рівний $\Delta S/S$, де ΔS - площа перекриття; S – площа плями

$$0 \leq \Delta S/S \leq 1,$$

а також відносний зсув плями

$$\xi = z/r,$$

де z – зсув плями, r - радіус плями.

Коефіцієнт перекриття плями в залежності від відносного зсуву плями представлений на рис. 3.5.

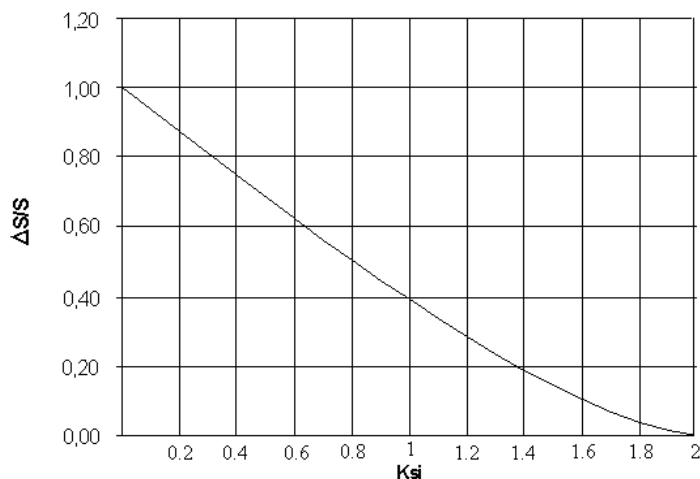


Рис. 3.5. Залежність коефіцієнта перекриття плями ($\Delta S/S$) від відносного зсуву плями (ξ)

При $\xi = 0$ відбувається повне перекриття плям, $\Delta S/S = 1$. При $\xi = 2$ перекриття плям відсутнє, $\Delta S/S = 0$.

Для слабого впливу зсуву плям на зміну величини коефіцієнта віддзеркалення від поверхні і зміни дальності необхідно, щоб відносний зсув плями (ξ) був менше 1.

Задаючись допустимим коефіцієнтом перекриття плями $(\Delta S/S)_{\text{доп}}$ знаходимо з рис. 3.5 величину $\xi_{\text{доп}}$. Тепер можна знайти максимальну тривалість пачки

$$T_{n \text{ max}} = \frac{H \xi_{\text{доп}} \gamma_t}{2V} \quad (3.3)$$

де H – висота ЛА.

Для $\gamma_t = 40$ кут. сек $= 2 \cdot 10^{-4}$ рад.; $H = 200$ км; $\xi = 0,5$ отримаємо:

$$T_{n \text{ max}} = 1,28 \text{ мс.}$$

Отже, величина $T_{n \text{ max}}$ приблизно однаково обмежується значеннями як зсуву плями, так і дальності.

Кут між напрямом на центри плям з точки первинного положення ЛА:

$$j_{\text{пач}} = V \cdot T_{\text{п}} / H \quad (3.4)$$

де $T_{\text{п}}$ – тривалість пачки

$$\text{При } V = 7,8 \text{ км/с, } T_{\text{п}} = 1,3 \text{ мс, } H = 200 \text{ км} \quad \varphi_{\text{пач}} = 4,7 \text{ кут. сек.}$$

Якщо вибрати кут між осями передавача і приймача рівний $j_{\text{аб}} - j_{\text{пач}} / 2$, то кутове поле зору на прийом дорівнює:

$$\varphi_{\text{пр}} = \gamma_{\text{пер}} + \Delta\varphi + \varphi_{\text{пач}} / 2.$$

3.2.3. Оцінка характеристик виявлених при моноімпульсному зондуванні

Вважатимемо, що число фотоелектронів на дозволеному інтервалі t_p розподілено за законом Пуассона. Для числа ф.е. > 13 розподіл Пуассона можна апроксимувати гаусовським розподілом. В цьому випадку простіше отримати аналітичні вирази.

Ймовірність помилкової тривоги на дозволеному інтервалі для моноімпульсного зондування має вигляд:

$$P_{\text{лж0}} = 1 - \Phi(a_0) \quad (3.5)$$

де

$$a_o = \frac{N_{\text{пор}0} - N_{\text{ш}}}{(F N_{\text{ш}})^{1/2}} \quad (3.6)$$

де $N_{\text{ш}}$ - середнє число ф.е. на інтервалі дозволу створюване фоном сонячної радіації,

$N_{\text{пор}0}$ - порогове число ф.е. на інтервалі дозволу.

$\Phi(a_0)$ – інтеграл ймовірності.

$$\Phi(X) = 0,5 + (2\pi)^{-1/2} \int_0^X \exp(-x^2/2) dx \quad (3.7)$$

Ймовірність правильного виявлення на інтервалі дозволу для моноімпульсного зондування має вигляд

$$P_{\text{но}0} = \Phi(b_o), \quad (3.8)$$

де

$$b_o = \frac{N_{c0} - (N_{\text{пор}0} - N_{\text{ш}})}{(F(N_{\text{ш}} + N_{c0}))^{1/2}} \quad (3.9)$$

N_{c0} - середнє число сигнальних ф.е. на дозволяючому інтервалі при моноімпульсному зондуванні.

3.2.4. Оцінка характеристик виявлення при «пачковому зондуванні»

Аналогічно запишемо ймовірність похибки тривоги на дозволеному інтервалі для пачкового зондування

$$P_{\text{лжн}} = 1 - \Phi(a_n), \quad (3.10)$$

де

$$a_n = \frac{N_{\text{порн}} - N_{\text{шн}}}{(F N_{\text{шн}})^{1/2}} \quad (3.11)$$

де $N_{\text{порн}}$ – порогове число ф.е. на інтервалі дозволу при пачковому зондуванні,

$N_{\text{шн}}$ – середнє число ф.е. на інтервалі дозволу, створюване фоном сонячної радіації при пачковому зондуванні, $N_{\text{шн}} = N_{\text{ш}} * N_i$, N_i – число імпульсів в пачці.

Ймовірність правильного виявлення на дозволеному інтервалі для пачкового зондування має вигляд

$$P_{\text{нок}} = \Phi(b_n), \quad (3.12)$$

де

$$b_n = \frac{N_{c1} N_u - (N_{\text{нок}} - N_{\text{шн}})}{(F N_u (N_{\text{шн}} + N_{c1}))^{1/2}}, \quad (3.13)$$

де N_{c1} - середнє число сигнальних ф.е. на дозволеному інтервалі, прийнятих від одного імпульсу, при пачковому зондуванні.

Задаючись однаковою вірогідністю помилкової тривоги $P_{\text{лт0}} = P_{\text{лтп}}$ знаходимо співвідношення між порогами для випадку моноімпульсного і пачкового зондування

$$N_{\text{нок}} - N_{\text{ш}} = (N_{\text{нок}} - N_{\text{шн}}) / \sqrt{N_u} \quad (3.14)$$

Для визначення співвідношень між енергіями лазера при моноімпульсному і «пачковому» сигналі введемо параметр δ_E :

$$\delta_E = N_i E_{c1} / E_{c0}, \quad (3.15)$$

де E_{c1} – енергія одного випромінюючого імпульсу пачки;

E_{c0} – енергія випромінюючого імпульсу при моноімпульсному зондуванні.

Фізичне значення цього параметра полягає в наступному: в скільки разів необхідно збільшити енергію сигналу у разі пачкової посилки (в порівнянні з одиночною), щоб при рівній вірогідності помилкової тривоги отримати однакою вірогідність правильного виявлення. З фізичного значення $\delta_E \geq 1$.

Вираз (3.13) можна перетворити, виразити δ_E через число приймається ф.е., вважаючи решту параметрів локаційного рівняння однаковою; тоді

$$\delta_E = N_i N_{c1} / N_{c0} \quad (3.16)$$

Вхідне відношення с/ш при моноімпульсному зондуванні може бути виражено через число ф.е.

$$q_{0\text{вх}} = P_{\text{с0}}/P_{\text{ш}} = N_{\text{с0}}/N_{\text{ш}} \quad (3.17)$$

$P_{\text{ш}}$ – середня оптична потужність фону на фотодетекторі при моноімпульсному зондуванні, Вт, $P_{\text{с0}}$ – оптична потужність сигналу на фотодетекторі при моноімпульсному зондуванні, Вт.

Прирівнявши вирази (3.9) і (3.13), з урахуванням виразу (3.17), отримаємо початкове рівняння, з якого необхідно знайти \square_{E}

$$\frac{\sqrt{N_{\text{с0}} - a_0 \sqrt{F/q_{0\text{ex}}}}}{\sqrt{(1+1/q_{0\text{ex}})}} = \frac{\delta_{\text{E}} \sqrt{N_{\text{с0}} - a_0 \sqrt{N_{\text{ш}} F/q_{0\text{ex}}}}}{\sqrt{\delta_{\text{E}} + N_{\text{ш}}/q_{0\text{ex}}}} \quad (3.18)$$

Перетворивши вираз (3.18), отримаємо квадратне рівняння щодо δ_{E}

$$\delta_{\text{E}}^2 + A \delta_{\text{E}} + B = 0 \quad (3.19)$$

де

$$A = - \left[\frac{(\sqrt{N_{\text{с0}} - a_0 \sqrt{F/q_{0\text{ex}}}})^2}{N_{\text{с0}}(1+1/q_{0\text{ex}})} + 2a_0 \sqrt{\frac{F N_{\text{ш}}}{N_{\text{с0}} q_{0\text{ex}}}} \right] \quad (3.20)$$

$$B = \frac{N_{\text{ш}}}{N_{\text{с0}}} \left[\frac{a_0^2 F}{q_{0\text{ex}}} - \frac{(\sqrt{N_{\text{с0}} - a_0 \sqrt{F/q_{0\text{ex}}}})^2}{(1+q_{0\text{ex}})} \right] \quad (3.21)$$

Аналітичне рішення рівняння (3.19) залежить від значення параметра Z

$$Z = \sqrt{N_{\text{с0}} - a_0 \sqrt{F/q_{0\text{ex}}}} \quad (3.22)$$

Для $Z > 0$

$$\delta_{\text{E}} = -\frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} \quad (3.23a)$$

Для $Z < 0$

$$\delta_{\text{E}} = -\frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} \quad (3.23б)$$

Для $Z = 0$

$$\delta_{\text{E}} = a_0 * \sqrt{\frac{F N_{\text{ш}}}{q_{0\text{ex}} N_{\text{с0}}}} \quad (3.23в)$$

З виразів (3.23а) і (3.23б) слідує, що для забезпечення позитивності дискримінанта:

$$2A \geq 4B.$$

З виразу (3.20) виходить, що $A < 0$.

Якщо $\delta_E = 1$, тоді виконується умова: $B + 1 = -A$.

Запишемо коефіцієнт δ_E , що характеризує збільшення енергії «пачки» імпульсів в порівнянні з енергією імпульсу моноімпульсного локатора E_0 у вигляді

$$\delta_E = \frac{E_{II}}{E_0}. \quad (3.24)$$

На рис. 3.6 представлена залежність цього коефіцієнта від числа імпульсів в пачці N_i , розраховані з умови збереження виявлених характеристик.

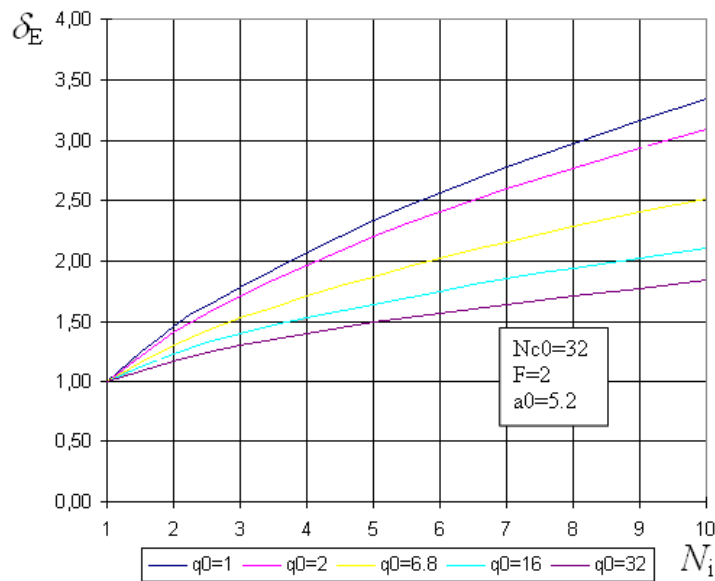


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнта δ_E від числа імпульсів в пачці N_i при різних значеннях вхідного відношення сигнал/шум початкового моноімпульсного режиму:

- 1) $q_{0ВХ} = 1$; 2) $q_{0ВХ} = 2$; 3) $q_{0ВХ} = 6,8$; 4) $q_{0ВХ} = 16$; 5) $q_{0ВХ} = 32$;
- при $N_{c0} = 32, F = 2, a_0 = 5,2 (P_{лт} = 10^{-7})$

Необхідна енергія «пачки» імпульсів росте із збільшенням числа імпульсів, але швидкість росту знижується при збільшенні відношення сигнал/шум $q_{0ВХ}$, а

також числа сигнальних фотоелектронів N_{c0} для початкового моноімпульсного режиму.

Не дивлячись на деяке збільшення загальної енергії випромінювання пачки імпульсів, значне зниження енергії окремого імпульсу істотно спрощує проблему використання діодної накачки, а також рішення ряду інших питань. Введемо коефіцієнт зниження енергії окремого імпульсу в пачці:

$$K_E = \frac{E_i}{E_0} \text{ або } K_E = \frac{\delta_i}{N_i}. \quad (3.25)$$

На рис. 3.7 представлена залежність K_E від числа імпульсів в пачці, що дозволяють визначити вимоги щодо лазера і оптимізувати його параметри.

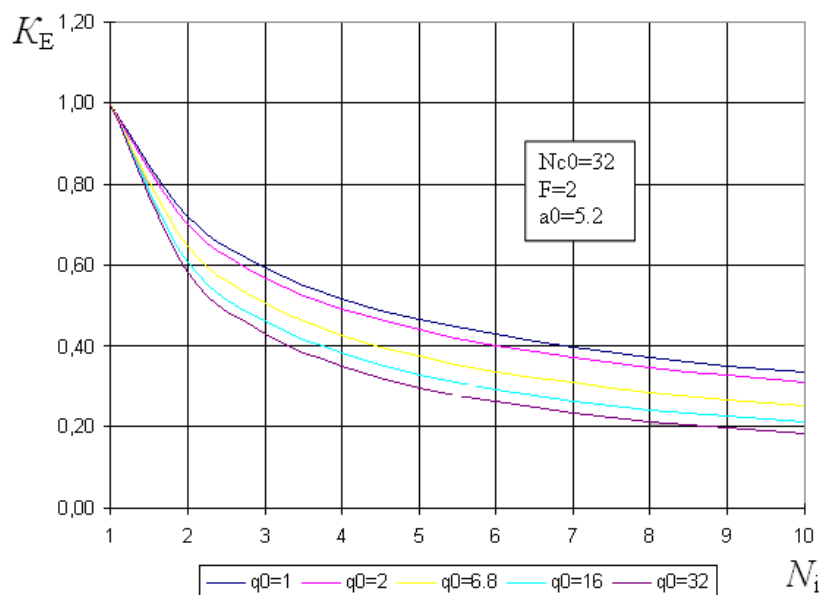


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнта зниження енергії окремого імпульсу K_E від числа імпульсів в пачці N_i при різних значеннях входного відношення сигнал/шум для початкового моноімпульсного режиму:

1) $q_{0вх} = 1$; 2) $q_{0вх} = 2$, 3) $q_{0вх} = 6.8$, 4) $q_{0вх} = 16$, 5) $q_{0вх} = 32$;

при $N_{c0} = 32$, $F = 2$, $a_0 = 5.2 (P_{лт} = 10^{-7})$

У всіх випадках значення коефіцієнта K_E монотонно зменшується із зростанням числа імпульсів.

3.2.5. Післядетекторна обробка сигналу

Відомо, що існують 2 режими некогерентного фотоприйому:

- режим інтеграції зарядів;
- режим рахунку фотонів.

В моноімпульсних далекомірах виявлення сигналу засновано на післядетекторній фільтрації сигналу з шумами і реєстрації сигналу по перевищенню їм рівня порогового пристрою. В цьому випадку рівень сигналу перевищує рівень шуму на вході порогового пристрою.

В багатоімпульсних далекомірах виявлення сигналу може бути реалізовано на основі післядетекторного когерентного складання всіх імпульсів пачки у момент появи останнього імпульсу пачки. Потім сигнал порівнюється з пороговим. В цьому випадку амплітуда одного імпульсу пачки в загальному випадку може бути менше амплітуди шумових імпульсів. Рішення задачі виявлення сигналу і вимірювання дальності в багатоімпульсних далекомірах може бути засновано на записі в цифровому виді сигналу, що поступає, в часовому стробі. Передній фронт строба відповідає мінімальній очікуваній дальності, а задній фронт – максимальній дальності, збільшеної на тривалість пачки. Пропонована цифрова обробка сигналу використовує апріорну інформацію про тимчасовий інтервал між зондуючими імпульсами в пачці і середньому значенні потужності фону. Знання часових інтервалів між зондуючими імпульсами дозволить когерентно скласти імпульси, що приймаються, в пачці на виході фотодетектора, а знання середнього значення потужності фону дозволить оптимально вибрати величину цифрового порогу.

Механізм цифрової обробки сигналу полягає в наступному: сигнал на тимчасовому інтервалі $T_{стр}$ оцифрований з кроком АЦП (ΔT), рівним тривалості зондуючого сигналу. Отже, є L часових інтервалів обробки. Номер часового інтервалу відповідає номеру комірки ОЗП, в якому зберігається інформація. Відстань між зондуючими імпульсами в інтервалах обробки визначається згідно виразом 3.26:

$$K_1 = T_1 / \Delta T, K_j = T_j / \Delta T \quad (3.26)$$

Відстань між першою і останнім зондуючими імпульсами в інтервалах обробки рівно

$$K_0 = \sum_{i=1}^j K_i \quad (3.27)$$

Ячейка M (рис. 3.8) відповідає задньому фронту строба дальності.

Цифрова обробка починається з першої комірки ОЗП. Її значення складається з коміркою K_0 . В комірку K_0 додаються значення з комірок K_1, K_2, \dots, K_{j-1} . Отримане значення в комірці K_0 порівнюється з порогом. Якщо воно більше порогу, то вважається, що сигнал прийнятий.

Якщо величина числа, записаного в комірку K_0 , менше порогу, то переходимо до наступної комірки, тобто число з комірок 2 ОЗП складаємо з числом комірок $K_0 + 1$. В комірку $K_0 + 1$ додаємо значення з комірок $K_1 + 1, K_2 + 1, \dots, K_{j-1} + 1$ і порівнюємо з порогом. Таким чином, якщо поріг не перевищений, то переходимо до наступної комірки, і так до комірки M .

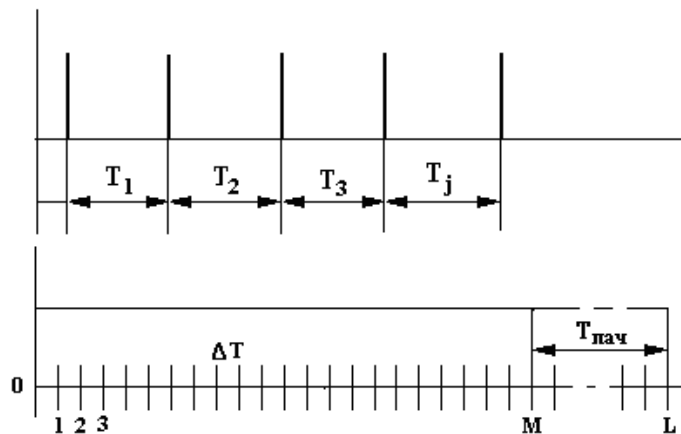


Рис. 3.8. Часова діаграма оцифровки сигналу

Дальність (D) визначається за формулою

$$D = \frac{C}{2} [\tau_s + \Delta T * (i - 1)] \quad (3.28)$$

де: t_c – тимчасова затримка між переднім фронтом 1-го зондуючого імпульсу і переднім фронтом строба дальності, ΔT – крок АЦП, i – номер комірки ОЗП, в якому записаний сигнал від 1-го зондуючого імпульсу, $1 \leq i \leq M$.

Режим рахунку фотонів використовується при невеликому (< 15) числі фотоелектронів (ф. е.) на інтервалі спостереження, коли відсутні злипання між

сусідніми імпульсами, тобто фотоприймач дозволяє кожний одноелектронний імпульс.

Як і у разі інтеграції зарядів, є L тимчасових інтервалів обробки, тільки кожний інтервал обробки використовується як інтервал рахунку. В найпростішому випадку може використовуватися два лічильники, що працюють поперемінно, тобто зупинка 1-го лічильника запускає 2-ий лічильник, і так далі по черзі. Число імпульсів, злічених кожним лічильником, записується у відповідну ячейку ОЗП. Потім визначається середнє число одноелектронних імпульсів, пов'язаних з фоном, на інтервалі рахунку.

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^L N_i}{L}$$

де N_i – число одноелектронних імпульсів на i -ом інтервалі.

Враховуючи, що число одноелектронних імпульсів на інтервалі рахунку розподілено за законом Пуассона, знаходимо поріг.

Подальша обробка може бути виконаний так само, як для режиму інтеграції зарядів, але можна використовувати і більш простий алгоритм, що полягає в наступному. Для заданої ймовірності помилкової тривоги на інтервалі спостереження і середнього числа шумових імпульсів вибирається поріг ($N_{\text{пор}}$). При цьому ймовірність помилкової тривоги, задана при виборі порогу, перевищує ймовірність помилкової тривоги, заданої для лазерного далекоміра. Це зв'язано з тим, що застосування апріорної інформації про відстань між зондуючими імпульсами дозволяє понизити ймовірність помилкової тривоги.

Далі фіксуються інтервали, в яких число прийнятих імпульсів перевищує порогове. Потім ця реалізація аналізується на відповідність часовій розстановці зондуючих імпульсів в пачці. В результаті знижується ймовірність помилкової тривоги, а також скорочується число операцій, вироблених ЕОМ, і зменшується час вимірювання дальності.

Розділ 4

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВИМІРЮВАННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДАЛЬНОСТІ ЛАЗЕРНИХ ДАЛЕКОМІРІВ

4.1. Оцінка основних параметрів лазерних далекомірів

Застосування лазерів вносить деякі особливості в побудову передаючих і приймальних пристроїв оптичного далекоміра. Мале розходження випромінювання лазера в поєднанні із значною його потужністю дозволяє в деяких випадках обійтися без додаткових елементів передавальних оптичних систем. Це можливо при вимірюваннях порівняно не великих відстаней. Для вимірювання значних відстаней, передавач лазерного далекоміра повинен мати колімаційну оптичну систему. Приймальна оптична система служить для фокусування променя, що поступає від об'єкту випромінювання і передачі його на фотоприймач. Існує декілька основних схем передавальних і приймальних оптичних систем для формування випромінювання: лінзової, дзеркальної, дзеркально-лінзової і суміщеної приймально-передаючої систем. Найбільш простій і надійної від фонових засвічень є схема з розділеними каналами прийому і передачі. В суміщеній системі вихідний візир передавача є одночасно вхідним візиром приймача, а розділення передаваного і прийнятого випромінювання забезпечується за допомогою оптичних світлорозподільних елементів, зокрема, дзеркал-обтюраторів або поляризаційних пристроїв. Оптичні системи далекомірів є телескопічними, в яких задній фокус об'єктиву або фокус головного дзеркала співпадає з переднім фокусом лінзи або фокусом другого дзеркала. Розширюючи діаметр пучка, оптичні системи зменшують його розходження приблизно в межах (10...20).

<i>Кафедра авіоніки</i>				<i>НАУ 20 16 06 000 ПЗ</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Туз О.К.</i>			Методика оцінки вимірювання максимальної дальності лазерних далекомірів	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Слободян О.П.</i>					78	116
<i>Консульт.</i>					78		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Левкієвський В.</i>				173 201 «Авіоніка»		
<i>Затверд.</i>	<i>Павлова С.В.</i>						

Відмітна особливість лазерних оптичних систем полягає в тому, що в систему поступає весь випромінюваний потік, чого неможливо досягти при звичайних джерелах світла, випромінюючих в тілесному куті 4π ср. Як фотоприймачі в лазерних далекомірах для лазерів з різною довжиною хвилі випромінювання застосовуються фотопомножувачі або фотодіоди.

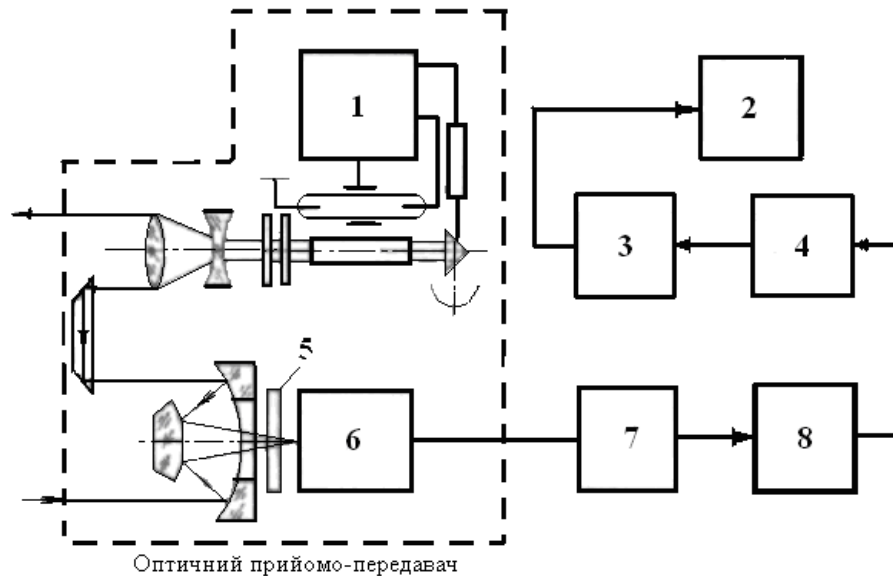


Рис. 4.1. Структурна схема імпульсного далекоміра:

1 - система накачки лазера; 2 - індикатор; 3 - лічильник; 4 - схема збігу;
5 - фільтр; 6 - ФЕП; 7 - підсилювач і формувач; 8 – тригер

Даний далекомір призначений для вимірювання відстані до 16 км з точністю до 0,5 м (рис. 4.1). Імпульси, що генеруються, мають тривалість 20...30 нс. Накачування лазера проводиться за допомогою імпульсної ксенонової лампи, яка виходить з лазера випромінювання прямує на телескопічну систему, що зменшує його кутове розходження. Відбите від об'єкту випромінювання збирається оптичною системою Кассагрена і через інтерференційний оптичний фільтр поступає на ФЕП. Частина випромінювання лазера трипель-призмою передається безпосередньо на приймальну оптику, минувши шлях. Таким чином, створюється опорний сигнал. Після фотоелектричного перетворення опорний сигнал посилюється і з нього формується імпульс, під дією якого відбувається переключення тригера. Стартовий імпульс тригера запускає рахунковий пристрій.

Відбите від об'єкту світло утворює імпульс на виході ФЕП, зсунуте за часом щодо опорного, і він також після посилення і формування подається в тригер. Під дією цього імпульсу тригер переключастся в початковий стан і генерує стоп-імпульс, що зупиняє лічильник. Таким чином, рахунковий пристрій виміряє час запізнювання $\tau_{зп}$ відбитого світлового імпульсу відносно опорного. В далекомірі використовується схема збігу і два кварцові генератори на 5 і 5,05 МГц. Результат вимірювання дальності видається на цифровий індикатор.

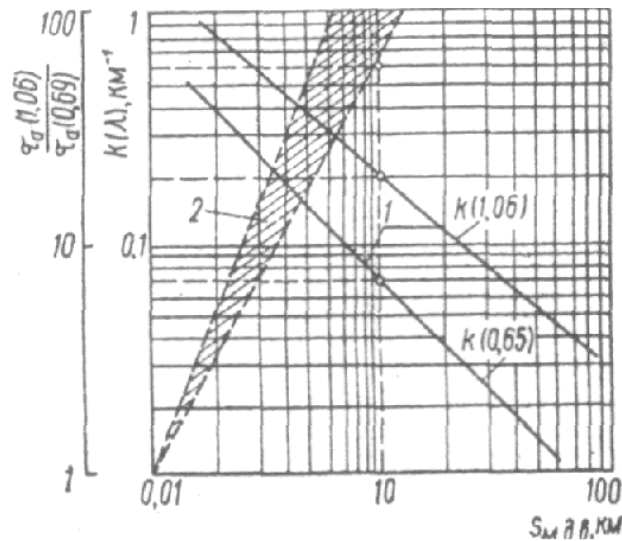


Рис. 4.2. Оцінка дальності дії лазерних далекомірів:

1 - залежність коефіцієнта для випромінювання рубінового і неодимового лазерів від метрологічної дальності видимості $S_{м.д.в.}$;

2 - залежність відношення $\tau_a(1,06) / \tau_a(0,6943)$ від $S_{м.д.в.}$.

Проведемо порівняльну оцінку дальності дії рубінового і неодимового далекомірів. Коефіцієнт ослаблення випромінювання далекоміра в розсіюючому середовищі (атмосфері) на дальності D дорівнює $\tau_a(\lambda) = e^{-k(\lambda)D}$. Підставляючи значення $k(\lambda)$ відповідно для рубінового ($\lambda_0 = 0,6943$ мкм) і неодимового ($\lambda_0 = 1,06$ мкм) лазерів і полагаючи $D = 2S_{м.д.в.}$ одержуємо:

$$\frac{\tau_a(1,06)}{\tau_a(0,9643)} = e^{-2S_{м.д.в.} (k(1,06) - k(0,9643))} \quad (4.1)$$

Аналогічну залежність можна отримати, підставляючи в цю формулу значення $k(\lambda)$ з графіка (рис. 4.2). З цього рисунку видно, що починаючи із

значенням $S_{м.д.в.} > 10$ км, ослаблення випромінювання сигналу за рахунок розсіяння для далекоміра з рубіновим лазером значно більше, ніж для далекоміра з неодимовим лазером. Тому застосування неодимових лазерів в далекомірах більш переважно ніж рубінових, а також ККД неодимового вище ніж у рубінового.

Для точного вимірювання відстані від декількох метрів до декількох кілометрів використовують фазовий метод, заснований на вимірюванні різниці фаз між опорним сигналом і сигналом, що пройшов відстань, що вимірюється (табл. 4). Залежно від конкретних задач і технічних характеристик елементів, вживаних для первинної обробки сигналу, схеми сучасних фазових далекомірів розділяють на дві групи схеми з перетворенням сигналу у фотоприймачі і схеми з перетворенням сигналу у фотоприймачі і схеми з перетворенням сигналу в оптичному модуляторі. У свою чергу, в кожній з цих схем можливо або фазове детектування сигналу модуляції, або перетворення частоти останнього. Кожний з цих варіантів має свої особливості, які в значній мірі визначають порогову чутливість, перешкодостійкість і інструментальну похибку приладу.

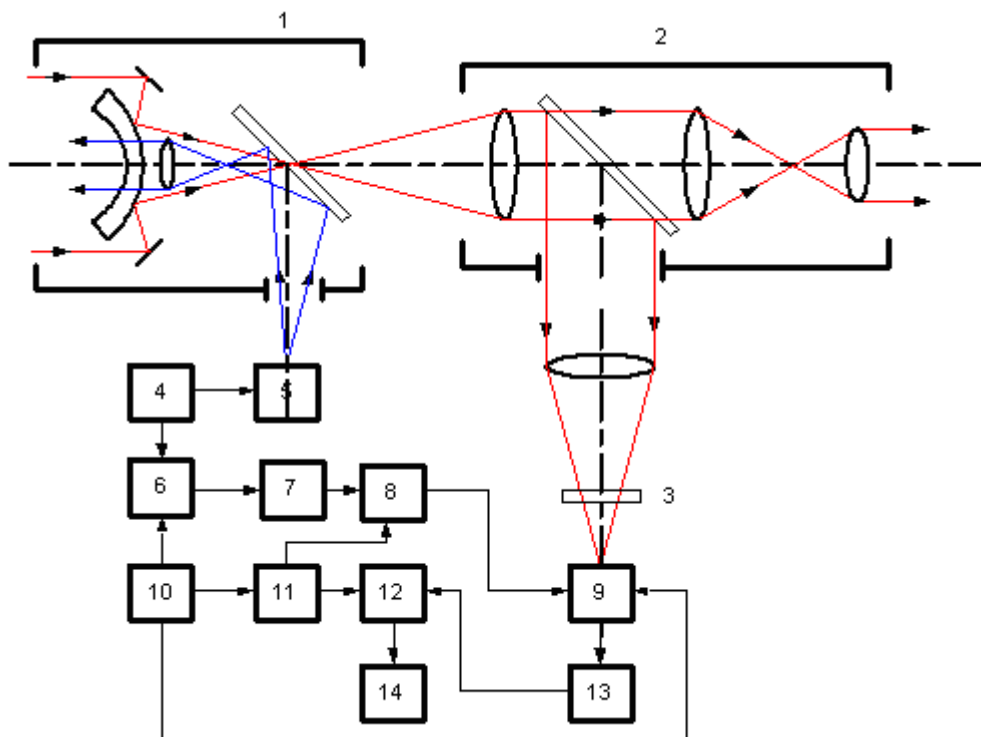


Рис.4.3. Структурна схема фазового далекоміра:

1 - дзеркально-лінзовий об'єктив; 2 - окуляр; 3 - інтерференційний світлофільтр; 4 - кварцовий генератор; 5 - напівпровідниковий лазер; 6 - змішувач; 7 - фазовертач; 8 - фазовий маніпулятор; 9 - фотопомножувач; 10 - гетеродин; 11 - генератор прямокутної напруги; 12 - синхронний детектор; 13 - підсилювач; 14 - нуль-індикатор

Одним з перших вітчизняних фазових далекомірів є далекомір КДГ-3, призначений для вимірювання відстаней до нерухомих об'єктів на дистанції до 2000 м з середньквдратичною похибкою ± 2 см. В якості випромінювача в КДГ-3 застосовується напівпровідниковий лазер на основі GaAs, працюючий на довжині хвилі 0,84 мкм. Структурна схема фазового далекоміра показана на рис. 4.3. випромінювання напівпровідникового лазера за допомогою дзеркально-лінзового об'єктиву прямує на відбивач, встановлений на об'єктиві. Відображене випромінювання приймається тим же об'єктивом і після проходження приймальної оптики поступає на катод фотопомножувача, перед яким розташований інтерференційний світлофільтр. Для візуального наведення приладу на об'єкт служить окуляр. На напівпровідниковий лазер подається модулююча напруга від генератора, що має три фіксовані частоти (30 МГц; 29 МГц і 27 МГц), стабілізовані кварцем. Сигнал з частотою модуляції f_m , що поступає на ФЕП від об'єкту, змішується на катоді фотопомножувача з сигналом частоти f_r той, що подається на зовнішній електрод ФЕУ від гетеродина, що має також три фіксовані частоти (29,9 МГц; 29,8 МГц і 26,9 МГц). В результаті гетеродинірування утворюється змінна складова фотоструму з різницевою частотою 100 кГц, фаза якої залежить від величини відстані, що вимірюється. Ця складова змішується з опорним сигналом з частотою 100 кГц. Для отримання опорного сигналу використовується змішувач, на який подаються сигнали з частотами $f_{га}$ і f_r від кварцового генератора і гетеродина. На виході змішувача виділяється опорний сигнал з частотою 100 кГц, який подається на другий зовнішній електрод ФЕП через фазовертач і фазовий маніпулятор. Останній періодично перемикає фазу сигналу в опорному каналі стрибком на 180° з частотою 1 кГц, що задається генератором прямокутної напруги. В результаті

зсуву, отриманого при гетеродиніруванні сигналу з опорним сигналом тієї ж частоти, відбувається фазове детектування на частоті 100 кГц. Оскільки опорний сигнал змінюється по фазі, то на виході ФЕП з'являється складова фотоструму у вигляді прямокутних імпульсів з частотою 1 кГц. Амплітуда цієї складової залежить від різниці фаз опорного і відбитого сигналу від об'єктів. Після посилення він поступає на синхронний детектор, куди одночасно подається сигнал тієї ж частоти від генератора. Амплітуда постійної напруги, що приймається з виходу синхронного детектора, залежить від різниці фаз між опорним і відбитим сигналами і реєструється нуль-індикатором. Останній показуватиме нуль при різниці фаз, рівній $(2N + 1) \pi/2$. Вимірювальним елементом в даному далекомірі служить фазообертач, що дозволяє плавно змінювати фазу опорного сигналу. При цьому відстань до об'єкту, що вимірюється на кожній фіксованій частоті.

Вузька спрямованість і монохроматичність лазерів дозволяє створювати спектральну і просторову густину енергії, порівнянну з подібними ж характеристиками радіолокаторів НВЧ діапазона довжин хвиль. Лазерні системи мають перевагами в порівнянні з радіолокаторами: більшою точністю вимірювання доплерівського зсуву частот; більшою точністю визначення координат об'єкту спостереження. Імпульсний далекомір має функціональну схему, аналогічну схемі радіолокатора. Відмінності полягають в основному в електронних схемах вимірювання часу, характеристик випромінювача і оптичних антен. Такі системи працюють, визначаючи відстань за часом запізнювання $\tau_{зп}$ відбитого від об'єкту імпульсу відносно опорного:

$$D = \frac{c\tau_{зп}}{2} \quad (4.2)$$

Проміжок часу $\tau_{зп}$ вимірюють за допомогою спеціальних пристроїв хронуючих імпульсів і лічильника цих імпульсів. У фазових далекомірах, що працюють в безперервному режимі, випромінювання передавача модулюється по інтенсивності синусоїдальним сигналом і прямує на об'єкт. Відбите випромінювання приймається оптичною системою і фотоприймачем. Дальність

до об'єкту визначається по зсуву фаз модулюючих сигналів в початковому і прийнятому випромінюванні. Відстань є функцією різниці фаз, модуляції і визначається як:

$$D = \frac{c}{2f_m} \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right) \quad (4.3)$$

де f_m – частота модуляції, Гц; N – ціле число фазових циклів в загальному зсуві фаз; $\varphi / (2\pi)$ – дробова частина фазового циклу ($\varphi = 0 \dots 2\pi$).

Практично застосовуються в імпульсних далекомірах видимого і ближнього інфрачервоного спектру є довжини хвиль $\lambda_0 = 0,6943$ мкм; $\lambda_0 = 1,065$ мкм. Для фазових далекомірів $\lambda_0 = 0,6928$ мкм і $\lambda_0 = 0,84$ мкм. На цих довжинах хвиль створені технічно досконалі потужні імпульсні рубінові, неодимові гелій-неонові і напівпровідникові (на арсеніді галію) лазери. Стосовно цих лазерів складена таблиця 4.1, що містить деякі характеристики, необхідні для визначення дальності дії оптичних далекомірів. Дальність дії оптичного далекоміра залежить також від ступеня ослаблення потужності сигналу, несучого корисну інформацію, в атмосфері.

Таблиця 4.1

Характеристики для визначення дальності дії оптичних далекомірів

Методи вимірювання	Імпульсний метод вимірювання		Фазовий метод вимірювання	
	Рубіновий	Неодимовий	Гелій-неоновий	Напівпровідниковий
Характеристики лазерів				
Довжина хвилі, мкм	0,6943	1,065	0,6328	0,84
Вихідна потужність, Вт	$(1 - 2,5) \cdot 10^{-7}$	$(1 - 5) \cdot 10^{-7}$	10^{-3}	1
Розходження	20	20	1 - 10	20 - 30
Діаметр об'єктива приймальної системи, см	5 - 30	10 - 40	5 - 10	5 - 15
Коефіцієнт пропускання передавального каналу	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7	0,2 - 0,3	0,5 - 0,7
Тривалість імпульса випромінювання, нс	5 - 50	10 - 50	—	—
Відношення сигнал-шум	5 - 10	5 - 10	10	10
Середнє число електронів за інтервал спостереження	5 - 15	5 - 15	10^2	10^3
Коефіцієнт ослаблення енергії за одиницю довжини шляху променя, км ⁻¹	0,2 - 0,55	0,2 - 0,35	0,1 - 2	0,2 - 0,3
Коефіцієнт просторового розподілу відбитого сигналу	0,02 - 0,3	0,02 - 0,3	0,1 - 0,4	0,1 - 0,2

Наявність шуму, викликаного реєстрацією фотоприймача зворотного розсіяння в атмосфері, знижує рівень корисного сигналу, що приймається фотоприймачем. Потужність шуму, прийнята фотоприймачем від зворотного розсіяння дорівнює:

$$P_{\text{шп}} = \frac{(P_{\text{пер}} \cdot f(\omega) \cdot d_0^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot c \cdot \tau_i \cdot k(\lambda)) \cdot e^{-2k(\lambda)D_p^2}}{64D_p^2} \quad (4.4)$$

де $P_{\text{пер}}$ потужність передавача, Вт; $f(\omega)$ – функція, що враховує нерівномірність розподілу розсіяного потоку світла в атмосфері; d_0 – діаметр об'єктиву приймальної системи, см; τ_1, τ_2 – коефіцієнти пропускання передаючого і приймального каналу; τ_i – тривалість імпульсу $k(\lambda)$ – коефіцієнт ослаблення енергії на шляху променя, на одиницю шляху променя км^{-1} ; D_p – відстань до розсіюючого шару атмосфери, км.

В табл. 4.2 для далекомірів, мають $d_0 = 7 \text{ см}$, $P_{\text{пер}} = 1 \text{ мВт}$, приведена середня кількість фотоелектронів на фотоприймачі, обумовлена зворотнім розсіянням випромінювання в атмосфері.

Таблиця 4.2

Середнє число фотоелектронів в секунду, обумовлене зворотнім розсіянням

Тип імпульсного далекоміра	Довжина хвилі, мкм	Чутливість фотоприймача А/Вт	Коефіцієнт ослаблення, км^{-1}	Відстань до розсіюваного шару, км	Середнє число електронів в секунду
Рубіновий	0,6943	$5 \cdot 10^{-3}$	0,35	1	$8 \cdot 10^8$
				2	10^8
				6	10^6
Неодимовий	1,065	10^{-4}	0,22	1	$6 \cdot 10^6$
				2	$1,2 \cdot 10^6$
				6	$3 \cdot 10^4$

Для висот до 3 км над рівнем моря аерозольне розсіяння переважно над молекулярним поглинанням. Коефіцієнт ослаблення для чисельних оцінок можна визначити по формулі (4.5):

$$k(\lambda) = \frac{3,91}{S_{\text{м.д.в}}} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,58(S_{\text{м.д.в.}})^{\frac{1}{3}}} \quad (4.5)$$

Наприклад коефіцієнт ослаблення в атмосфері на рівні моря рівний 0,2...0,62 дБ/км. Геометричне ослаблення неминучо виникає, оскільки відношення потужностей, що приймаються і передаються, дорівнює:

$$\frac{P_{\text{ПР}}}{P_{\text{ПЕР}}} = \frac{4 \cdot S \cdot d_0^2}{(\gamma \cdot \gamma_p \cdot D^2)^2} \quad (4.6)$$

де S – площа поверхні відбивача, см²; γ – розходження I ; γ_p – розходження розсіяного випромінювання від поверхні, що дифузійно відбиває, рад. Наприклад, для оптичної антени діаметром $d_0 = 20$ см при розходженні $\gamma = \gamma_p = 50$ мрад і дальності $D = 15$ км через геометричне ослаблення назад приймається тільки 0,54% випромінюючої потужності.

Втрати щодо пропускання оптики далекоміра визначають співвідношенням:

$$\tau_{\text{ОП}} = \tau_1 \cdot \tau_2 \quad (4.7)$$

Типове значення пропущеної енергії випромінювання оптикою далекоміра від лазера до ФЕП дорівнює 10...15%.

Оцінку дальності імпульсних далекомірів слід проводити, використовуючи рівність з умови, що розміри об'єкту малі в порівнянні з відстанню і об'єкт випромінює енергію подібно точковому джерелу:

$$D = \left(\frac{P_{\text{ПЕР}} \cdot d_0^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot k_r \cdot \rho_\lambda \cdot e^{-2k(\lambda)D}}{4P_{\text{ПР}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

де k_r – коефіцієнт просторового розподілу відбитого сигналу; ρ_λ – коефіцієнт віддзеркалення від об'єкту.

Враховуючи величини, що входять у формулу (4.8), оптимальне відношення корисного сигналу до шуму $P_s/P_{\text{ш}}$, порогова кількість фотонів, яскравість випромінювання природного фону B_λ і чутливість фотоприймача ε_λ , для швидкості оцінки характеристик проектованої системи доцільно побудувати номограму (рис. 4.4). Для значень параметрів $k(\lambda) = 0,31/\text{см}$; $B_\lambda = 1,3 \cdot 10^{-2}$ кд/м²; $\varepsilon_\lambda = 10^{-3}$ А/Вт; $d_0 = 20$ см; $\rho_\lambda = 0,04$; $k_r = 0,4$; $\tau_1 = 0,7$; $\tau_2 = 0,6$; $P_{\text{вих}} = 10^7$ Вт; $\Delta\lambda = 10^{-7}$

см; $\lambda_0 = 0,6943 \cdot 10^{-4}$ см – отримаємо значення дальності виявлення об'єкту $D = 4,55$ км. Це ж значення D отримаємо, якщо скористатися виразом (4.8).

Оцінку дальності дії фазового далекоміра, можна виконувати, використовуючи формулу (4.9):

$$D = \left[\frac{P_{\text{ПЕР}} \cdot k_{\lambda} \cdot m_m \cdot d_0^2 \cdot \rho_{\lambda} \cdot \varepsilon_{\lambda}}{8(m_m + 1) \cdot \left(\frac{P_C}{P_{\text{Ш}}}\right) \cdot (2\Delta f \cdot S(\lambda))^{\frac{1}{2}} \cdot \gamma^2 \cdot \gamma_P} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.9)$$

де $k(\lambda) = 0,05 \dots 0,15$ – коефіцієнт використання випромінювання фотоприймачем; $m_m = 0,1 \dots 0,5$ – коефіцієнт модуляції; Δf – смуга пропускання приймального тракту, Гц; $S(\lambda)$ – спектральна щільність шумів. Значення інших рекомендованих параметрів, наступні: $P_C/P_{\text{Ш}} < 10$; $\rho_{\lambda} = 0,02 \dots 0,4$; $\varepsilon_{\lambda} = 10^{-3} \dots 10^{-4}$ А/Вт; $d_0 = 5 \dots 15$ см; $P_{\text{пер}} = 10^{-3} \dots 3$ Вт; $k(\lambda) = 0,1 \dots 0,5$ км⁻¹; $\Upsilon = 10 \dots 60$ мрад; $\Upsilon_P = (10^{-4} \dots 3,14)$ рад.

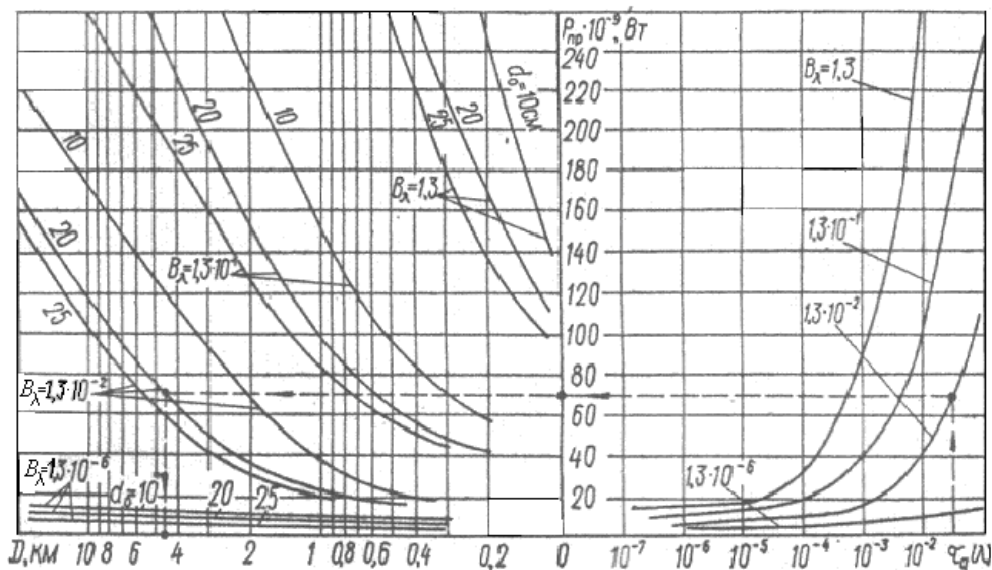


Рис. 4.4. Номограма для оцінки дальності дії імпульсних далекомірів

При використанні імпульсних далекомірів похибка у визначенні відстані до об'єкту визначається в загальному вигляді наступною залежністю:

$$\Delta D = \left(\frac{\partial D}{\partial P_{\text{ПЕР}}}\right) \cdot \left(\frac{\partial D}{\partial P_{\text{Ш}}}\right) \cdot \Delta P_{\text{ПЕР}} + \left(\frac{\partial D}{\partial k(\lambda)}\right) \cdot \Delta k(\lambda) + \left(\frac{\partial D}{\partial \tau_{\text{оп}}}\right) + \dots \quad (4.10)$$

При частоті калібрувальних 10 МГц і дальностях більш 1 км основним членом, що визначає помилку у вимірюванні дальності, є $(\partial D / \partial k(\lambda)) \cdot \Delta k(\lambda)$. Для дальності 20 км помилка у вимірюванні складає приблизно 0,6...1 м. У фазових далекомірах похибка у вимірюванні відстані:

$$\Delta D = \frac{v \Delta(\delta\varphi)}{4\pi f_m} \quad (4.11)$$

де $\Delta(\delta\varphi)$ похибка визначення фази; v – швидкість світла в атмосфері.

Цю похибку можна зменшити за рахунок збільшення частоти модуляції f_m або шляхом удосконалення вимірювального пристрою і зменшення $\Delta(\delta\varphi)$. Так, наприклад, підвищення частоти модуляції до 850 Гц і застосування рахунково-імпульсного фазовимірювального пристрою в далекомірі ГД-317М дозволило зменшити помилку вимірювання до ± 3 мм (рис. 4.5). Ще більш висока точність вимірювання досяжна при використанні модуляції випромінювання в НВЧ діапазоні. При вимірюванні відстані до декілька десятків метрів далекоміром з газовим лазером при частоті модуляції 2000 мГц помилка вимірювання не перевищує $\pm 0,1$ мм. Порівняльний аналіз похибок фазових і імпульсних далекомірів показує, що інструментальна похибка імпульсних далекомірів значно вище за фазові і складає не менше 0,5... 1,5 м. Це обумовлено принципово різними методами отримання інформації про дальність. У фазових далекомірах обробка сигналу здійснюється перемноженням прийнятого і опорного (еталонного) сигналів з подальшою інтеграцією результату. При цьому помилки, що викликаються нестабільністю фази, виключаються, оскільки результати відліків віднімаються при визначенні відстані і відстані, що вимірюється відповідно калібрувальній дистанції далекоміра. В імпульсних системах обробка інформації проводиться засобами імпульсної і цифрової техніки, що не дозволяє довести похибку вимірювання тимчасового інтервалу до рівня, меншого 5... 10 нс.

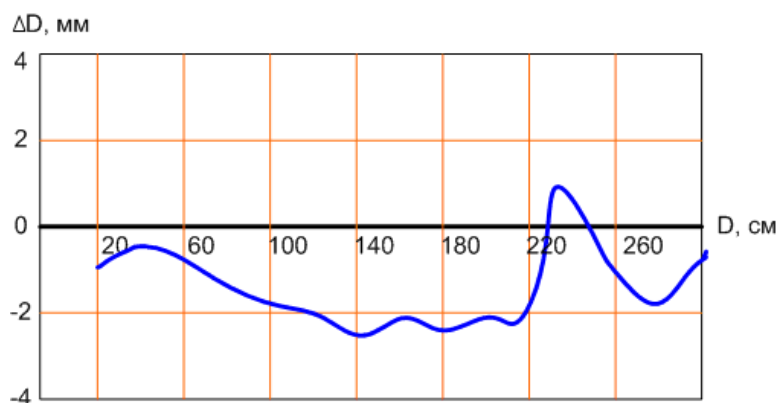


Рис. 4.5. Похибка вимірювання дальності ΔD в межах фазового циклу далекоміра

4.2. Дослідження оцінки максимальної дальності імпульсного лазерного далекоміра

Розрахунок зробимо стосовно до імпульсного лазерного далекоміра, що працює в умовах атмосфери.

У випадку гауссовського амплітудного розподілу шумів у прийомному тракті ІЛД рівняння дальності дії ІЛД приймає вид

$$R_{\max}^4 = \frac{P_I k_0 d_{об}^2 S_{Ц} \rho_{Ц} e^{-2\sigma_{\lambda} R_{\max}}}{4\pi^2 \theta_{Л} q P_{ГР}}, \quad (4.12)$$

де P_I – імпульсна потужність лазера;

k_0 – коефіцієнт пропускання приймально-передавальної системи;

$d_{об}$ – діаметр входної зіниці об'єктива прийомної оптичної системи;

$S_{Ц}$ – геометрична площа поперечного переріза цілі;

$\rho_{Ц}$ – коефіцієнт відбиття цілі;

$\theta_{Л}$ – розходження лазерного пучка на виході передавальної оптичної системи;

q – відношення сигнал/шум, обумовлене заданими ймовірностями правильного виявлення D і фіктивної тривоги F ;

$P_{ГР}$ – гранична потужність оптичного сигналу, що характеризує чутливість фотодетектора прийомного тракту на хвилі випромінювання лазера;

σ_{λ} – коефіцієнт ослаблення лазерного випромінювання.

Перетворимо це рівняння

$$R_{\max}^4 e^{2\sigma_\lambda R_{\max}} = \frac{P_I k_0 d_{об}^2 S_{Ц} \rho_{Ц}}{4\pi^2 \theta_{Л} q P_{ГР}}, \quad (4.13)$$

$$R_{\max} e^{\sigma_\lambda R_{\max}/2} = \left(\frac{P_I k_0 d_{об}^2 S_{Ц} \rho_{Ц}}{4\pi^2 \theta_{Л} q P_{ГР}} \right)^{1/4}. \quad (4.14)$$

Отримуємо формулу для знаходження $P_{ГР}$.

У ФЕП струм дробового ефекту фотокатода підсилюється в кожному каскаді нарівні з корисними сигналами, тоді з урахуванням дробового струму першого емітера на виході першого каскаду буде мати:

$$\overline{i_{Д1}^2} = (\overline{i_{Д} m_{1E}})^2 + 2e i_1 \Delta f, \quad (4.15)$$

де $i_{Д}$ – струм дробового ефекту фотокатода;

m_{1E} – коефіцієнт підсилення першого каскаду ФЕП;

$2e i_1 \Delta f$ – струм дробового ефекту першого емітера;

$i_1 = i_\phi m_{1E}$ – струм першого емітера;

i_ϕ – струм фотокатода.

Розкриваючи перший доданок в (4.15), знайдемо струм дробового ефекту на виході першого каскаду:

$$\overline{i_{Д1}^2} = 2e i_\phi \Delta f m_{1E}^2 + 2e i_\phi m_{1E} \Delta f = \overline{i_{Д}^2} m_{1E} (1 + m_{1E}) \quad (4.15a)$$

Можна показати, що дробовий струм на виході другого каскаду буде:

$$\overline{i_{Д2}^2} = \overline{i_{Д}^2} m_{1E} m_{2E} (1 + m_{2E} + m_{1E} m_{2E}),$$

а на виході n -го каскаду

$$\overline{i_{Дn}^2} = \overline{i_{Д}^2} m_{1E} m_{2E} \dots m_{nE} (1 + m_{nE} + m_{nE} m_{(n-1)E} \dots m_{2E} m_{1E}).$$

Якщо вважати, що $m_{1E} = m_{2E} = \dots = m_{nE} = m_E$ й $m_E^n = M$, то для розрахунку середнього квадрата дробового струму на виході n -го одержимо вираз

$$\overline{I_{Д}^2} = 2e i_\phi \Delta f M^2 \frac{m_E^{n+1} + 1}{m_E - 1}. \quad (4.16)$$

Оскільки $m_E^{n+1} \gg 1$, то вираз (4.16) перетвориться до виду

$$\overline{I_D^2} = 2ei_\phi \Delta f M^2 \frac{m_E}{m_E - 1}. \quad (4.17)$$

В ідеальному випадку, коли дробовий ефект на емітерах відсутній, множника $m_E / (m_E - 1)$ в (4.17) немає. У реальних умовах дробовий ефект емітера впливає на величину дробового струму помножувача й ураховується множителем $(1+B) = m_E / (m_E - 1)$. Тоді

$$\overline{I_D^2} = 2ei_\phi \Delta f M^2 (1+B). \quad (4.18)$$

У ФЕП з електростатичним фокусуванням величина множника $(1+B)$ коливається в межах 1,5 – 3 і приймається рівної $1+B = 2,5$.

Тепловий шум на навантажувальному опорі ФЕП розраховується по формулах

$$\overline{U_{менл}^2} = 4kTR_H \Delta f; \quad \overline{I_{менл}^2} = \frac{4kT\Delta f}{R_H},$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·град⁻¹ – постійна Больцмана;

T – температура провідника;

$R_H(f)$ – функція, що описує залежність опору провідника від частоти;

$f_2 - f_1 = \Delta f$ – смуга частот.

Тоді середнє квадратичне значення сумарного струму на вході підсилювача буде:

$$\sqrt{\overline{I_{ш}^2}} = \sqrt{\overline{I_D^2} + \overline{I_{менл}^2}} = \sqrt{2ei_\phi \Delta f M^2 (1+B) + 4kT\Delta f R_H^{-1}}. \quad (4.19)$$

У цій формулі перший доданок характеризує власні шуми ФЕП, а другий – шум, внесений підсилювачем.

Гранична потужність ФЕП визначається виразом

$$P_{ГР} = \frac{\sqrt{\overline{I_{ш}^2}}}{S_{ФЕП}^{св}}, \quad (4.20)$$

де $S_{ФЕП}^{св}$ – інтегральна чутливість фотопомножувача, а/лм.

Підставляючи в (4.20) значення $\overline{I_{ш}^2}$ з (4.19), одержимо

$$P_{ГР} = \frac{\sqrt{2[e i_{\phi} \Delta f M^2 (1+B) + 2kT \Delta f R_H^{-1}]}}{S_{\phi \Delta V}^{св}}. \quad (4.21)$$

Можна показати, що в реальних схемах для більшості ФЕП другий доданок підкореневого виразу досить малий у порівнянні з першим, тобто виконується умова

$$2 \frac{kT}{R_H} \gg e i_{\phi} M^2 (1+B) \quad (4.22)$$

або

$$2 \frac{kT}{e} \ll R_H i_{\phi} M^2 (1+B).$$

Зневажаючи на цій підставі другим доданком - тепловими шумами, з (4.21) одержуємо вираз для граничної потужності

$$P_{ГР} = \frac{\sqrt{2e i_{\phi} \Delta f M^2 (1+B)}}{S_{\phi EP}^{св}}, \quad (4.23)$$

де $i_{\phi} = i_0 + i_T$ – сумарний струм фотокатода;

i_T – темновий струм фотокатода;

i_0 – постійна складова струму фотокатода.

Очевидно, що виявлення й вимір малих потоків, сумірних із граничними значеннями, лімітується дробовим шумом, що залежить від величини темнового струму, у порівнянні з яким постійної складової фотоструму можна зневажити.

Тоді

$$P_{ГР} = \frac{\sqrt{2e i_T M^2 (1+B) \Delta f}}{S_{\phi EP}^{св}}. \quad (4.24)$$

Отримана формула є практично основною формулою для розрахунку граничної потужності ФЕП.

M знайдемо із залежності інтегральної чутливості всього ФЕП від інтегральної чутливості фотокатода

$$M = \frac{S_{\phi EP}^{св}}{S_{\phi к}^{св}}. \quad (4.25)$$

З урахуванням (4.25) з (4.24) для розрахунку величини граничної потужності фотопомножувача одержимо залежності:

- при смузі пропущення Δf

$$P_{ГР} = \frac{\sqrt{2e i_T (1+B) \Delta f}}{S_{фк}^{св}} = \frac{\sqrt{5e i_T \Delta f}}{S_{фк}^{св}}; \quad (4.26)$$

- при одиничній смузі пропущення $\Delta f = 1 \text{ Гц}$

$$P_{ГР} = \frac{\sqrt{2e i_T (1+B)}}{S_{фк}^{св}} = \frac{\sqrt{5e i_T}}{S_{фк}^{св}}. \quad (4.27)$$

4.3. Дослідження максимальної дальності лазерних далекомірів й побудова графіків

Параметри цілі візьмемо наступні:

– $S_{Ц} = 1 - 10 \text{ м}^2$;

– $\rho_{Ц} = 0,1 - 0,8$, залежно від матеріалу й виду покриття.

Зробимо розрахунок імпульсного лазерного далекоміра, що має наступні параметри:

– передавач із лазером на кристалі рубіна з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,6943 \text{ мкм}$;

– $P_l = 5 - 15 \text{ мВт}$, залежно від типу лазера;

– $k_0 = 0,2$;

– $d_0 = 5 - 30 \text{ см}$;

– $\theta_l = 0,5 - 1 \text{ мрад}$;

– q для здійснення надійного виявлення ехо-сигналу повинне перебувати в межах $5 - 10$;

– $\sigma_\lambda = 0,2 - 5 \text{ км}^{-1}$;

– $i = (2 - 3) \cdot 10^{-7} \text{ а}$ (ФЕП-28);

– $S_{фк}^{св} = 15 - 20 \text{ мка/лм}$ (ФЕП-28).

Для нашого випадку візьмемо:

– $P_l = 15 \text{ мВт}$, залежно від типу лазера;

– $k_0 = 0,2$;

– $d_{об} = 10 \text{ см}$;

– $S_{ц} = 5 \text{ м}^2$;

– $\rho_{ц} = 0,2$ — ціль, пофарбована емалевою фарбою;

– $\theta_L = 1 \text{ мрад}$;

– $q = 10$;

– $\sigma_\lambda = 0,2 \text{ км}^{-1}$;

– $i = 3 \cdot 10^{-7} \text{ а}$ (ФЕП-28);

– $S_{фк}^{св} = 20 \text{ мка/лм}$ (ФЕП-28).

З формули (4.27) $P_{ГР} = 2,451 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}$.

Тоді з (4.12) $R_{max} = 4,675 \text{ км}$.

Дослідимо залежності $R_{max} e^{\sigma_\lambda R_{max}/2}$ від різних параметрів. Позначимо $R_{max} e^{\sigma_\lambda R_{max}/2}$ як D .

Спочатку дослідимо залежність $R_{max} e^{\sigma_\lambda R_{max}/2}$ від параметрів, що відносяться до оптичної приймально-передавальної системи.

Для $d_{об} = 5 - 30 \text{ см}$ графік залежності $R_{max} e^{\sigma_\lambda R_{max}/2}(d_{об})$ буде наступним.

Позначимо:

– при $\theta_L = 0,5 \text{ мрад}$ – $D_1(d_{об})$; $\theta_L = 0,6 \text{ мрад}$ – $D_2(d_{об})$; $\theta_L = 0,7 \text{ мрад}$ – $D_3(d_{об})$;
 $\theta_L = 0,8 \text{ мрад}$ – $D_4(d_{об})$; $\theta_L = 0,9 \text{ мрад}$ – $D_5(d_{об})$; $\theta_L = 1,0 \text{ мрад}$ – $D_6(d_{об})$.

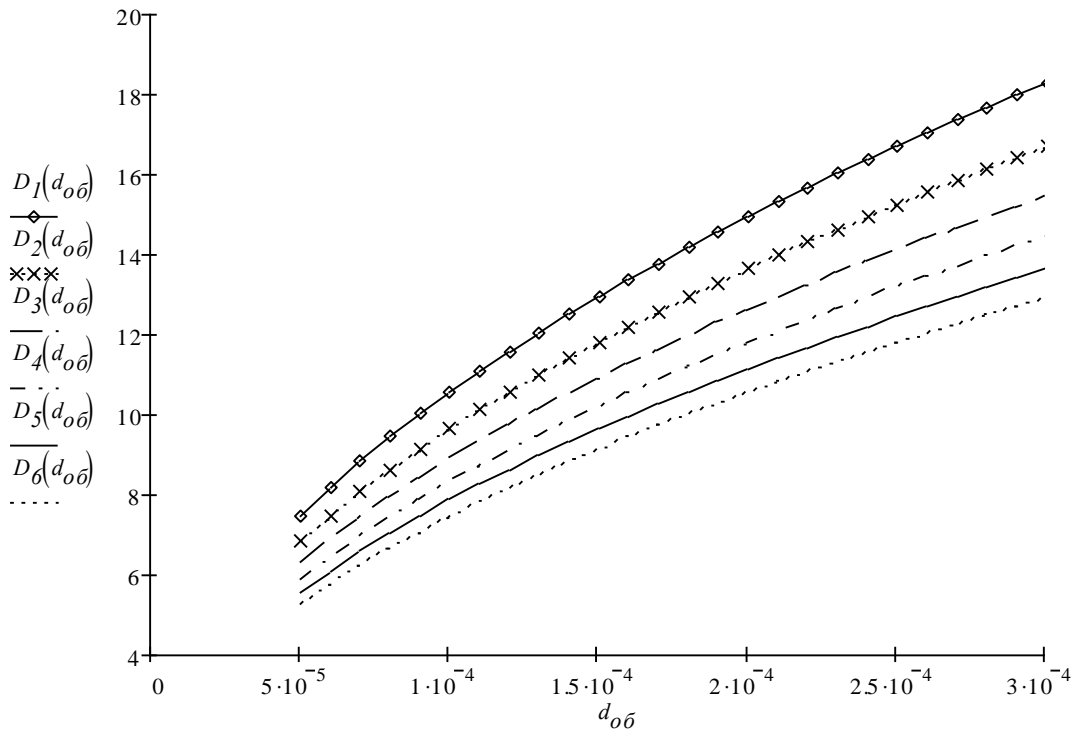


Рис. 4.6. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(d_{ob})$.

Для $\theta_L = 0,5 - 1$ мрад графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(\theta_L)$ буде наступним.

Позначимо:

- при $d_{ob} = 5$ см – $D_1(\theta_L)$; $d_{ob} = 10$ см – $D_2(\theta_L)$; $d_{ob} = 15$ см – $D_3(\theta_L)$; $d_{ob} = 20$ см – $D_4(\theta_L)$; $d_{ob} = 25$ см – $D_5(\theta_L)$; $d_{ob} = 30$ см – $D_6(\theta_L)$.

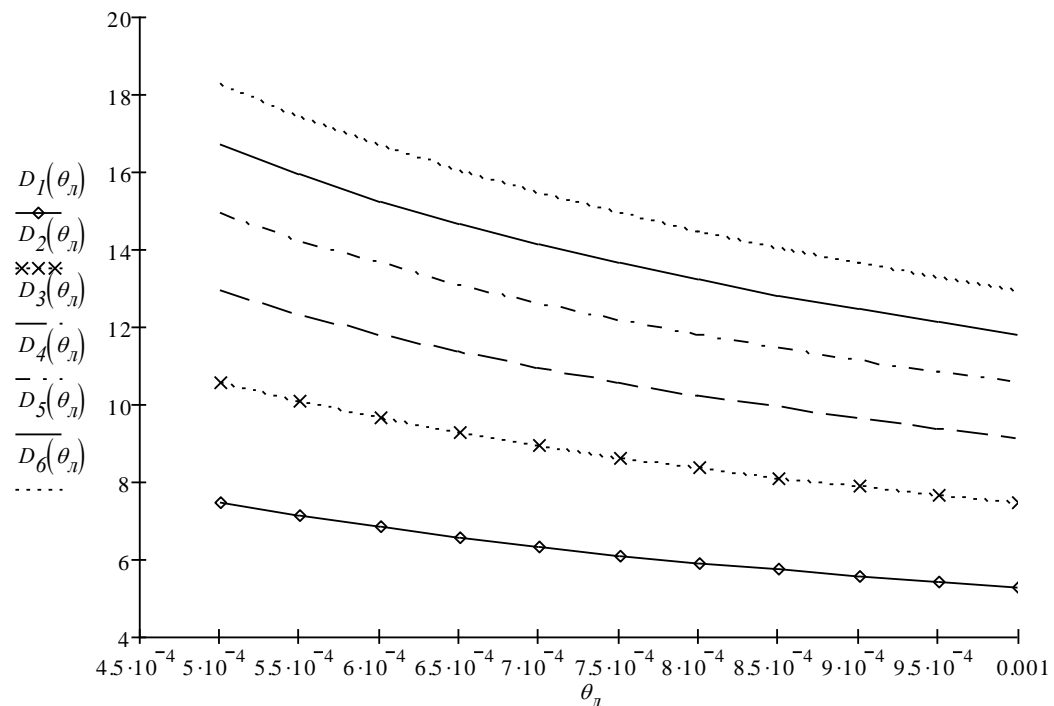


Рис 4.7. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(\theta_{II})$.

Дослідимо залежність $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}$ від параметрів, що відносяться до цілі.

Для $S_{II} = 1 - 10 \text{ м}^2$ графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(S_{II})$ буде наступним.

Позначимо: при $\rho_{II} = 0,1 - D_1(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,2 - D_2(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,3 - D_3(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,4 - D_4(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,5 - D_5(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,6 - D_6(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,7 - D_7(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,8 - D_8(S_{II})$.

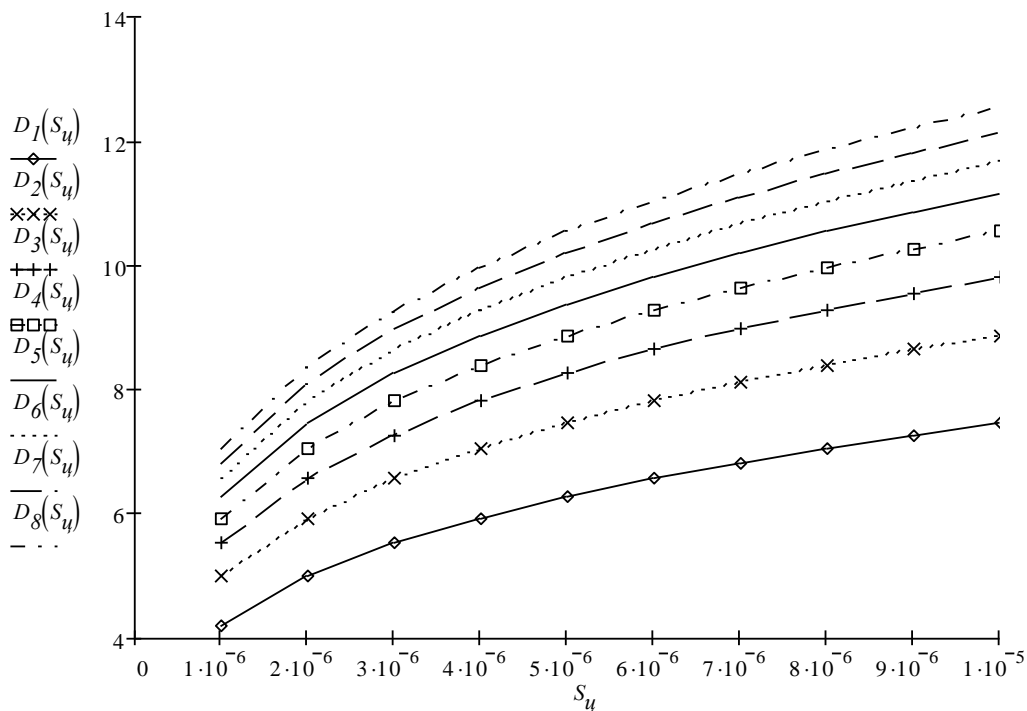


Рис 4.8. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(S_{II})$.

Для $\rho_{II} = 0,1 - 0,8$ графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(\rho_{II})$ буде наступним.

Позначимо:

– при $S_{II} = 1 \text{ м}^2 - D_1(\rho_{II})$; $S_{II} = 2 \text{ м}^2 - D_2(\rho_{II})$; $S_{II} = 3 \text{ м}^2 - D_3(\rho_{II})$; $S_{II} = 4 \text{ м}^2 - D_4(\rho_{II})$; $S_{II} = 5 \text{ м}^2 - D_5(\rho_{II})$; $S_{II} = 6 \text{ м}^2 - D_6(\rho_{II})$; $S_{II} = 7 \text{ м}^2 - D_7(\rho_{II})$; $S_{II} = 8 \text{ м}^2 - D_8(\rho_{II})$;

$S_{II} = 9 \text{ м}^2 - D_9(\rho_{II})$;

$S_{II} = 10 \text{ м}^2 - D_{10}(\rho_{II})$.

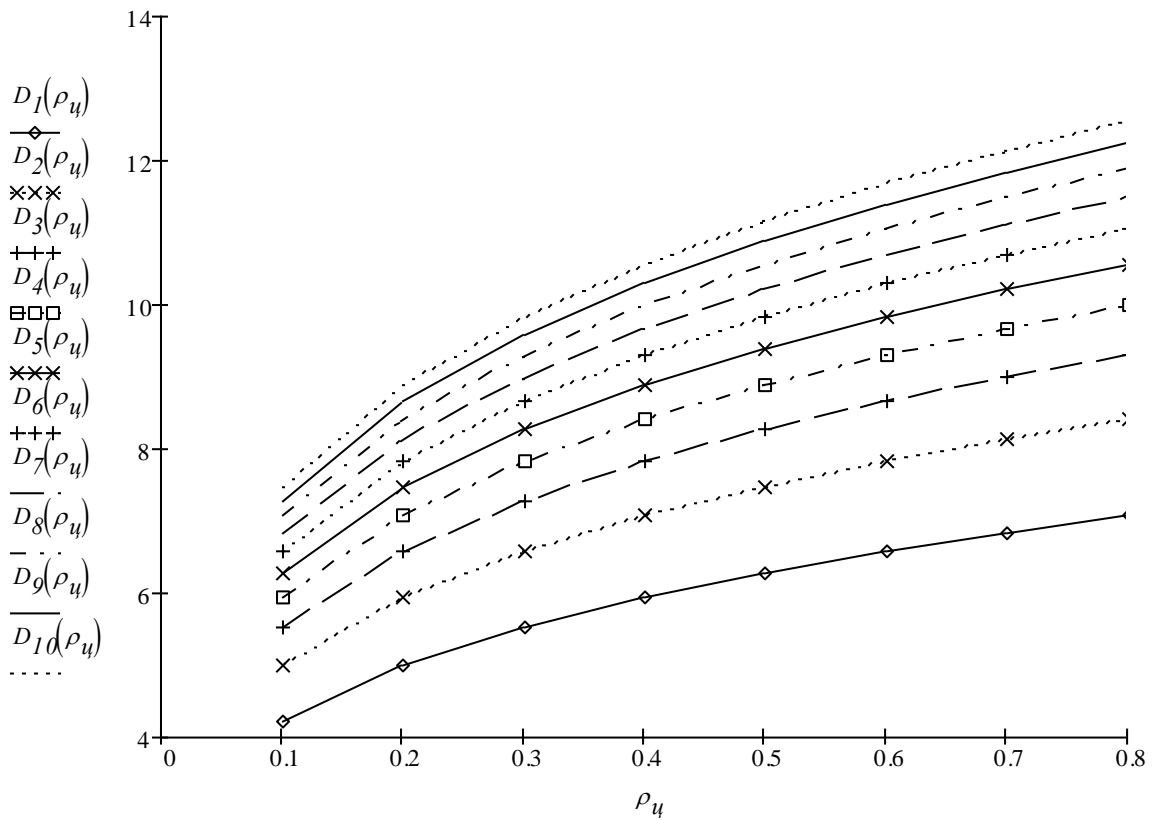


Рис. 4.9. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(\rho_u)$

Дослідимо залежність $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}$ від параметрів, що ставляться до лазера передавача ІЛД.

Для $P_I = 5 - 15$ мВт графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(P_{II})$ буде наступним

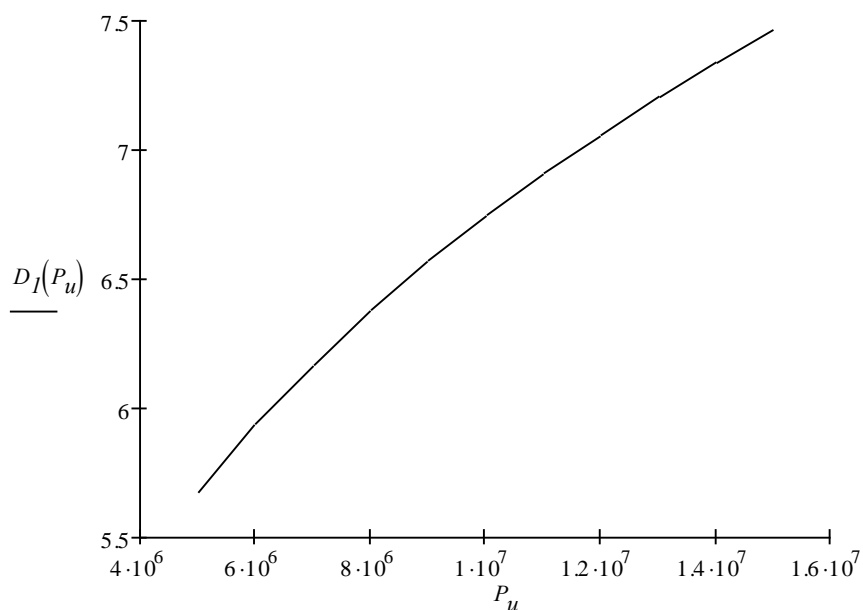


Рис. 4.10. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(P_{II})$.

Зробимо ще один розрахунок іншого імпульсного лазерного далекоміра, що має наступні параметри:

– передавач із лазером на кристалі напівпровідника (лазерного діода) з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,84$ мкм;

– $P_I = 2 - 1000$ Вт, залежно від типу лазера;

– $k_0 = 0,2$;

– $d_{об} = 5 - 15$ см;

– $\theta_L = 0,5 - 1$ мрад;

– q для здійснення надійного виявлення ехо-сигналу повинне перебувати в межах $5 - 10$;

– $\sigma_\lambda = 0,2 - 5$ км⁻¹;

– $i = 6 \cdot 10^{-8}$ а (ФЕП-62);

– $S_{фк}^{св} = 15$ мка/лм (ФЕП-62).

Для нашого випадку візьмемо:

– $P_I = 300$ Вт, залежно від типу лазера;

– $k_0 = 0,2$;

– $d_{об} = 10$ см;

– $S_{Ц} = 5$ м²;

– $\rho_{Ц} = 0,2$ — ціль, пофарбована емалевою фарбою;

– $\theta_L = 1$ мрад;

– $q = 10$;

– $\sigma_\lambda = 0,2$ км⁻¹;

– $i = 6 \cdot 10^{-8}$ а (ФЕП-62);

– $S_{фк}^{св} = 15$ мка/лм (ФЕП-28).

З формули (4.26) $P_{ГР} = 1,462 \cdot 10^{-8}$ Вт.

Тоді з (4.12) $R_{max} = 0,538$ км.

Дослідимо залежності $R_{max} e^{\sigma_\lambda R_{max}/2}$ від різних параметрів. Позначимо

$R_{max} e^{\sigma_\lambda R_{max}/2}$ як D .

Спочатку дослідимо залежність $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}$ від параметрів, що відносяться до оптичної приймально-передавальної системи.

Для $d_{o\delta} = 5 - 15$ см графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}(d_{o\delta})$ буде наступним.

Позначимо:

– при $\theta_{\text{Л}} = 0,5$ мрад – $D_1(d_{o\delta})$; $\theta_{\text{Л}} = 0,6$ мрад – $D_2(d_{o\delta})$; $\theta_{\text{Л}} = 0,7$ мрад – $D_3(d_{o\delta})$;
 $\theta_{\text{Л}} = 0,8$ мрад – $D_4(d_{o\delta})$; $\theta_{\text{Л}} = 0,9$ мрад – $D_5(d_{o\delta})$; $\theta_{\text{Л}} = 1,0$ мрад – $D_6(d_{o\delta})$.

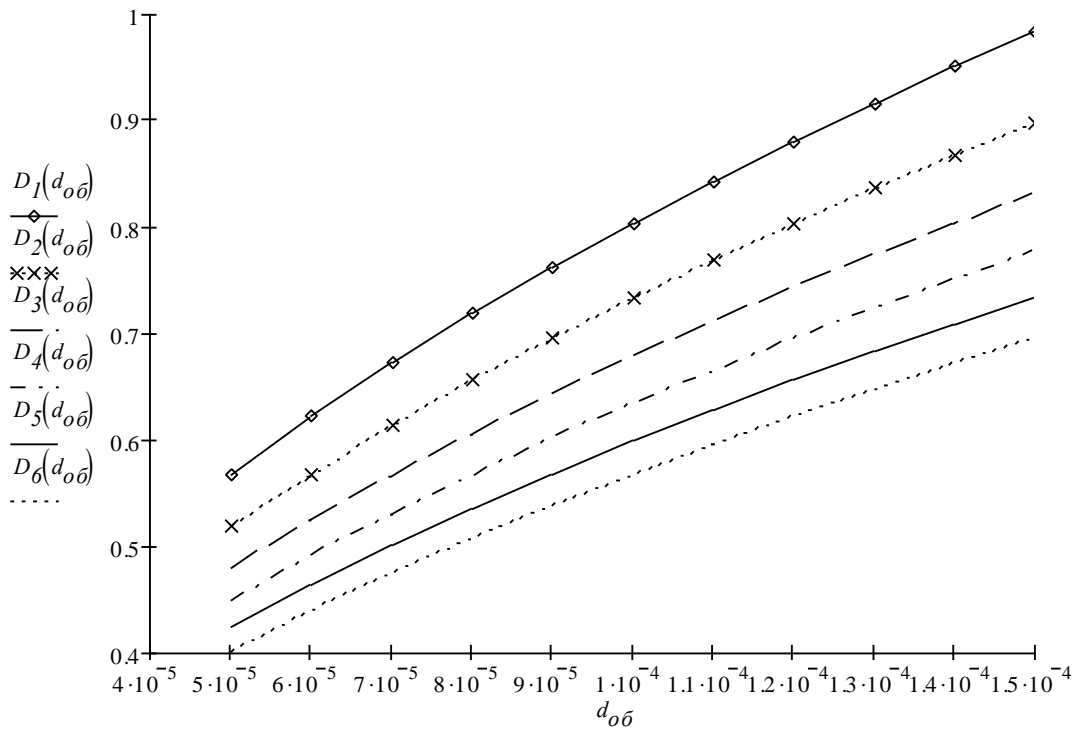


Рис. 4.11. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}(d_{o\delta})$.

Для $\theta_{\text{Л}} = 0,5 - 1$ мрад графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}(\theta_{\text{Л}})$ буде наступним.

Позначимо:

- при $d_{o\delta} = 5$ см – $D_1(\theta_{\text{Л}})$;
- при $d_{o\delta} = 7$ см – $D_2(\theta_{\text{Л}})$;
- при $d_{o\delta} = 9$ см – $D_3(\theta_{\text{Л}})$;
- при $d_{o\delta} = 11$ см – $D_4(\theta_{\text{Л}})$;
- при $d_{o\delta} = 13$ см – $D_5(\theta_{\text{Л}})$;
- при $d_{o\delta} = 15$ см – $D_6(\theta_{\text{Л}})$.

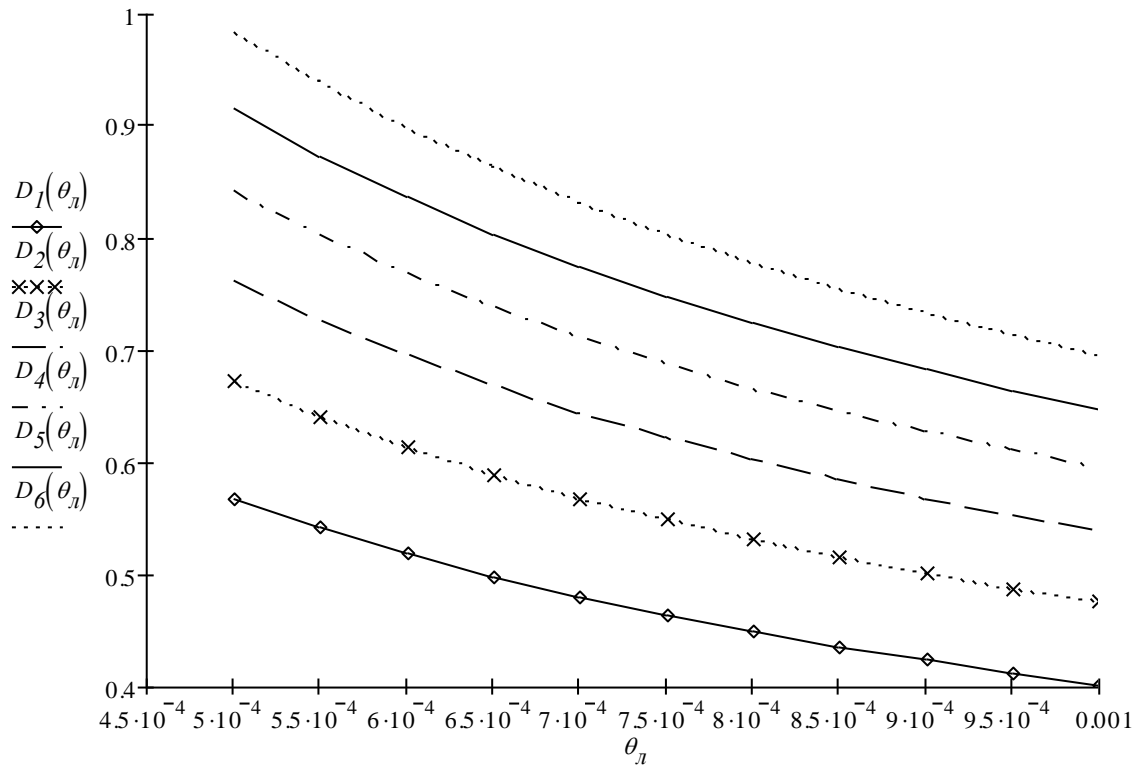


Рис. 4.12. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(\theta_{II})$.

Дослідимо залежність $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}$ від параметрів, що відносяться до цілі.

Для $S_{II} = 1 - 10 \text{ м}^2$ графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(S_{II})$ буде наступним.

Позначимо:

- при $\rho_{II} = 0,1 - D_1(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,2 - D_2(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,3 - D_3(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,4 - D_4(S_{II})$;
- $\rho_{II} = 0,5 - D_5(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,6 - D_6(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,7 - D_7(S_{II})$; $\rho_{II} = 0,8 - D_8(S_{II})$.

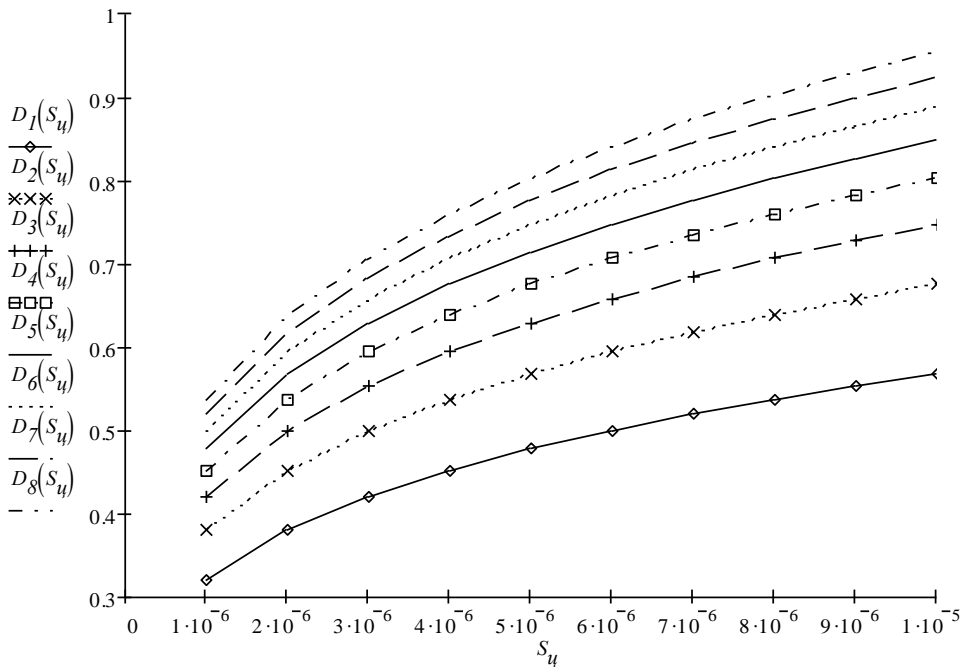


Рис. 4.13. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(S_U)$

Для $\rho_U = 0,1 - 0,8$ графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(\rho_U)$ буде наступним.

Позначимо: $S_U = 1 m^2 - D_1(\rho_U)$; $S_U = 2 m^2 - D_2(\rho_U)$; $S_U = 3 m^2 - D_3(\rho_U)$; $S_U = 4 m^2 - D_4(\rho_U)$; $S_U = 5 m^2 - D_5(\rho_U)$; $S_U = 6 m^2 - D_6(\rho_U)$; $S_U = 7 m^2 - D_7(\rho_U)$; $S_U = 8 m^2 - D_8(\rho_U)$; $S_U = 9 m^2 - D_9(\rho_U)$; $S_U = 10 m^2 - D_{10}(\rho_U)$.

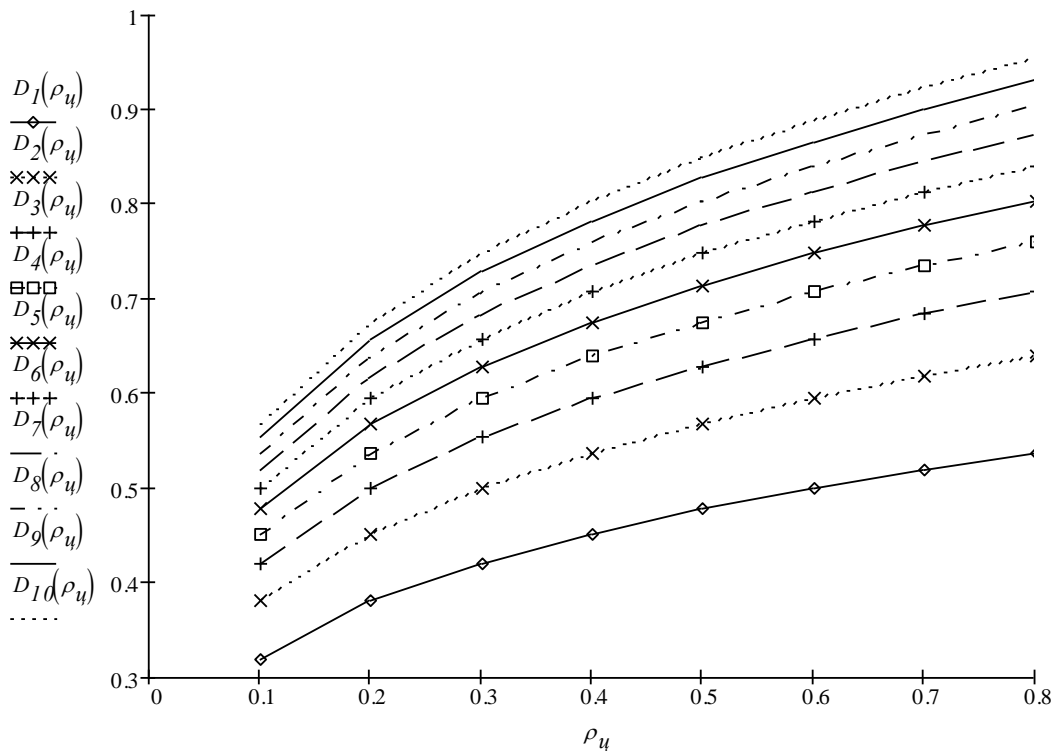


Рис.4.14. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(\rho_U)$.

Дослідимо залежність $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}$ від параметрів, що відносяться до лазера передавача ІЛД.

Для $P_I = 2 - 1000 \text{ Вт}$ графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(P_I)$ буде наступним.

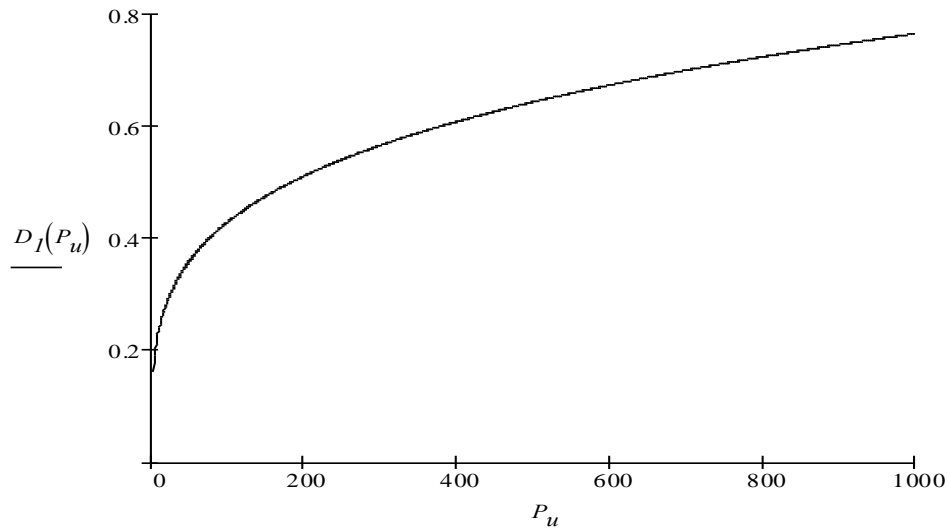


Рис. 4.15. Графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max} / 2}(P_I)$.

Розділ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів

У процесі праці у виробничій обстановці на людину впливає або один, або ряд небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Для запобігання цих впливів на працівників при розробці нових приладів, контрольних установок і стендів необхідно дотримуватися вимог з охорони праці.

Державним стандартом ГОСТ 12.1.003 – 74 (ССВГ. Небезпечні й шкідливі виробничі фактори. Класифікація) усі небезпечні і шкідливі виробничі фактори класифіковані на наступні групи: фізичні, хімічні, біологічні і психофізіологічні.

Розробляемі блоки системи вимірювання дальності розміщені у відсіку літака.

При технічній експлуатації і ремонті (ТЕ і Р) розробленої системи мають місце наступні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

– машини (АПА, АМЗА, АМЗВ і т.д.), що рухаються, і механізми (на площадці техобслуговування пересувні джерела живлення, піднімальні механізми і т.д.) при перевірці, монтажі системи;

– підвищене значення напруги в електричному ланцюгу і поява його металоведучих елементах конструкції авіаційного устаткування (АТ), що може привести до замикання ланцюга через тіло людини, близькість проводки і штепсельних роз'ємів;

– незахищені рухливі елементи виробничого устаткування, система електропостачання пересувний КПА при ТО системи;

<i>Кафедра авіоніки</i>				<i>НАУ 20 16 06 000 ПЗ</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Туз О.К.</i>			Охорона праці	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Слободян О.П.</i>					103	116
<i>Консульт..</i>							103
<i>Н. Контр.</i>	<i>Левківський В.</i>				173 201 «Авіоніка»		
<i>Затверд.</i>	<i>Паєлова С.В.</i>						

– підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони, у зв'язку з недостатньою вентиляцією відбувається скупчення CO₂, виділення летучих компонентів лакофарбових покриттів, ізолюючих матеріалів у процесі їхнього старіння;

– підвищена або знижена температура повітря робочої зони (відсутнє опілення літака під час ТЕ) при технічному обслуговуванні системи в зимових умовах;

– підвищення рівня вібрації, електромагнітні випромінювання в робочій зоні (близькість при запуску авіаційних двигунів, бортовий РЛС) ;

– відсутність чи недолік природного освітлення (тільки штучне освітлення) при ТО в нічний час;

– незручне розташування робочого місця (у зв'язку з прагненням економії маси й обсягу при конструюванні ЛА явний недолік вільного простору для робочого місця).

5.2. Організаційні і технічні заходи щодо виключення або зменшення рівня небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Розроблена система забезпечує максимальну безпеку при ТЕ і Р відповідно до системи стандартів безпеки праці ССБТ. ДСТ 12.І.004-91 (ССБТ. Пожежна безпека. Загальні вимоги), вказує про основні заходи безпеки, прийняті при розробці системи:

– для виключення випадкового дотику до струмопровідних частин пристрій міститься в кожуху;

– електричний монтаж виконаний на друкованих платах, що значною мірою зменшує кількість монтажних проводів, знижує ймовірність коротких замикань і дії навколишнього середовища;

– у монтажі використовується провід марки 4БШУ багатопровідні ізольовані обмоткою із шовку і припустимою робочою температурою $T = (\text{від } - 50 \text{ до } + 70) \text{ } ^\circ\text{C}$;

– захист проектованої системи на напівпровідникових приладах характерна тим, що напівпровідникові прилади мають дуже малу теплову інерцію, тому плавкі вставки запобіжників вибирають виходячи з номінального струму, що протікає в ланцюгах.

При профілактичних оглядах під час ТЕ обмежуються лише зовнішнім оглядом і перевіркою надійності кріплення блоків, відсутністю хімічних ушкоджень і наявності контровки на ШР.

При ТЕ ПС, особливо в сиру погоду необхідно використовувати сухе гумове взуття чи ізолюючі коврики, опір яких включається послідовно з опором тіла людини. Для усунення можливості поразки електричним струмом передбачається ряд мір: при ТЕ системи електропостачання ПС необхідно пам'ятати, що літак відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою поразки струмом через високопровідну поверхню корпусу.

Під час робіт, пов'язаних з оглядом, монтажем і демонтажем електричних агрегатів, необхідно знеструмлювати мережу. При проведенні чи перевірки огляду електричних пристроїв під напругою необхідно дотримувати обережність щоб уникнути коротких замикань і поразки електричним струмом. Перед відходом з робочого місця необхідно відключити в обов'язковому порядку бортову мережу, коробки реле і електрощітки закрити кришками, заізолювати оголені кінці проводів. Перед подачею електроенергії на борт ПС переконатися, що всі АЗС відключені, а перемикачі виключені. Всі агрегати електрообладнання перед установкою на літак перевіряють на відповідність НТП.

Для захисту від ушкодження і дотику розроблена система вкладена в захисний корпус. Створення сприятливих умов праці і підвищення культури виробництва у великому ступені забезпечується благоустроєм робочих місць виробничих приміщень, наприклад, авіатехнічної бази, лабораторії з технічного обслуговуванню електричного приладного обладнання.

Важливий зміст приміщень відповідно до гігієнічних вимог «Стандартних норм і правил». Норми температури, відносній вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні технічного відсіку зазначені в ДСТ 12.1.005 - 88 (ССБТ. Повітря

робочої зони. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги). У таблиці 5.1 зазначені норми параметрів для легких фізичних робіт.

Таблиця 5.1

Норми параметрів для легких фізичних робіт

Параметри	Для холодного і перехідного періоду	Для теплого періоду року
Температура повітря, град. С	18 - 20	21 - 33
Відносна вологість, %	40 - 60	40 - 60
Швидкість руху повітря, м/с.	0,02	0,3

Розрахунок захисного заземлення

Розрахунок заземлюючого пристрою виконують для визначеної кількості вертикальних заземлювачів, довжини сполучної смуги і розміщення цих елементів. При цьому враховують можливість використання природних заземлювачів.

Визначимо розрахункові значення питомого опору ґрунту для вертикальних заземлювачів ($\rho'_{розр}$) і сполучної смуги ($\rho''_{розр}$):

$$\rho'_{розр} = \rho k'_n$$

$$\rho''_{розр} = \rho k''_n$$

де ρ – питомий опір ґрунту, Ом*м;

k'_n, k''_n - коефіцієнт кліматичної зони.

$$\rho'_{розр} = 0,4 \cdot 10^2 \cdot 0,5 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\rho''_{розр} = 0,4 \cdot 10^2 \cdot 2,0 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Визначаємо опір розтікання струму одного вертикального заземлювача по формулі:

$$R_{гр} = 0,366 \frac{\rho'_{розр}}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4H + l}{4H - l} \right)$$

де l - довжина заземлювача, м

d – діаметр

H – відстань від поверхні землі до половини довжини труби, м

$$R_{TP} = 0,366 \frac{20}{2,5} \left(\lg \frac{2 \cdot 2,5}{0,05} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2 + 2,5}{4 \cdot 2 - 2,5} \right) = 15 \text{ Ом}$$

Визначимо умовну кількість вертикальних заземлювачів:

$$\eta' = \frac{R_{TP}}{R_{дон}} = \frac{15}{4} \approx 4$$

Коефіцієнт використання одиночного заземлювача, враховуючи екранування труб

$$\eta_{TP} = 0,8$$

Визначаємо дійсне число вертикальних заземлювачів по формулі:

$$\eta = \frac{\eta'}{\eta_{TP}} = \frac{4}{0,8} = 5$$

Обчислюємо довжину смуги, що з'єднує вертикальні заземлювачі

$$L = 1,05 \cdot a \cdot \eta$$

де a - відстань між заземлювачами

$$L = 1,05 \cdot 2 \cdot 5 = 10,5 \text{ м}$$

Опір розтікання струму, об'єднуючий заземлювачі визначається за формулою:

$$R_M = \frac{0,366}{L} \rho''_{розр} \cdot \lg \frac{2L^2}{b \cdot h}$$

де h – глибина закладення смуги сполучення;

b – ширина смуги.

$$R_M = \frac{0,366}{10,5} 80 \cdot \lg \frac{2 \cdot 10,5^2}{0,04 \cdot 0,8} = 10,7 \text{ Ом}$$

Коефіцієнт, що враховує екранування смуги сполучення і вертикальних заземлювачів $\eta_M = 0,03$

Визначимо опір розтікання всього заземлювального пристрою за формулою:

$$R_3 = \frac{R_{TP} R_M}{R_{TP} \cdot \eta_M + \eta R_M \eta_{TP}}$$

$$R_3 = \frac{15 \cdot 10,7}{15 \cdot 0,83 + 5 \cdot 10,7 \cdot 0,8} = 2,9 \text{ Ом}$$

Отже, опір заземлювального пристрою задовольняє вимогам ПУЕ-86.

5.3. Заходи пожежної і вибухової безпеки

Пожежна і вибухова безпека передбачені ДСТ 12.1.004 -59. Порухення норм, правил монтажу і демонтажу, а також питань з технічної експлуатації системи може створити умови для виникнення пожежі. Укажемо причини виникнення пожежі:

- неякісне виконання пайки і з'єднання проводів призводить до короткого замкнення і загоряння;

- неправильний вибір перетину сполучних проводів, площа проводів вибирається з умови припустимої щільності струмів, що виключає можливість перегріву .

За результатами розрахунку вибирається провід із перетином 0,25 мм², ізоляція якого відповідає умовам експлуатації і припустимого рівня напруги, під яким він знаходиться.

Із метою пожежної безпеки необхідно:

- періодично робити перевірку електричної схеми системи для виявлення причин, що можуть викликати виникнення пожежі.

- систему відключити до повного виявлення причин відмови при виявленні іскріння, короткого замикання, запаху гару, диму.

Необхідно прилад покривати спеціальним лаком, що захищає від можливих коротких замикань, корозії, загоряння.

Система забезпечується надійними засобами сповіщення про пожежу в його початковій стадії. При експлуатації приладу повинні бути виключені умови теплового і хімічного впливів на конструкцію і матеріали.

У випадку виникнення пожежі повинні застосовуватися тільки вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-5, ОУ- 2, або ОУ-8.

Розділ 6

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

6.1. Екологічна експертиза

Останнім часом проблема забруднення навколишнього середовища різного роду виробництвами стає все більш актуальною темою. Вже зараз спостерігається потепління клімату на Землі, руйнування озонового шару Землі і багато інших небезпечних наслідків діяльності людини.

Мета дипломного проекту – розробка каналу вимірювання дальності лазерного далекоміра.

Основними чинниками, що визначають вплив на навколишнє середовище є: споживання електричної енергії, як для роботи системи, так і для освітлення робочих місць, а також має місце вплив електромагнітного випромінювання.

В даний час виробництво електроенергії вважається екологічно небезпечним. Джерелами електроенергії на Україні є ТЕС – теплові електростанції, ГЕС – гідроелектростанції, АЕС – атомні електростанції. У містах створюються ТЕЦ – теплоелектроцентралі для вироблення електроенергії і разом з нею тепло для обігріву і постачання гарячою водою.

При виробництві електроенергії на навколишнє середовище діють наступні чинники:

- 1) Забруднення продуктами згорання:
 - викиди в атмосферу;
 - викиди з твердою частиною продуктів згорання.

<i>Кафедра авіоніки</i>				<i>НАУ 20 16 06 000 ПЗ</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Туз О.К.</i>			Охорона навколишнього середовища	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Слободян О.П.</i>					109	116
<i>Консульт..</i>					109		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Левківський В.</i>				173 201 «Авіоніка»		
<i>Затверд.</i>	<i>Павлова С.В.</i>						

2) Теплове забруднення:

- відведення тепла з повітряними потоками;
- відведення тепла в циркуляційних водяних системах.

3) Радіоактивне забруднення (у разі АЕС):

- радіоактивна дія з вентиляційними потоками;
- радіоактивна дія з охолоджуючою водою;
- проникаюча радіація;
- радіоактивні відходи

4) Екологічний вплив акваторій (у випадку ГЕС):

- затоплення корисних площ;
- дія на клімат;
- дія на флору і фауну в районі акваторій.

5) Вилучення з використання територій.

6) Електромагнітна дія.

6.2. Технічно-організаційні заходи щодо зниження забруднення навколишнього середовища

Оскільки лазерний передавач випромінює СВЧ енергію, слід визначити його вплив на навколишнє середовище і людей.

Визначимо щільність потоку енергії на землі, коли відстань дорівнює $R = 1$ м.

S – щільність потоку енергії;

$$S = PG / 4\pi R^2, \quad (6.1)$$

де P - потужність випромінювання лазера, дорівнює 10 мВт;

G - коефіцієнт підсилення лазера, рівний 100;

R - відстань до випромінювача, м;

$$S = \frac{0,01 \cdot 100}{4 \cdot 3,14 \cdot 100^2} = 7,96 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$$

Звідси витікає, що щільність потоку енергії не перевищує гранично допустимий рівень.

Дуже важливу роль для охорони навколишнього середовища має утилізація технічно або морально застарілого обладнання, оскільки при повторному використанні деяких матеріалів зберігаються природні ресурси.

Найбільший ефект при утилізації досягається при повторному застосуванні радіоелементів застарілого обладнання. Але при цьому можна використовувати тільки частину з них, такі як: резистори (постійні і змінні), керамічні, слюдяні і металобумажні конденсатори, перемикачі, роз'єми, реле. Але не можна повторно використовувати радіолампи, оскільки все сучасне радіообладнання виготовляється на основі напівпровідникових приладів. Саме напівпровідникові прилади складають основну вартісну і технічну частину обладнання. Отже можна використовувати лише малу частину готових радіоелементів від пристроїв, що прийшли в непридатність. Тому основним напрямом утилізації є не повторне використання радіоприладів, а витягування з них цінних матеріалів, що піддаються переробці.

Особлива увага при цьому приділяється дорогоцінним металам (золото, срібло, мідь), які застосовуються при виготовленні контактних елементів таких як реле, роз'єми, перемикачі. Також велику увагу слід приділити радіолампам, що є основними радіоелементами при виготовленні старого обладнання. Крім того при виготовленні новіших напівпровідникових приладів (особливо високочастотних) також досить широко використовувалися дорогоцінні метали.

Не менш важливе використання інших металів, що піддаються переробці, оскільки конструктивні елементи більшості авіаційного радіоелектронного обладнання металеві. До них відносяться: корпуси, стикові елементи, різного типу екрануючі пристрої, екрануюча оплетка кабелів і багато інших.

Всі вище перераховані матеріали містяться в системі вимірювання дальності. Дуже велика кількість дорогоцінних металів міститься у високочастотних елементах приймання-передавання: роз'єми, ВЧ діоди, ВЧ

транзистори, антенна система. Тому доцільним буде якщо при закінченні терміну експлуатації з неї будуть витягнуті всі матеріали, що представляють цінність.

Все що не можливо піддати переробці підлягає знищенню для запобігання забрудненню навколишнього середовища.

Застосування в авіації й космонавтиці більш якісних і точних приладів безсумнівно сприятливо відіб'ється на екологічній обстановці навколишнього середовища. Зі створенням пеленгаційних систем пошуку й опізнання літальних апаратів нового покоління знизитися відсоток аварій викликаних збоями в апаратурах старого зразка.

Використання новітніх технічних розробок дозволить значно підвищити якість приладів, що випускають, і тим самим знизити вимоги по екологічному контролю за виробництвом і експлуатацією пристроїв, що володіють властивостями унікальними в порівнянні з використовуваними раніше.

Також такі системи при своїй роботі можуть викликати такі шкідливі фактори як:

- шумове забруднення
- вібрація
- електромагнітне випромінювання
- теплове випромінювання
- хімічне забруднення навколишнього середовища

Які відповідають нормативним документам:

ДСТУ 2300-93 Вібрація . Терміни та визначення;

ГОСТ 12.1.012-78 Вібрація. Загальні спільні вимоги безпеки;

ДСТУ EN 50364:2006 Апаратура електронна, що працює в діапазоні частот від 0 Гц до 10 ГГц. Обмеження дії електромагнітних полів на людей від апаратури електронного спостереження, радіочастотного розпізнавання об'єктів та аналогічних застосувань.

Допустимі значення наведені у табл. 6.1, параметри шкідливого впливу проєктованого приладу приведені з аналогічних вже існуючих приладів, таких як

РЛС, локатори типа MCMS, PAIS, HO-98, Lotaws і ін, на яких використовуються аналогічне обладнання.

Таблиця 6.1

ФАКТОРИ	Шумове забруднення	Вібрація	Електромагнітне випромінювання	Теплове випромінювання	Хімічне забруднення навколишнього середовища
ГОСТ	12.1.003-86	12.1.012-78	12.1.006-92	12.4.016-87	14.2.002-76
ДОПУСТНЕ ЗНАЧЕННЯ	80 дБА	12 дБ	100 мкВт/см ² в діапазоні частот (ЗМГц-400МГц)	0,87 кДж/кг	амміаку 20 мг/м ³ , аніліну - 3 мг/м ³ , ацетону - 200 мг/м ³ , бензолу - 5 мг/м ³ , бензину - 100 мг/м ³ , сірчатої кислоти - 1 мг/м ³ и т.д.
ПОТОЧНЕ ЗНАЧЕННЯ	35 дБА	3 дБ	7,96 мкВт/см ²	відсутнє	відсутнє
ВІДПОВІДНІСТЬ ДОПУСКУ	В межах допуску	В межах допуску	В межах допуску	Теплове випромінювання відсутнє	Хімічного забруднення не створює

ВИСНОВОК

1) У ході дослідження вивели залежність $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}$ від різних параметрів.

2) Ці параметри розділили на параметри, що відносяться до оптичної приймально-передавальної системи ($d_{об}$ і $\theta_{Л}$), параметри, що відносяться до цілі ($S_{Ц}$ і $\rho_{Ц}$) і параметри, що відносяться до лазера передавача ІЛД (P_I).

3) Спочатку визначили залежність $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}$ від параметрів, що відносяться до оптичної приймально-передавальної системи. Визначили, що при збільшенні $d_{об}$ у заданих межах крива графіка залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}(d_{об})$ зростає, а при збільшенні $\theta_{Л}$ графік залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}(\theta_{Л})$ убуває.

4) А криві графіків залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}$ від параметрів, що відносяться до цілі зростають як при збільшенні $S_{Ц}$, так і при збільшенні $\rho_{Ц}$.

5) Збільшення імпульсної потужності лазера P_I приводить до зростання графіка залежності $R_{\max} e^{\sigma_{\lambda} R_{\max}/2}(P_I)$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Байбородин Ю. В. Введение в лазерную технику. – К.: «Техника», 1977. – 240 с. .
2. Вафиади В. Г., Попов Ю. В. Скорость света и ее значение в науке и технике. Минск, изд-во Белорусского гос. ун-та, 1970. – 136 с.
3. Ермаков Б. А., Балашов И. Ф., Мотенко Б. Н. Импульсная светодальнометрия с ОКГ. Л.: «Машиностроение», 1973, с. 241-255.
4. Крылов Н. И., Бойцов В. А., Верещат А. И. Возможности применения ОКГ в гражданской авиации. – Л.: «ОЛАГА». 1981. – 88 с.
5. Прилепин М. Т., Голубев А. Н. Оптические квантовые генераторы в геодезических измерениях. – М.: «Недра», 1972. – 170 с.
6. В.В. Балаков, В.Г. Вафиади, Ю.В. Попов и др. Фазовая светодальнометрия и перспективы ее развития. – Сборник статей, посвященный 80-летию со дня рождения академика А. А. Лебедева. Л., «Машиностроение», 1973, с. 255-277.
7. Полігонні лазерні та оптико-електронні вимірювальні засоби: Конспект лекцій. Част. II / С.В. Тюрін, І.С. Шостко, В.А. Романюк, В.В. Пономарьов, Р.В. Павлович. – Х.: ХВУ, 1998. – 174 с.
8. Деклараційний патент України на винахід 64961А, Україна, 7 МПК G01S17/42. Канал вимірювання похилої дальності літальних апаратів на підставі модернізованого частотно-часового методу вимірювання / Г.В. Альошин, О.В. Коломійцев, Д.П. Пашков – № 2003032665; Заяв. 27.03.2003; Опубл. 15.03.2004; Бюл. № 3. – 8 с.
9. Деклараційний патент України на винахід 65099А, Україна, 6 МПК G01 S 17/42, G01 S 17/66. Модернізований частотно-часовий метод вимірювання параметрів руху літальних апаратів / Г.В. Альошин, О.В. Коломійцев, Д.П. Пашков – № 2003054908; Заяв. 29.05.2003; Опубл. 15.03.2004; Бюл. № 3. – 8 с.
10. Макаров А.С., Омелаев А.И., Филиппов В.Л. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем. – Казань: Унипресс, 1998. – 320 с.

13. Janers Weapons Systems. Ground Attack: integrated Systems-Helicopter. США, 2001, pp. 436 – 490.
14. MKD 400/600 Observation System. Cetron Handelsgesellschaft m.b.H., Австрия 1995.
15. CHLIO Camera Thermoque pour l'observation, l'aide au pilotage la recherche et le Sauvetage. Проспект фирмы TRT. Франция, 1995.
16. TISM II Thermal Imaging System. Проспект фирмы GEC Avionics Ltd. Великобритания, 1997.
17. H. Zhou. Synthesized night vision goggle. Proceedings of SPIE, Vol. 4021, 2000, pp. 171 – 177.
18. Beal C. Second Sight helicopter helmet-mounted displays. International Defense Review, 1994, Vol. 20, No. 12, pp. 61 – 64.