

AKADEMIA SZTABU GENERALNEGO
im. Generała Broni Karola Świerczewskiego

11

kpt. mgr Jerzy SIWICKI

**RADIOTECHNICZNE ŚRODKI
NAWIGACJI LOTNICTWA**

(Skrypt)



4157

WARSZAWA

SIERPIEŃ

1970

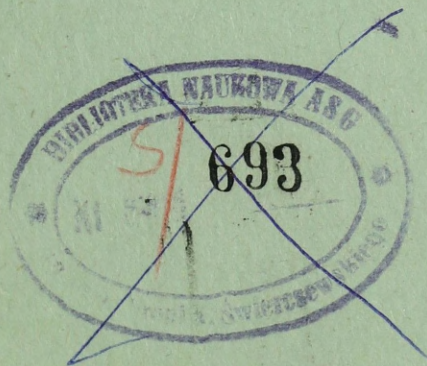


11

kpt. mgr Jerzy SIWICKI

RADIOTECHNICZNE ŚRODKI
NAWIGACJI LOTNICTWA

(Skrypt)



4157

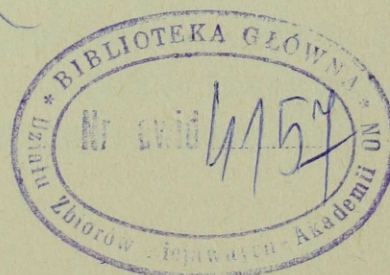
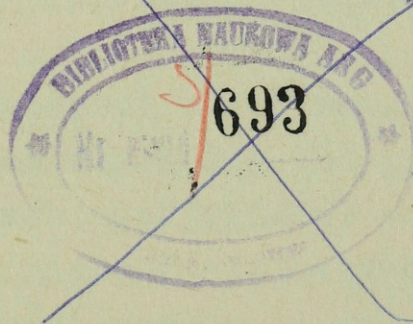
AKADEMIA SZTABU GENERALNEGO
im. gen. broni K. Swierczewskiego

11

mjr mgr Jerzy SIWICKI

RADIOTECHNICZNE SRODKI Nawigacji Lotnictwa

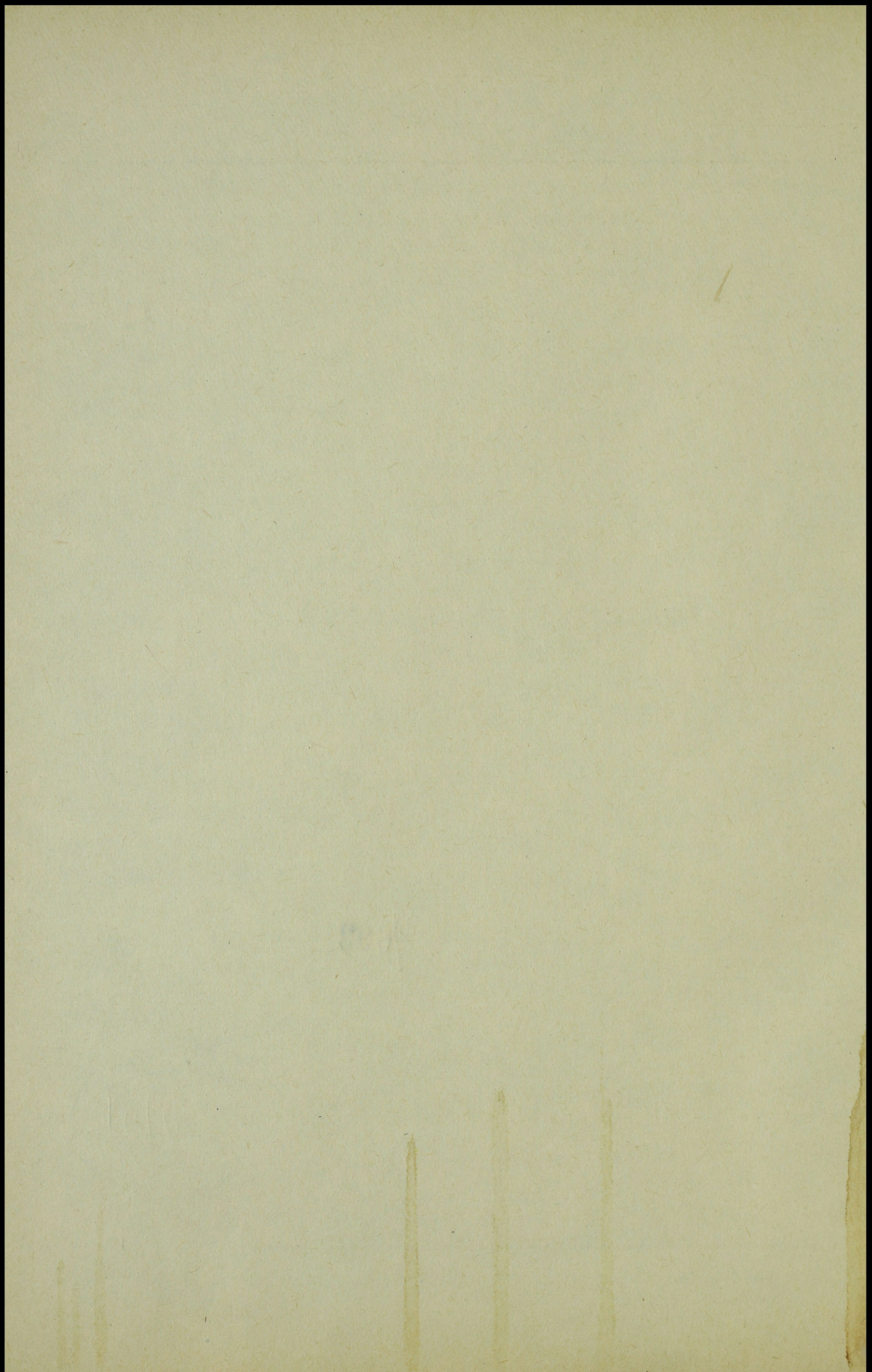
/Skrypt/



WARSZAWA

SIERPIEN

1970 r.



W S T E P

Radionawigacja jako nauka, stanowi jeden z działów współczesnej nawigacji, powstała na bazie potrzeb bardziej sprawnego i niezawodnego zabezpieczenia współczesnej komunikacji morskiej, lotniczej i kosmicznej w niezbędne dane nawigacyjne. Nawigacja lotnicza jest zbiorem metod bezpiecznego prowadzenia obiektów powietrznych w przestrzeni^{ach} i znajomość jej stanowi warunek prawidłowej oceny i wykorzystania środków radionawigacyjnych w zastosowaniu wojskowym.

W związku z powyższym w opracowaniu niniejszym podjęto próbę zwięzłego określenia podstawowych pojęć nawigacji, klasyfikacji środków nawigacyjnych oraz metod i zasad pracy środków radionawigacyjnych stosowanych w lotnictwie. Całość opracowania składa się z trzech rozdziałów.

Pierwszy rozdział obejmuje krótką charakterystykę podstawowych pojęć i zadań nawigacji, omówione zostały w nim elementy nawigacyjne, ogólnie sklasyfikowane środki nawigacji oraz ostatnią część rozdziału poświęcono metodom radionawigacji.

Drugi rozdział omawia radiotechniczne metody pomiarów elementów nawigacyjnych z krótkim uzasadnieniem teoretycznym.

Trzeci rozdział dotyczy radiotechnicznych środków nawigacji. W rozdziale tym dokonano klasyfikacji sprzętu radionawigacyjnego, omówione zostały podstawowe wymagania stawiane środkom radionawigacyjnym oraz zasady^{i pracy} podstawowego sprzętu radionawigacyjnego.

Całość opracowania stanowi zbiór materiałów i publikacji przystosowanych dla potrzeb słuchaczy ASG pierwszych kursów i nie może zaspokoić potrzeb specjalistów technicznych, zajmujących się eksploatacją sprzętu radionawigacyjnego. Tych ostatnich odsyłamy do bibliografii podanej w załączeniu. Należy podkreślić przy tym, że czytelnik korzystający z niniejszego opracowania powinien posiadać niezbędne minimum przygotowania z zakresu szkoły średniej.

1. POJĘCIA PODSTAWOWE

1.1. Przedmiot, podstawowe pojęcia oraz zadania nawigacji

Głównym zadaniem nawigacji jest wyznaczenie miejsca znajdowania się /pozycji/ obiektu ruchomego oraz prowadzenie tego obiektu po określonej trasie z punktu wyjściowego do punktu docelowego.

Obiektami ruchomymi, które korzystają z nawigacji, mogą być obiekty poruszające się w terenie, na powierzchni morza lub pod wodą, w powietrzu oraz w przestrzeni kosmicznej.

Jak z powyższego wynika obiekty mogą poruszać się w przestrzeni dwuwymiarowej /na płaszczyźnie/ lub też w przestrzeni trójwymiarowej. W związku z tym nawigacja może być powierzchniowa /teresteryczna/ lub przestrzenna.

Z metod nawigacji teresterycznej mogą korzystać obiekty poruszające się w terenie oraz obiekty poruszające się po powierzchni mórz. Z metod nawigacji przestrzennej korzystają samoloty, okręty podwodne, pojazdy kosmiczne, tj. wszelkie obiekty mogące poruszać się w przestrzeni trójwymiarowej.

Nawigację dzielimy na morską, lotniczą i kosmiczną, mimo, że nawigacja wykorzystywana jest coraz częściej w innych dziedzinach naukowo-badawczych wojskowych i cywilnych.

Zadania nawigacji morskiej sprowadzają się do określenia pozycji i kierunku ruchu okrętów na powierzchni morza oraz do wyznaczania głębokości mórz.

Do zadań nawigacji lotniczej należy wyznaczanie pozycji i kierunku ruchu obiektów powietrznych względem powierzchni Ziemi oraz określanie wysokości lotu, a także podczas lądowania do określenia innych elementów nawigacyjnych, pozwalających na prowadzenie samolotów w przestrzeni trójwymiarowej.

Zadania nawigacji kosmicznej sprowadzają się do określania położenia obiektu kosmicznego względem trzech osi współrzędnych wybranego układu odniesienia oraz obliczania danych orbitalnych.

Nawigacja może mieć charakter dyskretny /dorywczy/ lub ciągły. Dyskretna nawigacja polega na wyznaczeniu pozycji obiektu /elementów nawigacyjnych/ ruchomego w pewnych odstępach czasu, zależnie od prędkości obiektu i rodzaju trasy. Nawigacja ciągła zapewnia stałe kontrolowanie pozycji i kierunku obiektu

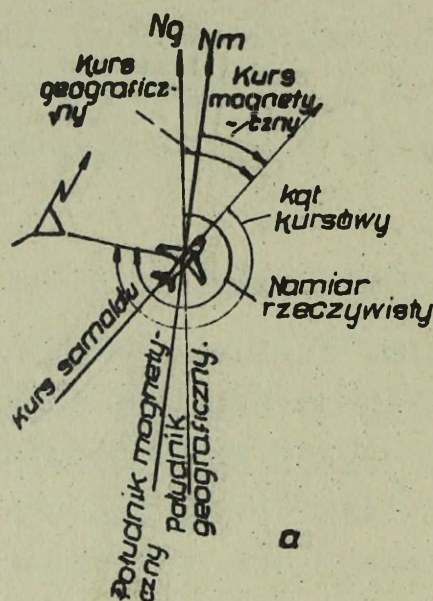
w funkcji czasu. Dlatego też możliwe jest wyznaczenie pozycji obiektu i jego kierunku w dowolnej chwili. Rozwinięciem nawigacji ciągłej jest nawigacja automatyczna, która dzięki sprzężeniu urządzeń nawigacyjnych z urządzeniami sterowymi obiektu nawigowanego umożliwia całkowite zautomatyzowanie ruchu obiektu.

1.2. Podstawowe elementy nawigacyjne

Elementami nawigacyjnymi nazywamy wielkości związane z wyznaczeniem pozycji oraz prowadzeniem obiektów ruchomych w przestrzeni. Do najważniejszych elementów nawigacyjnych zalicza się:

- kurs
- kąt kursowy
- namiar
- prędkość powietrzną;
- nawigacyjny trójkąt prędkości
- wysokość lotu
- linie pozycyjne.

Kurs obiektu ruchomego określa się ^{kąta} wartością zawartego między kierunkiem północnym a osią wzdłużną obiektu nawigowanego. Rozróżnia się kurs magnetyczny obiektu, który jest określony wartością kąta zawartego między południkiem magnetycznym i osią wzdłużną obiektu oraz kurs geograficzny /rzeczywisty/, określony wartością kąta zawartego między południkiem geograficznym i osią wzdłużną obiektu ruchomego. Kurs geograficzny różni się od kursu magnetycznego o wartość dewiacji magnetycznej, tj. kątem zawartym między południkiem geograficznym i magnetycznym /patrz rys. 1/.



Elementy nawigacyjne:
a - kursy samolotu.

Rys. 1

Kąt kursowy obiektu ruchomego określa się wartością kąta zawartego między osią wzdłużną obiektu a kierunkiem na określony punkt orientacyjny, np. na radiolatarnię. Kąt kursowy, podobnie jak kurs, mierzy się w stopniach, zgodnie z ruchem wskazówek zegara w zakresie od $0 \div 360^\circ$.

Namiar obiektu ruchomego, lub azymut, określa się wartością kąta zawartego między południkiem geograficznym a kierunkiem na radiolatarnię, której sygnały odbierane są na obiekcie. Pomiar kierunku na daną radiolatarnię nazywa się namiarem radiowym. Namiar rzeczywisty równy jest sumie kąta kursowego i kursu geograficznego /patrz rys. 1/.

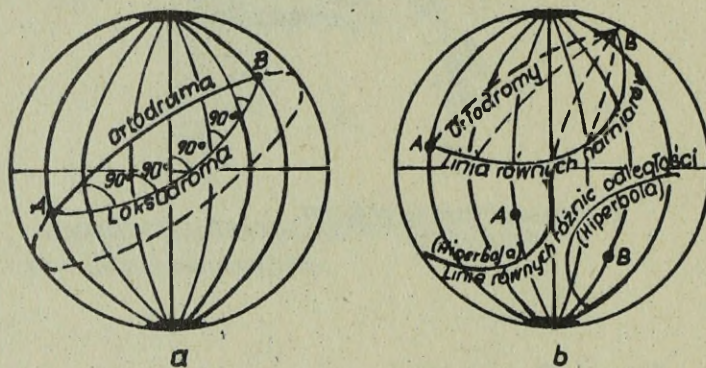
Prędkość powietrzna obiektu określa się prędkością tego obiektu względem otaczającego powietrza. Prędkość obiektu powietrznego /np. samolotu/ względem Ziemi nazywa się prędkością podrózną.

Nawigacyjny trójkąt prędkości określa zależności między prędkością powietrzną samolotu, prędkością wiatru i prędkością podrózną /patrz rys. 2/. Prędkość podrózna obiektu powietrznego zależy od jego prędkości powietrznej i prędkości wiatru. Im większa jest prędkość wiatru bocznego, tym większy powinien być kąt

punktu, zachowuje stałą wartość. Rozróżnia się następujące linie pozycyjne:

- ortodroma
- loksodroma
- linia równych namiarów
- linia równych różnic odległości.

Ortodromą nazywamy linię najmniejszej odległości między dwoma punktami na kuli ziemskiej /patrz rys. 3/.



Pozycyjne linie nawigacyjne :

a- ortodroma i loksodroma; b- linia równych namiarów i linia równych różnic odległości.

Rys. 3

Loksodroma jest linią przecinającą południki pod stałym kątem kursowym. Odległość między dwoma punktami na kuli ziemskiej wzdłuż loksodromy jest zawsze większa niż wzdłuż ortodromy, np. odległość Moskwa - Nowy Jork, wzdłuż ortodromy wynosi 7462 km, zaś wzdłuż loksodromy wynosi 8325 km, a więc jest większa o 863 km.

Linia równych namiarów jest taką linią, wzdłuż której namiar lub azymut, z dowolnego punktu tej linii, na radiolaternię ma stałą wartość.

Linia równych różnic odległości jest taką linią, której wszystkie punkty mają jednakową różnicę odległości od dwóch stałych punktów odniesienia A i B /np. od radiolaterni/. Linia o takiej właściwości nosi nazwę hiperboli. Linie równych różnic odległości wykorzystywane są w hiperbolicznych systemach radionawigacyjnych fazowych i impulsowych.

1.3. Klasyfikacja urządzeń nawigacyjnych

W celu zabezpieczenia bezpiecznego ruchu obiektów w przestrzeni oraz kontroli tego ruchu, wykorzystuje się cały zestaw różnorodnych środków technicznych, konstruowanych na podstawie wykorzystania znanych nam zjawisk fizycznych i praw przyrody. Do fizycznych podstaw i praw przyrody, wykorzystywanych przy budowie sprzętu nawigacyjnego należą:

- właściwości i fizyczne procesy zachodzące w atmosferze Ziemi;
- magnetyczne pole Ziemi;
- ruch obrotowy Ziemi;
- pole grawitacyjne Ziemi;
- promieniowanie ciał niebieskich i ich użytkowanie;
- fale elektromagnetyczne i ich właściwości.

Wyszczególnione wyżej zjawiska przyrody i prawa rządzące tymi zjawiskami legły u podstaw budowy urządzeń nawigacyjnych, specjalnie opracowanych do realizacji zadań nawigacji obiektów będących w ruchu /okrętów, samolotów, rakiet itp./. Zestaw odpowiednich przyrządów nawigacyjnych i urządzeń współpracujących w procesie realizacji zadań nawigacji nazywamy systemami nawigacyjnymi.

Współczesne urządzenia nawigacyjne można podzielić na następujące grupy:

- ogólną urządzenia nawigacyjne, do których zaliczamy kompasy magnetyczne, wysokościomierze barometryczne, wskaźniki prędkości, chronometry, których działanie oparte jest na wykorzystaniu niektórych właściwości fizycznych kuli ziemskiej i jej atmosfery;
- astronomiczne urządzenia nawigacyjne, takie jak kompasy astronomiczne, sekstansy, chronometry i inne przyrządy, za pomocą których można wyznaczyć pozycje i kierunek ruchu obiektu na podstawie obserwacji ciał niebieskich;
- radioastronomiczne przyrządy nawigacyjne typu radiosekstansów wykorzystujących promieniowanie radiowe ciał niebieskich;
- inercyjne przyrządy nawigacyjne, do których zaliczamy akcelerometry mierzące przyspieszenie ruchu, żyroskopy stabilizujące oraz inne przyrządy, zasada działania których opiera się na wykorzystaniu praw mechaniki;

- radioelektroniczne urządzenia nawigacyjne wykorzystujące właściwości fal radiowych stosowanych przez człowieka. Do urządzeń tych należą urządzenia i systemy radiokomunikacyjne, radiolokacyjne i telewizyjne.

Ostatnia grupa urządzeń, najbardziej wszechstronna i najliczniejsza, nosi nazwę urządzeń i systemów radionawigacyjnych, w których szeroko stosowane są najnowsze zdobycze współczesnej elektroniki. Większość urządzeń radionawigacyjnych należy do t.zw. nieautonomicznych środków radionawigacyjnych, których praca i działanie uzależnione są od innych urządzeń radiotechnicznych znajdujących się w określonych punktach radionawigacyjnych i współpracujących w danym systemie. Zespół niezbędnych urządzeń pokładowych i naziemnych, zabezpieczających potrzeby nawigacji, tworzy określony system radionawigacyjny.

Do autonomicznych urządzeń nawigacyjnych /samodzielnych/ zaliczamy kompasy magnetyczne, radiowysokościomierze, radiodal-
mierze, inercyjne przyrządy nawigacyjne oraz dopplerowskie urządzenia radionawigacyjne. Zaletą autonomicznych urządzeń nawigacyjnych jest zbędność naziemnego wyposażenia nawigacyjnego.

1.4. Zasady radionawigacji

Podstawowymi elementami pomiaru w radionawigacji jest pomiar kierunku i odległości. W związku z tym urządzenia radionawigacyjne zaliczane są często do jednej z następujących trzech grup:

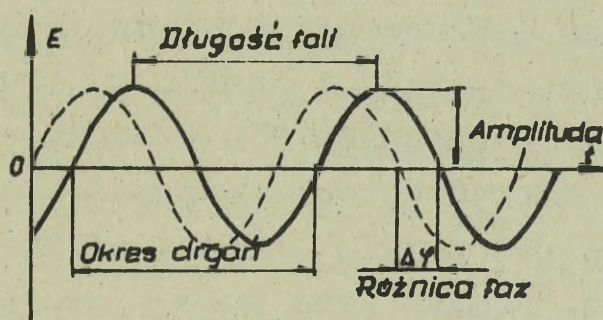
- radionawigacyjne urządzenia i systemy do pomiaru kątów /kierunku/;
- radionawigacyjne urządzenia i systemy do pomiaru odległości;
- radionawigacyjne urządzenia i systemy do pomiaru kątów i odległości jednocześnie.

Do pierwszej grupy urządzeń radionawigacyjnych należą różnego rodzaju radionamierniki pracujące w systemach radionawigacyjnych do pomiaru kątów.

Do drugiej grupy zaliczamy urządzenia i systemy radionawigacyjne typu radiowysokościomierzy i radiodal-
mierzy.

Trzecia grupa obejmuje radionawigacyjne systemy radiolokacyjne i hiperboliczne. Te ostatnie pracują na zasadzie pomiaru różnicy odległości.

Do realizacji zadań radionawigacyjnych wykorzystywane są parametry fali elektromagnetycznej, do których należą: amplituda, czas przelotu fali, częstotliwość, faza oraz kierunkowość promieniowania. Parametry fali pokazane są na rys. 4. Dzięki wykorzystaniu parametrów fali elektromagnetycznej można określić kierunek, odległość i prędkość ruchu obiektów nawigowanych.



Parametry fali elektromagnetycznej.

Rys. 4

Pomiar amplitudy fali radiowej wykorzystuje się przy określaniu kierunku /kąta/. W tym celu stosuje się specjalne anteny kierunkowego promieniowania. Amplituda promieniowanej fali radiowej przez antenę, maleje z odległością, zgodnie ze znanym wzorem:

$$E_m = k \cdot \frac{\sqrt{P}}{D} \quad /1/$$

gdzie: k - współczynnik zależny od tłumienia Ziemi i warunków terenowych /od warunków propagacji fal radiowych/;

P - moc promieniowania energii elektromagnetycznej;

D - odległość od anteny promieniującej falę radiową do punktu pomiaru.

Ze wzoru powyższego znając amplitudę fali, można określić odległość zgodnie z zależnością:

$$D = k \cdot \frac{\sqrt{P}}{E_m} \quad /2/$$

Możliwość pomiaru odległości z wykorzystaniem amplitudy jest w praktyce mało wykorzystana z powodu dużej zależności współczynnika k od warunków propagacyjnych fal radiowych. Szersze zastosowanie w radionawigacji znalazły pomiary natężenia pola elektromagnetycznego przy wykorzystaniu kierunkowej charakterystyki promieniowania anteny. Istnieją przy tym dwie możliwości. Pierwsza możliwość polega na określeniu punktów odbioru maksimum lub minimum kierunkowej charakterystyki promieniowania anteny.

Maksimum charakterystyki promieniowania anteny można wykorzystać w urządzeniach pracujących w zakresie fal UKF, gdzie możliwe jest wytworzenie wąskiej charakterystyki promieniowania, co ma duże znaczenie dla dokładności pomiaru. Pomiar kierunku polega tu na stwierdzeniu sygnału i pomiarze jego maksimum.

W radionawigacyjnych urządzeniach średnio - i długofalowych, gdzie nie można uzyskać ostro wyrażonej charakterystyki promieniowania, stosuje się metodę minimum odbioru sygnałów, za pomocą radionamierników. Pomiar kąta polega na znalezieniu zaniku sygnału /na kierunku minimum promieniowania/ i odczytaniu tego minimum ze skali katowej.

Druga możliwość wykorzystania kierunkowej charakterystyki promieniowania do pomiaru kątów jest metoda strefy równych sygnałów. Metoda ta jest bardziej dokładna i szeroko stosowana w radionawigacji. Polega na porównaniu sygnałów odebranych przez dwa listki, kierunkowej charakterystyki promieniowania anteny, przesuniętych względem siebie i odczycie kąta względem osi strefy równych sygnałów /patrz rozdział "Metody radionamierzania"/.

Do pomiaru odległości wykorzystuje się czas przelotu fali, jaki upływa od momentu wypromieniowania do momentu odbioru sygnału. Ponieważ prędkość rozchodzenia się fal radiowych jest praktycznie stała i wynosi około 300000 km/sek, to odległość, jaką przebywa fala, jest wprost proporcjonalna do czasu t .zn.

$$D = c(t - t_0) = c \Delta t$$

/3/

gdzie: t - czas odbioru sygnału;

t_0 - czas nadania sygnału;

c - prędkość rozchodzenia się fali radiowej.

Zależność powyższa jest podstawą pomiaru odległości w radionawigacyjnych systemach impulsowych. Pomiar odległości może być realizowany metodą "zapytywanie - odpowiedź" lub metodą echa radiowego.

Ze względu na konieczność określania momentu odniesienia, do pomiaru odległości niezbędne jest urządzenie odzwowe, lub uzyskanie odbicia fali - echa radiowego. Przy tym impuls radiowy przebywa drogę dwukrotnie, dlatego też odległość określana jest na podstawie znanego wzoru z radiolokacji:

$$D = \frac{c \Delta t}{2} \quad \text{gdzie} \quad \Delta t = (t - t_0) \quad /4/$$

W radionawigacji dla określenia pozycji obiektu nawigowanego konieczny jest pomiar odległości do określonego znanego punktu nawiązania. Identyfikacja w tym wypadku jest często utrudniona i dlatego też korzystniejsze jest zastosowanie urządzeń odzwowych. Jednakże urządzenia odzwowe wymagają czynnej współpracy obiektu nawigowanego z punktem radionawigacyjnym, w związku z czym ogranicza się przepustowość systemu. Wadę tę usuwa się poprzez realizację systemów hiperbolicznych, o których mowa będzie w następujących rozdziałach.

C z ę s t o t l i w o ść fali można wykorzystać do pomiaru odległości w układach z modulacją częstotliwości. Przy zachowaniu odpowiednich warunków modulacji, różnica częstotliwości pomiędzy falą nadaną i odebraną jest liniową funkcją odległości. Zasada ta znajduje zastosowanie w stacjach radiolokacyjnych, a zwłaszcza w lotniczych wysokościomierzach radiowych. Oprócz tego częstotliwość wykorzystuje się do pomiaru prędkości obiektów ruchomych za pomocą urządzeń wykorzystujących zjawisko Dopplera, polegające na tym, że podczas odbicia fali radiowej od obiektu ruchomego powstaje różnica pomiędzy częstotliwością fali wypromieniowanej i odebranej, której wartość jest proporcjonalna do prędkości obiektu. Częstotliwość dudnień fali wypromieniowanej i odebranej wyraża się zależnością:

$$f_d = \frac{2fW}{c} \quad /5/$$

gdzie: f_d - częstotliwość dudnień;

f - częstotliwość wypromieniowana;

W - prędkość obiektu względem punktu wypromieniowania fali;

c - prędkość rozchodzenia się fali.

Zasada powyższa wykorzystywana jest w stacjach radiolokacyjnych pracujących na fali ciągłej oraz w RLS pracujących

impulsowo przy wykrywaniu celów ruchomych w warunkach zakłóceń biernych, a także w pokładowych wysokościomierzach radiowych.

Kolejnym parametrem fali radiowej jest f a z a . Pomiar fazy znajduje zastosowanie przy określaniu kąta i odległości. Fala elektromagnetyczna na swojej drodze doznaje opóźnienia fazy o kąt równy 2π przy przejściu jednej długości fali. Na drodze D następuje opóźnienie fazy o kąt:

$$\varphi = 2\pi \left[n + \frac{D}{\lambda} \right] \quad /6/$$

gdzie: n - ilość całkowitych długości fali mieszczących się na drodze rozprzestrzenienia;

λ - długość fali

Między fazą odniesienia w punkcie wypromieniowania φ_0 , a fazą φ , występującą na drodze D różnica faz, uwzględniając wzór /6/, istnieje następująca zależność:

$$\varphi_0 - \varphi = \varphi_0 - n2\pi - 2\pi \frac{D}{\lambda}$$

Wielkość $2\pi n$ nie możemy zmierzyć, pomiar dotyczy jedynie opóźnienia fazy na odcinku D , tj. :

$$\Delta\varphi = - \frac{2\pi}{\lambda} D \quad /7/$$

Powstaje przy tym wieloznaczność pomiaru, którą możemy usunąć powtórzeniem pomiaru na innej długości fali, lub też poprzez pomiar przybliżony inną metodą. Jest to wada danej koncepcji pomiaru, mimo to wada ta ma znaczenie drugorzędne wobec dominującej zalety jaką jest duża dokładność pomiaru. Metody oparte na pomiarze fazy należą do najbardziej dokładnych.

Urządzenia radionawigacyjne oparte na pomiarze fazy wymagają stosowania urządzeń odzewowych, dlatego też w celu uproszczenia sprzętu stosuje się pomiar nie odległości, a różnicy odległości, a to z kolei doprowadziło do utworzenia współczesnych systemów hiperbolicznych, najbardziej dokładnych, które znalazły zastosowanie w nawigacji, geodezji, kartografii itp.

1.5. Rodzaje fal wykorzystywanych dla celów radionawigacji

Częstotliwość i związane z nią warunki propagacji fal radiowych mają zasadniczy wpływ na parametry i możliwości taktyczno-techniczne środków radionawigacyjnych. Dlatego też należy

zdać sobie sprawę z podstawowych rodzajów propagacji fal radiowych. Falę z tego punktu widzenia można podzielić na fale troposferyczne, przyziemne i jonosferyczne.

Omówimy pokrótce podane rodzaje fal radiowych z punktu widzenia ich zasadniczych właściwości.

Fala troposferyczna zbliżona jest do fali radiowej rozprzestrzeniającej się w swobodnej przestrzeni i charakteryzuje ją duża stałość prędkości rozchodzenia się. Fala troposferyczna rozchodzi się prostoliniowo /w przybliżeniu/, a jej polaryzacja określona jest warunkami wypromieniania, to znaczy, zależna jest od konstrukcji anteny promieniującej.

Propagacja troposferyczna zachodzi przy częstotliwościach bardzo dużych tj. na falach UKF i mikrofalach. Dzięki krótkiej fali możliwe jest uzyskanie wąskich jednolistkowych charakterystyk promieniowania anten, co ma szczególne znaczenie w radionawigacji, ze względu na konieczność dokładności pomiarów. Fala troposferyczna UKF ułatwia również uzyskanie stosunkowo dużych zasięgów, zwłaszcza w autonomicznych urządzeniach radionawigacyjnych.

Wskutek prostoliniowego rozchodzenia się fal UKF, zasięg ograniczony jest horyzontem i przeszkodami terenowymi. W związku z tym fale te mogą być wykorzystane tylko w urządzeniach radionawigacyjnych małego zasięgu. Zasięg tego typu urządzeń radionawigacyjnych, pracujących na troposferycznych falach UKF może być określony ze znanej zależności:

$$D = 3,57 \left[\sqrt{H_n} + \sqrt{H_o} \right] \text{ [km]} \quad /8/$$

gdzie: H_n - wysokość zawieszenia anteny nadawczej w metrach;
 H_o - wysokość anteny odbiorczej w metrach.

F a l a p r z y z i e m n a. Falę przyziemną charakteryzuje duża zależność od warunków terenowych, ponieważ tłumienie fali zależne jest od przewodności i stałej dielektrycznej gruntu. Warunki te najkorzystniejsze są nad morzem i powierzchniami o dużym nawilgoceniu. Tłumienie fali wzrasta ze wzrostem częstotliwości, dlatego też uzyskanie średnich i dużych zasięgów, możliwe jest tylko przy wykorzystaniu fal

średnich i długich. Polaryzacja fali przyziemnej jest w zasadzie tylko pionowa, gdyż ewentualnie wypromieniowana składowa pozioma pola elektromagnetycznego, ulegnie silnemu tłumieniu przez Ziemię już na niewielkiej odległości od punktu wypromieniowania. Jest to bardzo istotna cecha fali przyziemnej, ponieważ w wielu urządzeniach radionawigacyjnych skrócenie płaszczyzny polaryzacji fali, powoduje znaczne błędy w dokonywanych pomiarach wielkości nawigacyjnych.

Refrakcja fali przyziemnej umożliwia uzyskanie dużych zasięgów, znacznie przekraczających bezpośrednią widzialność, a przeszkody terenowe nie mają większego wpływ. Ze względu na powyższe cechy fali przyziemnej fale średnie i długie są najbardziej odpowiednie dla radionawigacji średnich i dużych zasięgów.

F a l a j o n o s f e r y c z n a umożliwia uzyskanie dużych zasięgów na falach krótkich. Jednakże natężenie pola w miejscu odbioru, faza i polaryzacja ulegają znacznemu wahaniu wskutek zmienności stanu atmosfery.

Zmiany fazy fali jonosferycznej uniemożliwiają stosowanie tego zakresu w systemach hiperbolicznych, opartych właśnie na pomiarze fazy. Zmiany te również zniekształcają charakterystyki kierunkowe radiolatarni kierunkowych, a skrócenie płaszczyzny polaryzacji fali prowadzi do znacznych błędów w namiarach przy wykorzystaniu radionamierników pokładowych. Efekt ten znany jest nawigatorom pod nazwą efektu nocnego, występującego już na falach średnich.

Z powyższych powodów fala jonosferyczna może być wykorzystana jedynie tam, gdzie o wyniku pomiaru decyduje wyłącznie długość drogi przebytej przez falę, a faza i płaszczyzna polaryzacji nie mają znaczenia.

Na odległościach najmniejszych, na jakich fala jonosferyczna może być odebrana, powstają duże błędy w pomiarach. Natomiast na odległościach dużych, stosunkowa różnica między drogą przebytą przez falę i rzeczywistą odległością, jest nieduża i może być pominięta. Jest to więc fala dogodna tylko do radionawigacji długodystansowej. Jedynym systemem radionawigacyjnym, wykorzystującym fale jonosferyczne jest znany system zachodni typu LORAN.

Dla celów radionawigacji wykorzystywane są fale radiowe różnych zakresów częstotliwości. Fale UKF i mikrofałe wykorzystuje się w urządzeniach obsługujących małe odległości. Zasięg ich jest ograniczony prostoliniowym rozchodzeniem się fali i sięga dla nawigacji morskiej 40 ~~4~~ 60 km, zaś dla nawigacji lotniczej zależny jest od wysokości lotu samolotu, może przekraczać niekiedy 200 ~~4~~ 400 km.

Fale średnie i długie wykorzystuje się w radionawigacji średnio i długodystansowej. Urządzenia radionawigacyjne pracujące na falach średnich i długich posiadają zasięgi dochodzące niekiedy do kilku tysięcy kilometrów.

W technice radionawigacyjnej wykorzystywane są wszystkie pasma częstotliwości. Najwięcej środków radionawigacyjnych pracuje w zakresie fal 1400 ~~4~~ 3100 m oraz w zakresie fal 3 cm do 5 metrów.

Reasumując należy stwierdzić, że urządzenia i systemy radionawigacyjne średnio i długodystansowe powinny pracować na falach średnich i długich oraz wyjątkowo na falach krótkich - jonosferycznych. Natomiast urządzenia i systemy radionawigacyjne krótkiego dystansu powinny pracować na falach UKF i mikrofalach.

2. RADIOTECHNICZNE METODY POMIARU ELEMENTÓW NAWIGACYJNYCH

Dzięki technicznej możliwości wykorzystania głównych właściwości fal radiowych, można metodami radiotechnicznymi określić kierunek na źródło promieniowania fali, dokonać pomiaru odległości między źródłem promieniowania i punktem odbioru, zmierzyć prędkość, wysokość i inne wartości elementów nawigacyjnych.

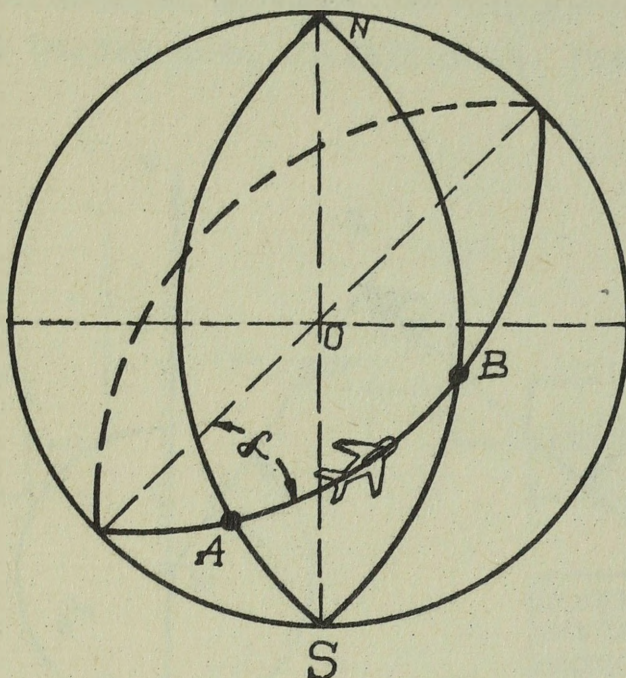
Poniżej rozpatrzone będą podstawowe zasady i możliwości zastosowania środków radionawigacyjnych do rozwiązywania zadań nawigacji w lotnictwie.

2.1. Określanie kierunku

Kierunek z dowolnego punktu przestrzeni na źródło promieniowania fal radiowych wyznacza się na podstawie pomiarów wielkości kątowych w przyjętym układzie współrzędnych. Proces określania kierunku w przestrzeni metodami radiotechnicznymi nazywamy radionamierzaniem. Jeżeli za początek odczytu kątów przyjmą południk magnetyczny, z punktu obserwatora, to otrzymane kąty nazywamy namiarami magnetycznymi, a przy odczycie kątów od południka geograficznego otrzymujemy namiary rzeczywiste, t.zw. azymuty.

Zmiana orientacji anteny odbiorczej w stosunku do kierunku punktu promieniowania fali radiowej, prowadzi do zmiany poziomu mocy odbieranego sygnału. Dzięki temu istnieje możliwość określenia kierunku na punkt nadawczy za pomocą metody maksimum lub minimum odbioru fali radiowej.

Jeżeli na przykład na pokładzie samolotu zamontujemy nadajnik, a na Ziemi w punkcie A odbiornik, za pomocą którego określimy kierunek na ten nadajnik, to wykorzystując rezultaty pomiarów można kontrolować lot samolotu z punktu A do punktu B na kierunku AB pod kątem α do południka /rys. 5/.



Rys. 5.

Ponieważ płaszczyzna rozchodzenia się fali radiowej pokrywa się z płaszczyzną dużego koła, to przy locie nad powierzchnią Ziemi, przy stałej wysokości, z punktu A do punktu B samolot opisze łuk wielkiego koła zwany ortodromą. Lot taki będzie odbywał się po najkrótszej linii.

Równanie ortodromy w geograficznym układzie współrzędnych posiada następującą postać:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \cos \varphi_A \operatorname{cosec} / \varphi - \varphi_A / - \sin \varphi_A \operatorname{ctg} / \varphi - \varphi_A /$$

gdzie: φ_A, φ_A - geograficzne współrzędne punktu A;

φ, φ - geograficzne współrzędne bieżącego punktu ortodromy.

Długość odcinka S ortodromy /długość ortodromiczna/ między punktami A i B ze współrzędnymi φ_A, φ_A i φ_B, φ_B wyraża się wzorem:

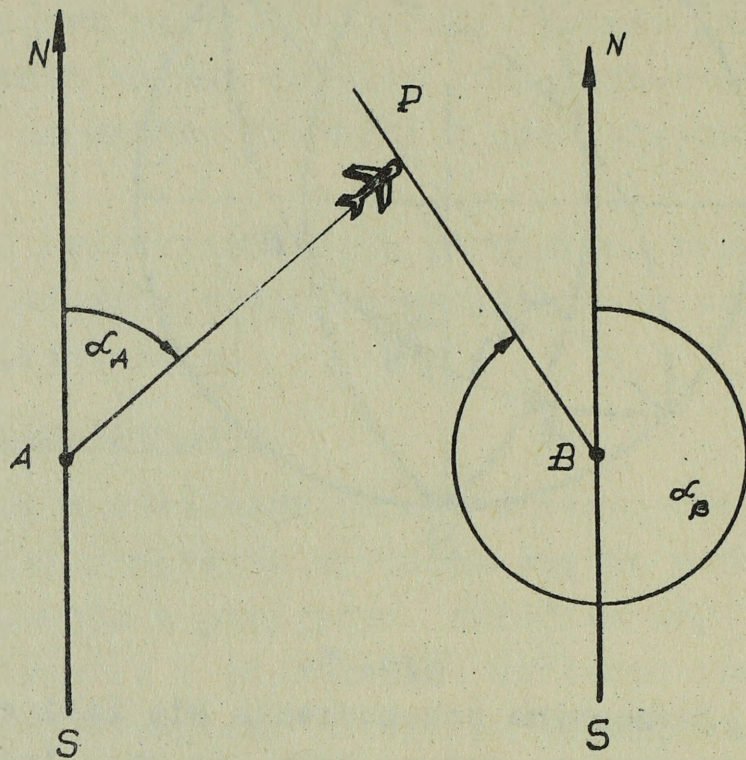
$$\cos S = \sin \varphi_A \sin \varphi_B + \cos \varphi_A \cos \varphi_B \cos / \varphi_B - \varphi_A /$$

$$S [\text{km}] = 1,852 S^+ ,$$

gdzie: S^+ - długość łuku S wyrażona w minutach kątowych.

Jeżeli z dwóch punktów A i B, znajdujących się na powierzchni Ziemi, określić dwa namiary α_A i α_B na punkt P, to za pomocą odpowiedniego wykresu na mapie, względnie za

pomocą wyliczeń, wyznacza się miejsce znajdowania się samolotu.
/patrz rys. 6/.



Rys. 6.

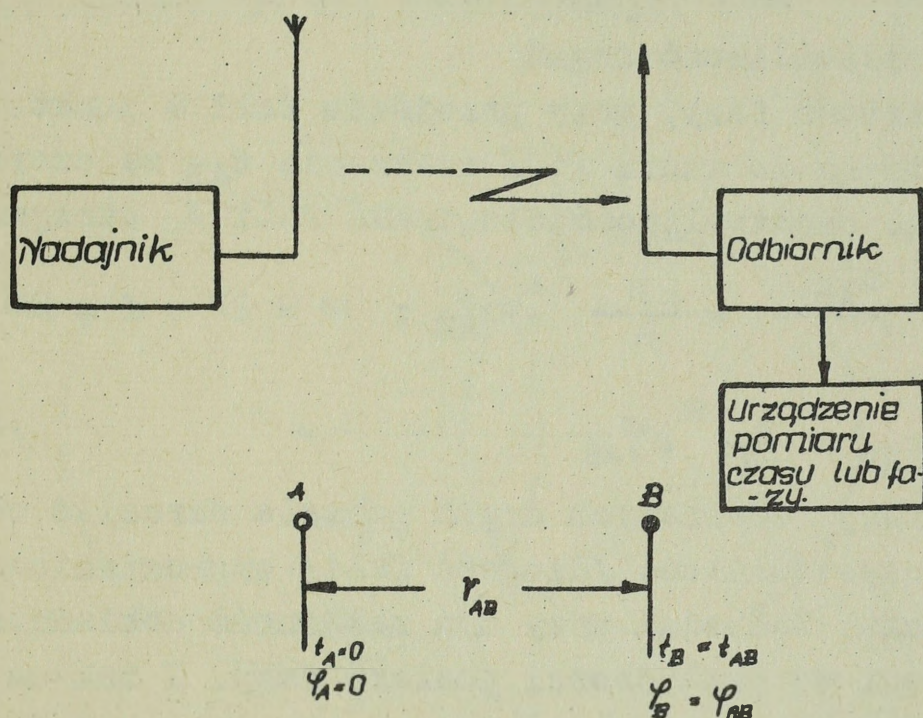
Współczesne środki radionawigacyjne pozwalają na określenie miejsca znajdowania się samolotu w przestrzeni z błędem nie przekraczającym dziesiątych części minuty kątowej.

2.2. Pomiar odległości

Pomiaru odległości w przestrzeni można dokonać różnymi metodami radiotechnicznymi. Najbardziej rozpowszechnioną metodą jest metoda pomiaru czasu rozchodzenia się fali radiowej. Do pomiaru odległości między dwoma punktami A i B /patrz rys. 7/ umieszczamy w punkcie A stację nadawczą, a w punkcie B odbiornik z urządzeniem pomiarowym czasu. Zakładamy przy tym, że fale radiowe rozchodzą się prostoliniowo z prędkością c . Czas rozchodzenia się fali radiowej z punktu A do punktu B będzie proporcjonalny do odległości między tymi punktami t.zn.

$$r_{AB} = c \cdot t_{AB}$$

Jeżeli określić czas t_{AB} , to określimy również odległość r_{AB} . Za pomocą współczesnych środków technicznych pomiar czasu może być dokonany z bardzo dużą dokładnością. Przy tym również



Rys. 7.

odległość określona jest z bardzo dużą dokładnością, ponieważ błąd pomiaru odległości proporcjonalny jest błędowi pomiaru czasu t.zn. :

$$\Delta r = c \Delta t$$

Jeżeli pomiaru czasu dokonano z błędem $\Delta t = 0,1 \cdot 10^{-6}$ sek, a prędkość rozchodzenia się fali wynosi $c = 3 \cdot 10^8$ m/sek, to:

$$\Delta r = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} = 30 \text{ m}$$

Widzimy z powyższego, że błąd pomiaru odległości wynosi 30 metrów.

Do pomiaru czasu rozchodzenia się fali radiowej należy ustalić początek odczytu czasu tak, aby on pokrywał się z momentem wypromieniowania fali z punktu A. W tym celu stosuje się specjalne urządzenia pozwalające na automatyczne ustalenie momentu odczytu czasu, zwane synchronizatorami. Bezpośredni pomiar czasu rozchodzenia się fali może być dokonany w urządzeniach radiotechnicznych pracujących impulsowo.

Zadanie pomiaru odległości można rozwiązać również metodą pomiaru fazy odebranej fali radiowej. Przy rozchodzeniu się fali z punktu A do punktu B, faza drgań zmienia się proporcjonalnie do czasu rozchodzenia się fali, t.zn.

$$\varphi_{AB} = \omega \cdot t_{AB} \quad /10/$$

gdzie: ω - częstotliwość drgań

φ_{AB} - wartość fazy, przy przejściu fali z punktu A do B.

Podstawiając do wzoru /10/ znaczenie t_{AB} ze wzoru /9/ oraz zmieniając częstotliwość ω długością fali λ otrzymamy:

$$\varphi_{AB} = \frac{2\pi \cdot c}{\lambda} \cdot r_{AB} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_{AB} \cdot c; \quad \omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \frac{c}{\lambda}$$

lub
$$r_{AB} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \varphi_{AB} \quad /11/$$

Pomiar fazy odebranych drgań pozwala określić odległość, jeżeli częstotliwość /długość fali/ wypromieniowanych drgań jest stała. Zachodzi przy tym zależność dokładności pomiaru odległości od dokładności pomiaru fazy. I tak na przykład:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r; \quad \Delta r = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta \varphi \quad /12/$$

Jeżeli dokonać pomiaru fazy $\Delta \varphi = 1^\circ$ przy długości fali radiowej $\lambda = 1000$ m, to błąd pomiaru odległości wyniesie:

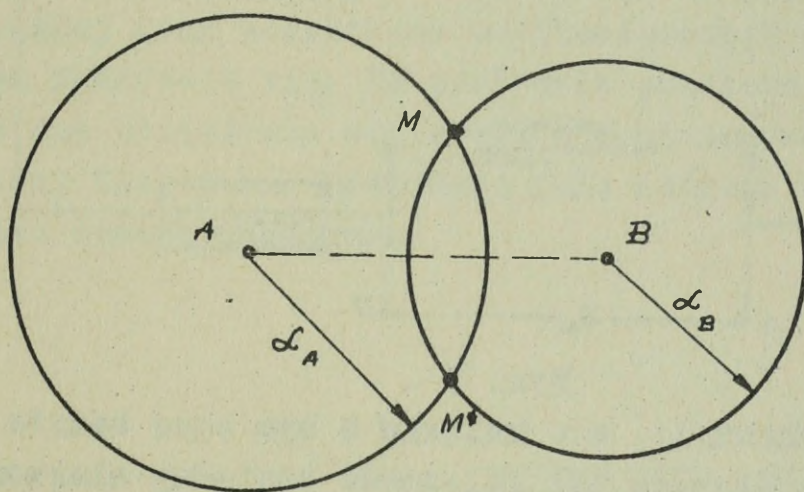
$$\Delta r = \frac{1000 \cdot 1}{360} = 3 \text{ m}$$

Do pomiaru fazy φ_{AB} również należy ustalić moment odczytu fazy i zgrać go z fazą początkową fali wypromieniowanej. W tym celu stosuje się specjalne synchronizatory z generatorem drgań, o dużej stabilizacji częstotliwości. Fazowy pomiar odległości najczęściej stosowany jest w urządzeniach radiotechnicznych pracujących na fali ciągłej.

Jeżeli urządzenie odbiorcze z synchronizatorem lub fazomierzem, umieścić w punkcie B, na pokładzie samolotu i dokonać lotu z zachowaniem stałej wysokości nad powierzchnią Ziemi tak, aby mierzona odległość pozostawała stałą, to przy tym samolot opisze koło wokół punktu A. Koło tego typu /linia obwodu/ w nawigacji nosi nazwę linii równych odległości. Przyjmując cały szereg znaczeń r_1, r_2, \dots, r_n i rzutując linie równych odległości, przecięcie się których pozwala na określenie odległości

łości na powierzchnię kuli ziemskiej, otrzymamy rodzinę kół ze środkiem w punkcie A.

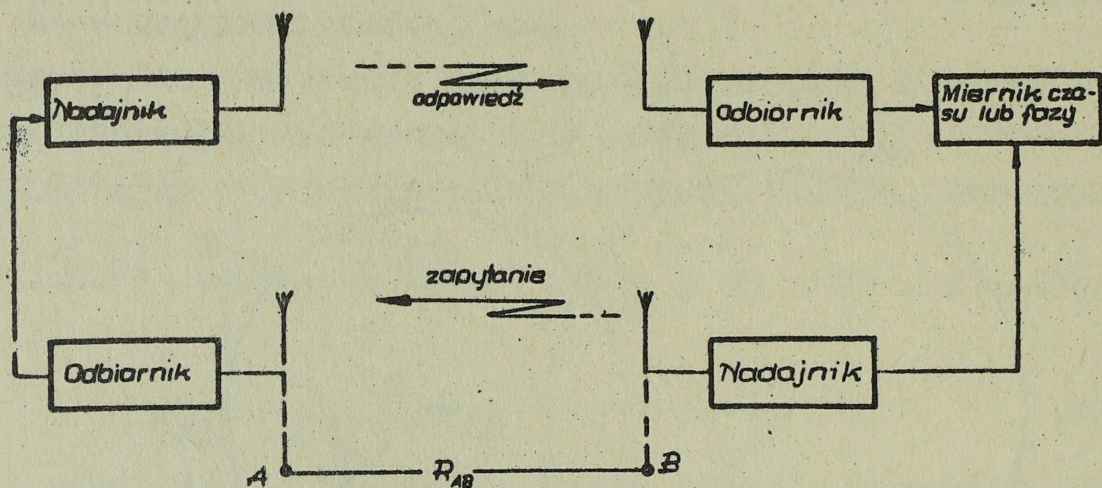
Pomiar dwóch odległości r_A i r_B od samolotu do dwóch znanych punktów A i B na powierzchni Ziemi, daje dwie linie równych odległości, przecięcie się których pozwala na określenie miejsca znajdowania się samolotu /rys. 8/



Określenie miejsca samolotu metodą odległości.

Rys. 8

Ponieważ otrzymane koła o promieniu $r_A = \text{const.}$ i $r_B = \text{const.}$ przecinają się w dwóch punktach M i M', to określenie miejsca samolotu będzie niejednoznaczne. Niejednoznaczność tę usuwa się za pomocą innych środków nawigacyjnych. Dla "przechowywania" na pokładzie samolotu dokładnego czasu /lub dokładnej częstotliwości/, stosowane są specjalne urządzenia pokładowe, współpracujące z naziemnym. Schemat blokowy takiego układu przedstawiony jest na rys. 9. Na pokładzie samolotu montuje się nadajnik, za pomocą którego dokonuje się zapytania. Na ziemi w punkcie A zapytanie to jest odebrane, a następnie wysłana jest odpowiedź. Na pokładzie samolotu z kolei dokonuje się pomiaru czasu między momentem zapytania i momentem otrzymania odpowiedzi. Pomiaru czasu dokonuje się metodą bezpośrednią lub też za pomocą pomiaru fazy sygnału odebranego. Przy tym należy podkreślić, że w przypadku zapytania i odpowiedzi mierzony sygnał radiowy przechodzi



Rys. 9 .

odległość dwukrotnie, a w związku z tym czas będzie dwa razy dłuższy. Dlatego też zależność pomiędzy mierzonym czasem rozchodzenia się fali i odległością między samolotem i punktem naziemnym, jest następująca:

$$r = \frac{c \cdot t_r}{2} \quad \text{gdzie: } t_r - \text{czas rozchodzenia się fali na drodze } r$$

Błąd pomiaru odległości przy tym obliczyć możemy z zależności:

$$\Delta r = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

Analogicznie przy pomiarze fazy otrzymamy:

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \varphi_r$$

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta \varphi_r$$

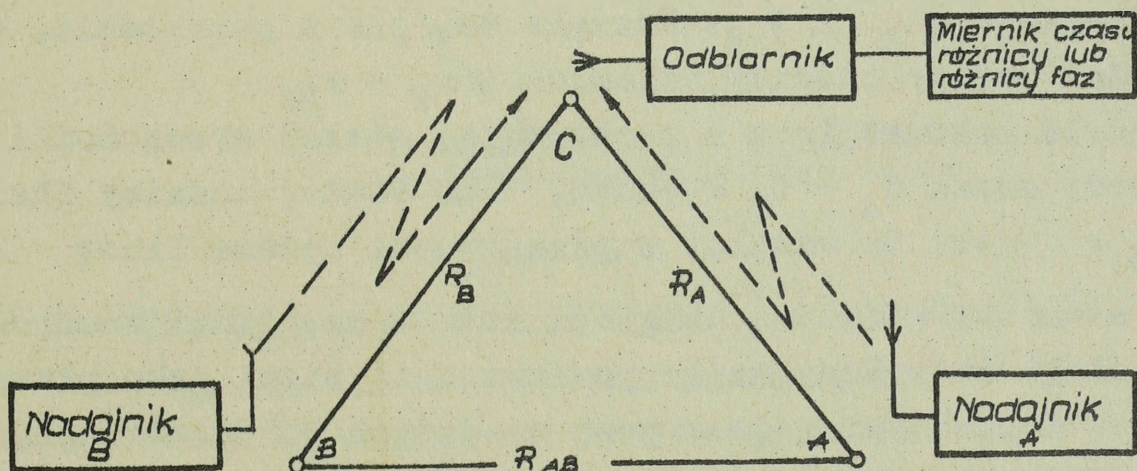
Z powyższego rozważania wynika, że celem otrzymania sygnałów odpowiedzi należy wykorzystać zasadę retranslacji.

2.3. Pomiar różnicy odległości

W wielu wypadkach praktycznych, dla celów nawigacji, nie ma konieczności dokonywania pomiaru odległości, można ograniczyć się do pomiaru różnicy odległości. Tego rodzaju

urządzenia radionawigacyjne posiadają wiele zalet w porównaniu z urządzeniami pomiaru odległości. Zasada działania tego rodzaju pomiaru jest następująca:

W zadanych punktach A i B, znajdujących się na powierzchni Ziemi /patrz rys. 10/, rozmieszcza się radiostacje nadawcze o promieniowaniu dookólnym, praca których jest dokładnie zsynchronizowana w czasie. Radiostacje mogą pracować impulsowo lub też w sposób ciągły. W pierwszym wypadku impulsy obu radiostacji wypromieniowywane są jednocześnie. Przy pracy ciągłej fazy początkowe promieniowanych drgań obu radiostacji pokrywają się. Na pokładzie samolotu w punkcie C znajduje się urządzenie odbiorcze z pomiarem różnicy czasu lub różnicy faz, jakie przyjmują fale radiowe wypromieniowane przez stacje naziemne.



Zasada pomiaru różnicy odległości

Rys. 10

W porównaniu z momentem wypromieniowania, sygnały odebrane będą opóźnione w czasie na wielkość proporcjonalną odległości samolotu od stacji naziemnych. Przy tym spełnione będą następujące zależności:

$$r_A = c \cdot t_A \quad \text{oraz} \quad r_B = c \cdot t_B$$

różnica odległości wyniesie:

$$r_A - r_B = c / t_A - t_B /$$

/13/

Przy impulsowym promieniowaniu, można bezpośrednio dokonać pomiaru różnicy czasu przejścia sygnałów impulsowych $t_A - t_B$ bez pomiaru czasowego opóźnienia obu sygnałów t_A i t_B . Pozwala to na bezpośrednie określenie różnicy odległości $r_A - r_B$ bez pomiaru samych odległości r_A i r_B .

W wypadku promieniowania ciągłego będzie miało miejsce opóźnienie fazy sygnałów odebranych, proporcjonalnie do przebytej przez tę falę drogi, a mianowicie:

$$r_A = \frac{\lambda}{2\pi} \varphi_A \quad ; \quad r_B = \frac{\lambda}{2\pi} \varphi_B$$

Różnica odległości wyrazi się zależnością:

$$r_A - r_B = \frac{\lambda}{2\pi} / \varphi_A - \varphi_B /$$

/14/

Można przy tym dokonać bezpośredniego pomiaru różnicy faz sygnałów odebranych $\varphi_A - \varphi_B$, bez dokonywania pomiaru opóźnienia fazowego t_A i t_B . Pozwala to, jak i poprzednio, na bezpośredni pomiar różnicy odległości $r_A - r_B$.

Jeżeli dokonać lotu z zachowaniem stałej wysokości i stałej różnicy czasu $t_A - t_B = \text{const}$, lub stałej różnicy faz $\varphi_A - \varphi_B = \text{const}$, to samolot w przestrzeni opíše linię

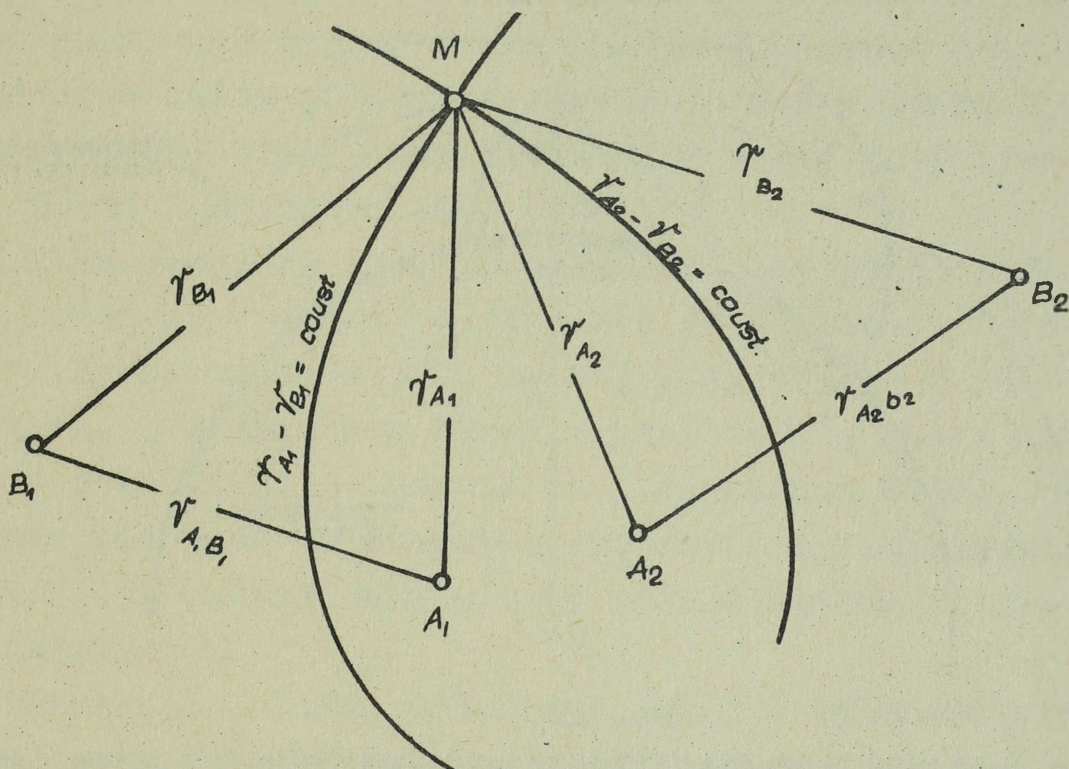
$r_A - r_B = \text{const}$, która w nawigacji nosi nazwę linii równych różnic odległości. Przyjmując powierzchnię Ziemi jako płaszczyznę, co dopuszczalne jest przy niedużych odległościach, linia ta będzie płaską hiperbolą. Przy locie nad powierzchnią sferyczną otrzymamy w rzucie na tę powierzchnię hiperbolę sferyczną. Dokładność określenia linii równych różnic odległości zależy będzie od dokładności pomiaru różnicy czasu lub różnicy faz.

Przyjmując szereg znaczeń mierzonej różnicy czasu

$/t_A - t_B/1, /t_A - t_B/2, /t_A - t_B/3, \dots, /t_A - t_B/n$, otrzymamy rodzinę linii hiperbolicznych $/r_A - r_B/1, /r_A - r_B/2,$

$/r_A - r_B/3, \dots, /r_A - r_B/n$, ułożonych odpowiednio w stosunku do pary stacji naziemnych w punktach A i B, które są ogniskami hiperbol. Linie te wykorzystywane są do rozwiązywania różnych zadań nawigacji. Srodki techniczne, wykorzystujące wspomniane linie hiperboliczne, w radionawigacji noszą nazwę systemów hiperbolicznych.

Posiadając dwie pary stacji nadawczych A_1B_1 i A_2B_2 /patrz rysunek 11/, możemy dzięki pomiarom dwóch różnic odległości, w stosunku do poszczególnych par radiostacji, określić miejsce położenia samolotu.



Określenie miejsca położenia samolotu metodą pomiaru różnicy odległości.

Rys. 11

2.4. Pojęcie powierzchni położenia i linie położenia

Rozpatrywane dotychczas radionawigacyjne metody nawigacji samolotów wymagają rozmieszczenia na powierzchni Ziemi różnorodnych urządzeń radiotechnicznych, tworzących naziemne radionawigacyjne punkty, za pomocą których można ustalić i przekazać na obiekt nawigowany parametry przyjętej trasy lotu i inne dane nawigacyjne /kierunek, odległość, prędkość itp./.

Jeżeli zachować stałą wielkość tylko jednej wartości współrzędnej nawigacyjnej, to loty będą odbywać się nie według zadanej trasy, a po powierzchni, geometryczne właściwości której określone będą tylko charakterem mierzonej współrzędnej nawigacyjnej. Tak na przykład: przy pomiarze kierunku, lot ze stałym namiarem / $\alpha = \text{const}$ / będzie odbywał się w płaszczyźnie dużego koła. Przy pomiarze odległości, lot

powierzchni położenia daje miejsce położenia samolotu w przestrzeni.

Przy przedłużeniu dowolnej powierzchni położenia do przecięcia się z powierzchnią kuli ziemskiej, otrzymujemy linię położenia obiektu na powierzchni Ziemi, która odpowiada ruchowi obiektu na wysokości $H = 0$. Przy lotach na małych wysokościach nad Ziemią, w praktyce nawigacyjnej, często utożsamia się rzeczywiste linie położenia w przestrzeni z linią położenia na powierzchni Ziemi, nie biorąc pod uwagę krzywizny powierzchni Ziemi i odchylenia od pionu.

Dla ilustracji na rys. 12 pokazana jest powierzchnia równych odległości $/r = \text{const}/$ w stosunku do punktu A. Samolot znajdujący się na wysokości H, na tej powierzchni w punkcie M rzutuje się na powierzchnię Ziemi w punkcie M^+ , który nie pokrywa się z jego linią położenia na powierzchni Ziemi. Błąd ten zwiększa się wraz ze wzrostem wysokości i zmniejszeniem odległości r, co należy uwzględniać przy dokładnych wyliczeniach nawigacyjnych.

Powierzchnie i linie położenia szeroko wykorzystywane są do rozwiązywania różnorodnych zadań nawigacyjnych. Linie położenia nanoszone są na mapy lotów i służą jako swego rodzaju układy współrzędnych systemów radionawigacyjnych. Za pomocą dwóch rodzin przecinających się linii położenia rozwiązuje się podstawowe zadania nawigacji, t.j. określa się miejsce położenia obiektów. Według tych linii można dokonywać lotów w wypadku, kiedy one pokrywają się z zadaną linią drogi. Przy pomocy urządzeń przeliczających można przeliczać jedne układy współrzędnych w inne i wypracowywać nowe linie położenia, geometryczne właściwości których są najbardziej wygodne dla nawigacji w konkretnych warunkach. Na przykład można utworzyć prostoliniową trasę lotu w dowolnym kierunku, mimo, że pierwotne linie położenia posiadały charakter krzywoliniowy.

2.5. Pomiar wysokości

Do pomiaru wysokości lotu obiektu powietrznego z pokładu samolotu wypromieniowuje się fale radiowe w kierunku Ziemi. Po odbiciu od Ziemi i odbiorze fali odbitej, urządzenie pokładowe dokonuje pomiaru czasu opóźnienia fali. Zależność między wysokością H i czasem^M opóźnienia fali t_H wyraża znany wzór:

$$H = \frac{ct_H}{2}$$

Przy impulsowej metodzie promieniowania wartość czasu opóźnienia fali odbitej mierzy się bezpośrednio, podczas gdy przy promieniowaniu ciągłym czas opóźnienia mierzy się poprzez pomiar częstotliwości. Ponieważ odbicie fal radiowych następuje od powierzchni Ziemi, dlatego też metoda ta pozwala na bezpośrednie określenie rzeczywistej wysokości lotu nad przelatującym terenem.

2.6. Obserwacja powierzchni ziemskiej

Obserwacja powierzchni ziemskiej dla celów nawigacyjnych dokonywana jest za pomocą pokładowych radiolokacyjnych stacji panoramicznych. Stacje te pozwalają na zobrazowanie w wybranej skali i odtworzenie terenu, nad którym przelatuje samolot. Zobrazowanie odtworzone jest w sposób umowny na ekranie wskaźnika oscyloskopowego. Teren zobrazowany jest w zakresie sektora lub kręgu, środek którego pokrywa się z miejscem samolotu, a promień zależy od wysokości lotu i na dużych wysokościach wynosi 150 - 200 km. Na zobrazowanym na ekranie terenie dobrze są widoczne brzegi mórz, wyspy, rzeki oraz różnorodne konstrukcje, jak mosty, koleje, miasta, ośrodki przemysłowe itp. Pozwala to na rozpoznanie terenu i odszukanie punktów orientacyjnych, które mogą być wykorzystane do rozwiązywania różnych zadań nawigacji. Pokładowe panoramiczne stacje radiolokacyjne pozwalają:

- określić miejsce znajdowania się obiektu powietrznego, na pokładzie którego znajduje się stacja radiolokacyjna;
- dokonywać pomiaru kierunku i odległości do punktów orientacyjnych;
- określać prędkość powietrzną /podróżną/;
- określać wysokość lotu.

Zastosowanie panoramicznych stacji radiolokacyjnych możliwe jest dzięki temu, że obserwowany teren posiada t.zw. kontrastowość radiolokacyjną t.zn., że poszczególne odcinki terenu i obiekty znajdujące się na powierzchni terenu posiadają zdolność odbijania fal radiowych z różną intensywnością. Przy wizualnej obserwacji oko człowieka zdolne jest rozróżnić przyrost jasności nie mniejszy niż na 10 %. Przy mniejszej różnicy

jasności sąsiednie odcinki obserwowanego terenu stają się nierozróżnialne. Dlatego też radiolokacyjne stacje obserwacji powierzchni Ziemi, mogą być wykorzystane do nawigacji w wypadku istnienia w obserwowanym terenie radiolokacyjnych punktów orientacyjnych. Mało przydatne są do nawigacji przy lotach nad powierzchniami mórz.

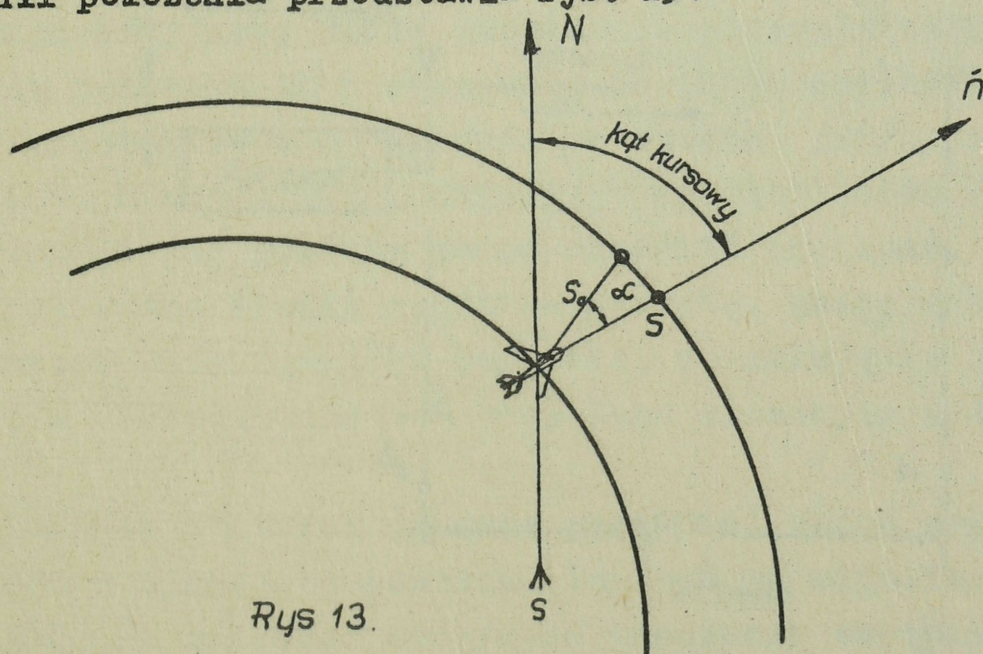
2.7. Pomiar prędkości podróżnej

Prędkość podróżna samolotu może być określona w sposób najbardziej prosty w wypadku zapewnienia możliwości bezpośredniej, telewizyjnej lub radiolokacyjnej obserwacji terenu, nad którym przelatuje obiekt powietrzny. Jeżeli na obserwowanej powierzchni istnieją charakterystyczne punkty orientacyjne, to za pomocą tych punktów można określić dowolny odcinek przebytej drogi S i dokonując pomiaru czasu przelotu t_s można określić wektor prędkości przelotu:

$$\vec{w} = \frac{\vec{S}}{t_s}$$

Pomiary te mogą być powtórzone kilkakrotnie, a rezultaty pomiarów po opracowaniu pozwalają na zwiększenie dokładności określania prędkości. Jeżeli nie ma możliwości określania prędkości podróżnej za pomocą wskazanej powyżej metody, to w tym wypadku wykorzystuje się linie położenia lub też inne pokładowe środki radiotechniczne.

Przykład określania prędkości podróżnej za pomocą linii położenia przedstawia rys. 13.



Rys 13.

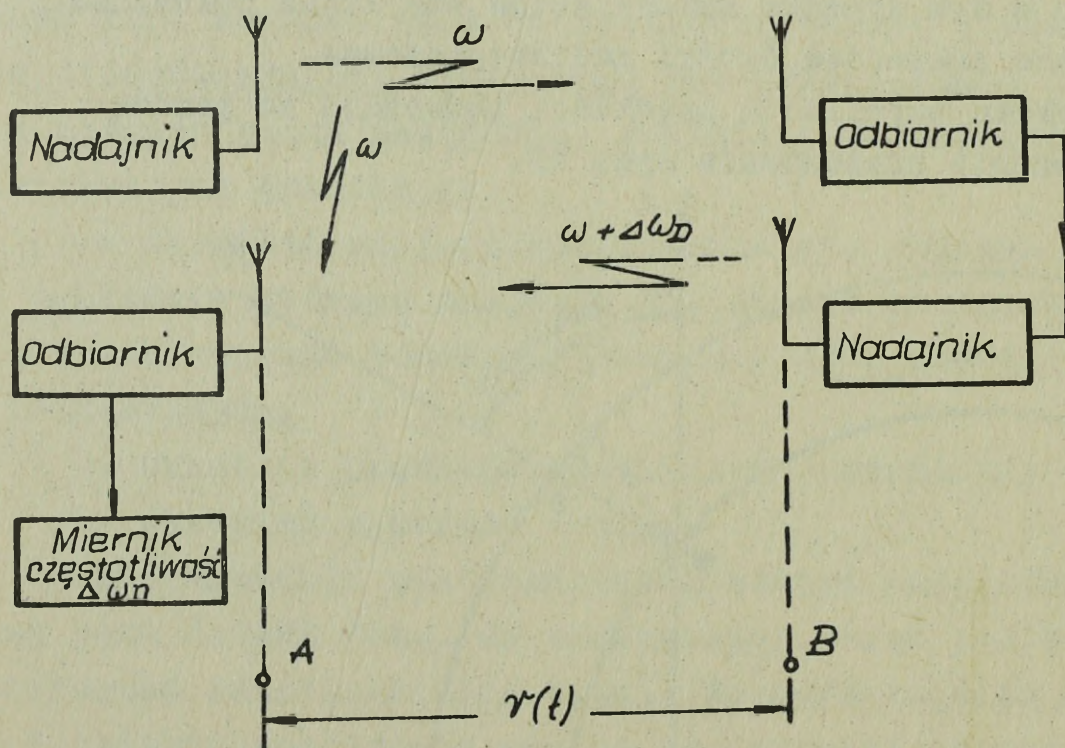
Metoda polega na tym, że samolot dokonuje lotu według danego kursu przecinając dwie linie położenia, odległość między którymi S_0 jest zawczasu znana. Określa się przy tym czas przelotu między tymi liniami t_s oraz kąt przecięcia α . Mając te dane, prędkość podrózną określa się na podstawie zależności:

$$v = \frac{S_0}{t_s \cos \alpha}$$

Prędkość podrózną określa się z tym większą dokładnością im mniejszy jest kąt α i większa dokładność pomiaru czasu t_s .

Ponieważ dwie rodziny linii położenia zapewniają określenie miejsca położenia obiektu, to prędkość podrózną samolotu może być otrzymana z dwóch kolejnych określeń miejsca położenia, analogicznie jak przy obserwacji terenu.

W nawigacji lotniczej szerokie zastosowanie znalazły specjalne środki radiotechniczne do pomiaru prędkości podróźnej, wykorzystujące efekt Dopplera. Zasadę działania tego typu urządzeń obrazuje rys. 14; jest ona następująca :



Rys. 14

W punkcie A znajduje się nadajnik, pracujący na fali ciągłej o częstotliwości ω , oraz odbiornik i miernik częstotliwości. W punkcie B znajdują się odbiornik i nadajnik przeznaczone do odbioru i odwrotnego wypromieniowania odebranych fal radiowych /retranslacja/. Odległość między punktami A i B mierzona jest w okresie czasu $r = r/t/$. Faza wtórnej fali odebranej w punkcie A będzie równa:

$$\varphi /t/ = \frac{4 \pi}{\lambda} r/t/$$

gdzie: $\lambda = \frac{2 \pi c}{\omega}$

Pochodna z wyrażenia fazy $\varphi /t/$ daje przyrost częstotliwości w wyniku wystąpienia efektu Dopplera

$$\Delta \omega_D = \frac{d \varphi /t/}{dt} = \frac{4 \pi}{\lambda} \cdot \frac{dr/t/}{dt}$$

Założmy, że odległość między punktami A i B zmienia się ze stałą prędkością W , tj.

$$r = W \cdot t$$

w tym wypadku:

$$\Delta \omega_D = \frac{4 \pi}{\lambda} \cdot W \quad /15/$$

$$F_D = \frac{\Delta \omega_D}{2 \pi} = \frac{2W}{\lambda} \quad /16/$$

Widzimy, że na wejście odbiornika w punkcie A przychodzą drgania od własnego nadajnika o częstotliwości ω oraz drgania fali retranslacyjnej, która dwukrotnie przeszła odległość r_{AB} między punktami AB i otrzymała przyrost częstotliwości $\Delta \omega_D$. Przyrost częstotliwości, zgodnie ze wzorem /15/, jest funkcją prędkości W . Dlatego też wydzielając częstotliwość dopplerowską F_D i dokonując jej pomiaru można określić prędkość.

Współczesne środki radionawigacyjne, pracujące na zasadzie wykorzystania zjawiska Dopplera, pozwalają na określenie prędkości z dokładnością 1 % oraz kąta znoszenia z dokładnością 1°.

Rezultaty pomiarów wektora prędkości można wykorzystać w nawigacji w sposób bezpośredni lub też po odpowiednim opracowaniu w EMC. Na przykład otrzymane znaczenie wektora \vec{w} , można rozłożyć na składowe w układzie współrzędnych geograficznych W_φ i W_λ /rys. 15/, dokonać całkowania tych współrzędnych

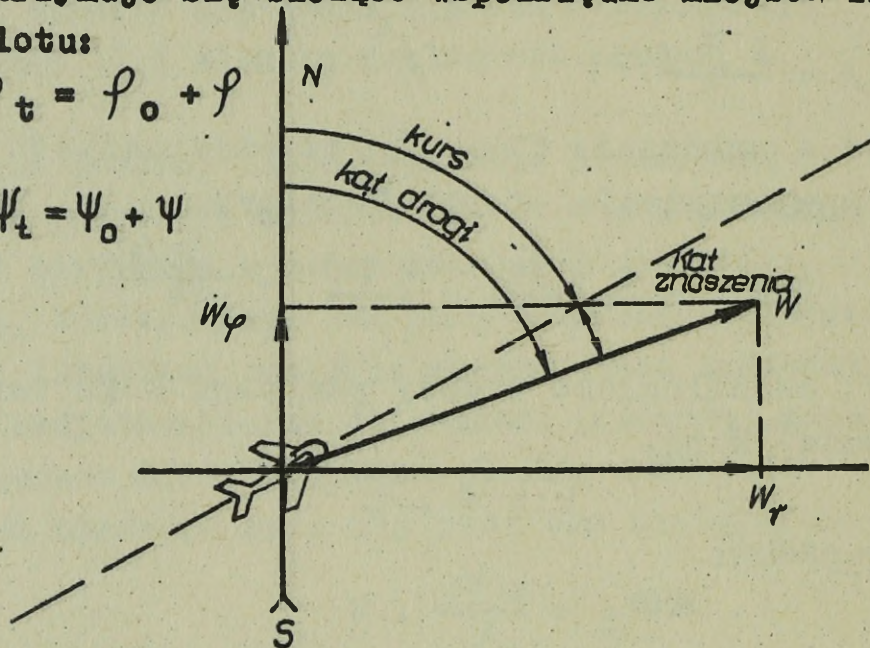
i otrzymać współrzędne składowe przebytej drogi:

$$S_{\varphi} = \int_0^t W_{\varphi} / t / dt; \quad S_{\psi} = \int_0^t W_{\psi} / t / dt$$

następnie wielkości S_{φ} i S_{ψ} za pomocą urządzeń przeliczających przelicza się w odpowiednie przyrosty szerokości i długości geograficznej φ i ψ , sumuje się z początkowym znaczeniem φ_0 i ψ_0 /przy $t = 0$ / i otrzymuje się bieżące współrzędne miejsca znajdowania się samolotu:

$$\varphi_t = \varphi_0 + \varphi$$

$$\psi_t = \psi_0 + \psi$$



Rys. 15

Jeżeli przyjąć współrzędne dowolnego punktu na powierzchni Ziemi φ_z i ψ_z /na przykład współrzędne punktu docelowego/, to znajomość bieżących współrzędnych φ_t i ψ_t pozwala na wyliczenie ortodromicznego kierunku na dany punkt oraz ortodromicznej odległości do tego punktu.

3. RADIOTECHNICZNE ŚRODKI NAWIGACJI STOSOWANE W LOTNICTWIE

Różnorodne możliwości współzależnych środków radiotechnicznych w nawigacji pozwalają zastosować je na wszystkich etapach lotu samolotów od startu do lądowania, zapewniając w ten sposób niemal wszystkie potrzeby nawigacji obiektów nawigowanych. Środki te, zwane środkami radionawigacyjnymi, z punktu widzenia zastosowania można podzielić na kilka podstawowych grup specjalistycznych. Do nich należą:

- urządzenia do pomiaru kątów; są to radionamierniki pokładowe i naziemne różnych typów, radiolatarnie i inny sprzęt pomocniczy;

- urządzenia do pomiaru odległości, do których zaliczamy radiodalnierz i wysokościomierze;

- urządzenia do jednoczesnego pomiaru kątów i odległości; do nich zaliczamy impulsowe i hiperboliczne systemy radionawigacyjne;

- grupa pokładowych urządzeń autonomicznych do pomiaru takich elementów nawigacyjnych, jak prędkość, kąt znoszenia itp.;

- systemy lądowania, jako kompleksy radionawigacyjne zapewniające lądowanie obiektów powietrznych w skomplikowanych warunkach meteorologicznych bez widoczności Ziemi.

Stosownie do wyszczególnionych grup sprzętu, radiotechniczne środki nawigacji zapewniają:

- start, nabór wysokości i lot obiektów powietrznych po zadanej trasie tak pilotowanych przez człowieka, jak również zdalnie kierowanych;

- zbiórki samolotów w powietrzu i lot w zadanym szyku;

- lot samolotów według wybranej trasy oraz kontrola lotów z naziemnych punktów nawigacyjnych;

- naprowadzanie obiektów powietrznych na cele naziemne, nawodne, desantowanie itp.;

- podejście obiektów powietrznych w rejon bazowania i na lotnisko lądowania;

- kierowanie ruchem powietrznym w strefie przylotniskowej;

- lądowanie obiektów powietrznych.

Zanim omówione zostaną podstawowe zasady działania radiotechnicznych środków nawigacji stosowanych w lotnictwie, należy

dokonać klasyfikacji środków radionawigacyjnych i omówić pokrótce wymagania, jakie stawia się współczesnym środkom radionawigacyjnym.

3.1. Klasyfikacja środków radionawigacyjnych

Dla wykonania pomiarów nawigacyjnych metodami radiotechnicznymi, niezmienna wielkość nawigacyjna /kierunek, odległość, prędkość itp./ powinna być związana funkcjonalnie z jednym z kilku parametrów pola elektromagnetycznego. Zależność taka może być ustalona bezpośrednio z dowolnym parametrem rozchodzącej się fali radiowej:

- amplitudą drgań $E/x/$;
- fazą drgań $\varphi /x/$;
- częstotliwością drgań $\omega /x/$;
- czasem rozchodzenia się fali $t/x/$.

W rezultacie wykorzystania jednej z zależności funkcjonalnej, wyszczególnionych powyżej, odebrany na obiekcie nawigowanym sygnał radiowy różni się od wypromieniowanego tym, że przynajmniej jeden z parametrów fali posiada informację nawigacyjną.

Jeżeli wypromieniowane sygnały radiowe mają postać:

$$e = E \sin / \omega t + \varphi / , \quad \text{to}$$

sygnały odebrane mogą mieć jedną z następujących postaci:

$$e = E/x/ \sin / \omega t + \varphi / \quad \text{zmienna amplituda}$$

$$e = E \sin / \omega t + \varphi / x / \quad \text{zmienna faza}$$

$$e = E \sin / \omega / x / t + \varphi / \quad \text{zmienna częstotliwość}$$

$$e = E \sin / \omega t / x / + \varphi / \quad \text{zmienny czas.}$$

Zamiast z parametrami fali nośnej, wielkość nawigacyjna podlegająca pomiarom, może być związana z jednym z parametrów drgań modulujących $E/t/$, t.zn. amplitudą, fazą lub częstotliwością.

Odbioru i wydzielenia informacji nawigacyjnej z sygnału radiowego dokonuje się na podstawie pomiarów parametrów odebranej przez odbiornik fali radiowej. Według tej zasady konstruowane są wszelkie środki radionawigacyjne.

W zależności od parametru fali, jaki wykorzystuje się w danym urządzeniu, środki radionawigacyjne można podzielić na:

- amplitudowe /pomiar amplitudy fali/;
- częstotliwościowe /pomiar częstotliwości/;
- fazowe /pomiar fazy/;
- czasowe impulsowe /pomiar czasu rozchodzenia się fali/.

Każdemu tego typu urządzeniu radionawigacyjnemu właściwe są ogólne, naukowo-techniczne zasady konstrukcji, metody pomiarów nawigacyjnych i typy urządzeń pomiarowych, za pomocą których dokonywany jest pomiar elementów nawigacyjnych.

Przy takim podziale środków radionawigacyjnych możliwe jest omówienie wielu technicznych, nawigacyjnych i eksploatacyjnych możliwości danej grupy urządzeń. Wiele właściwości jest wspólnych, również przy rozpatrywaniu wpływu zewnętrznych warunków, w jakich pracuje sprzęt, jak terenu, rzeźby, jonosfery, zakłóceń itp.

Radionawigacyjnym urządzeniom amplitudowym właściwe jest wykorzystanie anten kierunkowego promieniowania oraz zastosowanie amplitudowych metod pomiaru. Jako mierniki wykorzystywane są tu różnorodne wskaźniki wychyłowe, pozwalające na rejestrację zmian intensywności odbieranych sygnałów radiowych.

W fazowych urządzeniach radionawigacyjnych stosowane są fazowe metody pomiaru, a jako mierniki danych nawigacyjnych /pomiar różnicy faz/ stosowane są różnorodne fazometry/.

W urządzeniach częstotliwościowych pomiaru danych parametrów nawigacyjnych dokonuje się poprzez pomiar częstotliwości za pomocą mierników częstotliwości.

W radionawigacyjnych urządzeniach czasowych, stosowane są do pomiaru małych odcinków czasu, różnorodne chronometry i wskaźniki elektronowe.

We współczesnych systemach radionawigacyjnych stosowane są często kombinowane systemy typu amplitudowo-czasowych, amplitudowo-fazowych itp., których bliżej nie będziemy charakteryzować.

Środki radionawigacyjne różnią się często z punktu widzenia określonych wielkości nawigacyjnych i mogą być rozróżniane jako urządzenia i systemy pomiaru kąta, odległości, kąta i odległości, różnicowo-odległościowe itp. W zasadzie możliwy jest podział urządzeń i systemów radionawigacyjnych z punktu widzenia dowolnego parametru nawigacyjnego, jak również z punktu widzenia dowolnego parametru fali elektromagnetycznej, związanego

funkcyjną zależnością z elementem nawigacyjnym. Jednakże nie wszystkie kombinacje techniczne uzasadnione są z punktu widzenia potrzeb praktycznych.

Według stopnia autonomiczności urządzenia radionawigacyjne dzielą się na autonomiczne i nieautonomiczne. Autonomiczne posiadają aparaturę pokładową i dla dokonania pomiarów nawigacyjnych nie wymagają współdziałania z innymi środkami radionawigacyjnymi. W urządzeniach nieautonomicznych sprzęt wymaga współpracy z innymi urządzeniami i dla zapewnienia pomiarów nawigacyjnych tworzą systemy radionawigacyjne.

Według stopnia automatyzacji środki radionawigacyjne mogą być automatyczne, zautomatyzowane i nieautomatyczne. Pierwsze dokonują pomiarów bez udziału operatora, w drugim wypadku operator tylko częściowo bierze udział w określaniu elementów nawigacyjnych, w trzecim wypadku natomiast operator stale powinien obsługiwać urządzenie przy określaniu danych nawigacyjnych.

3.2. Podstawowe wymagania stawiane środkom radionawigacyjnym

Śród różnorodnych danych taktyczno-technicznych, dotyczących środków radionawigacyjnych, można wydzielić szereg podstawowych wymagań, do których odnoszą się między innymi :

- niezawodność środków radionawigacyjnych;
- dokładność określania danych;
- zasięg działania;
- odporność na zakłócenia;
- przepustowość urządzeń i systemów radionawigacyjnych;
- ekonomiczność eksploatacji,

Charakterystyki powyższe określają ogólne właściwości urządzeń radionawigacyjnych oraz możliwości wykorzystania sprzętu. Znajomość tych charakterystyk konieczna jest dla personelu obsługującego i wykorzystującego sprzęt.

3.2.1. Niezawodność środków radionawigacyjnych

Niezawodnością aparatury radionawigacyjnej nazywamy jej właściwość zachowania swoich parametrów taktyczno-technicznych w zadanych granicach tolerancji w określonych warunkach eksploatacji.

Oprócz jakościowego określenia, pojęcie niezawodności powinno być określone jakościowymi kryteriami, pozwalającymi dokonać ^{YW} oceny niezawodności z punktu widzenia ilościowych wyliczeń i wskaźników eksploatacyjnych.

Ponieważ naruszenie normalnej pracy aparatury radionawigacyjnej jest zjawiskiem przypadkowym, jak mówimy zdarzeniem losowym, zależnym od wielu przyczyn wewnętrznych i zewnętrznych, to ilościowa charakterystyka niezawodności może być określona na podstawie teorii prawdopodobieństwa jako prawdopodobieństwo niezawodnej pracy w określonym czasie i w określonych warunkach eksploatacji.

Pod prawdopodobieństwem niezawodnej pracy rozumiemy prawdopodobieństwo tego, że sprzęt zachowa stałość swoich parametrów w zadanych granicach tolerancji w określonym czasie i określonych warunkach eksploatacji. Oznacza to, że sprzęt w danym czasie i w danych warunkach nie ulegnie uszkodzeniu.

Ilościowo niezawodność aparatury technicznej zakłada się przy jej projektowaniu, rozpracowuje się przy tym układy o odpowiednich konstrukcjach, zakłada się jakość ^{za} stosowanych elementów, odpowiednie wyposażenie w części zamienne, samokontrolę pracy układów, sygnalizację i warunki eksploatacji. Jest to t.zw. założona teoretyczna niezawodność H_1 .

Po wykonaniu danego egzemplarza sprzętu niezawodność teoretyczna może ulec zmianie z powodu zastosowania konkretnych elementów, montażu, technologii, zestrojenia i regulacji itp. Czyli niezawodność praktyczna będzie różnić się od niezawodności teoretycznej. Można przyjąć, że ogólna niezawodność urządzenia będzie sumą niezawodności teoretycznej H_1 i praktycznej H_2 .

Założona niezawodność aparatury będzie zmieniać się w procesie przechowywania i eksploatacji z prędkością zależną od warunków pracy, wibracji, przeciążeń, warunków klimatycznych zasilania, zakłóceń itp. oraz od kwalifikacji personelu obsługującego sprzęt. Funkcja prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy $p/t/$ urządzenia będzie się wahała w granicach $0 \leq p/t/ \leq 1$, a szybkość jej zmniejszania się będzie zależna od wyżej wymienionych przyczyn.

Prawdopodobieństwo niezawodnej pracy aparatury można przedstawić w postaci eksponencjalnej funkcji czasu tj.:

$$p/t/ = e^{-\eta t}$$

gdzie: η - intensywność uszkodzeń tj. ilość elementów, które uległy uszkodzeniu w jednostce czasu w stosunku do średniej ilości elementów biorących udział w pracy w danym odcinku czasu.

Jeżeli rozpatrywać niezawodność złożonego systemu składającego się z N urządzeń, które same posiadają prawdopodobieństwo niezawodnej pracy $p_i/t/$, to całkowita niezawodność systemu będzie równa iloczynowi niezawodności poszczególnych składowych systemu:

$$p_c/t/ = p_1/t/ p_2/t/ p_3/t/ \dots p_r/t/ = \prod_{i=1}^N p_i/t/$$

Przy tym zakłada się, że uszkodzenie każdego urządzenia systemu jest niezależnym zdarzeniem losowym, a awaria chociażby jednego urządzenia powoduje przestój całego systemu.

Problem zwiększenia niezawodności aparatury radionawigacyjnej jest jednym z najbardziej ważnych zagadnień technicznych. Wystarczy przykład systemu lądowania, w którym pracują tysiące lamp elektronowych i kilka tysięcy elementów i podzespołów. Żaden z tych elementów nie może zawieść w najbardziej odpowiedzialnym momencie pracy. Wystarczy, że jeden z elementów ulegnie uszkodzeniu, a cały system może ulec awarii, co z kolei pociągnąć może za sobą nieobliczalne konsekwencje. Dlatego też stosowane jest dublowanie urządzeń, a nawet podzespołów; w wypadku uszkodzenia, automatycznie element uszkodzony zastępowany jest elementem dublującym.

3.2.2. Dokładność określania danych nawigacyjnych

Dokładnością radionawigacyjnych urządzeń i systemów nazywamy ich właściwość zapewnienia otrzymywania informacji nawigacyjnej z błędami nieprzekraczającymi zadanych granic tolerancji przy określonych warunkach eksploatacji.

Z punktu widzenia ilościowego określenia dokładności RNU i RNS¹, charakteryzujemy ją wielkością błędów, jakie mogą powstać przy zadanych parametrach ruchu obiektu nawigowanego z danymi podlegającymi pomiarom w procesie opracowywania i przetwarzania informacji nawigacyjnej.

¹/ RNU, RNS - skrótem tym oznaczamy: radionawigacyjne urządzenia i radionawigacyjne systemy.

Błędy pomiarów środków radionawigacyjnych są wynikiem niedokładności zasad i metod przyjętych za podstawę konstrukcji radionawigacyjnych urządzeń pomiarowych oraz trudności ustalenia zewnętrznych i wewnętrznych warunków eksploatacji, a także subiektywnych właściwości operatora - człowieka, w wypadku kiedy dany system radionawigacyjny nie jest zautomatyzowany i wymaga obsługi człowieka.

Błędy przy określaniu elementów nawigacyjnych przedstawiają sobą różnicę między ilościowym znaczeniem mierzonej wielkości α_i i rzeczywistym jej znaczeniem A . Różnica ta składa się z błędów systematycznych ν i błędów przypadkowych, oznaczanych symbolem δ_i .

$$\Delta \alpha_i = \nu + \delta_i$$

Błędy systematyczne mogą być uwzględnione wprowadzeniem odpowiednich poprawek, natomiast błędy przypadkowe, z powodu ich właściwości, nie mogą być wyłączone przy pojedynczych pomiarach, dlatego też uwzględnia się je jako średnie wielkości przy zadanym prawdopodobieństwie ich powstawania p/δ .

Rozkład prawdopodobieństwa błędów przypadkowych w większości wypadków dostatecznie dokładnie odzwierciedla znane prawo rozkładu normalnego, zgodnie z którym gęstość rozkładu błędów prawdopodobnych w $|\delta|$ wyraża wzór:

$$w/\delta/ = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i - \alpha)^2}{2\sigma^2}} \quad /17/$$

gdzie: δ - bieżące znaczenie błędów przypadkowych $\delta = \alpha_i - \alpha$
 α - średnie znaczenie mierzonej wielkości nawigacyjnej
 σ - średniokwadratowy błąd pomiaru.

Przy określaniu wielkości błędów według rezultatów pomiarów wielokrotnych, wylicza się początkowo średnie arytmetyczne z n otrzymanych odczytów:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

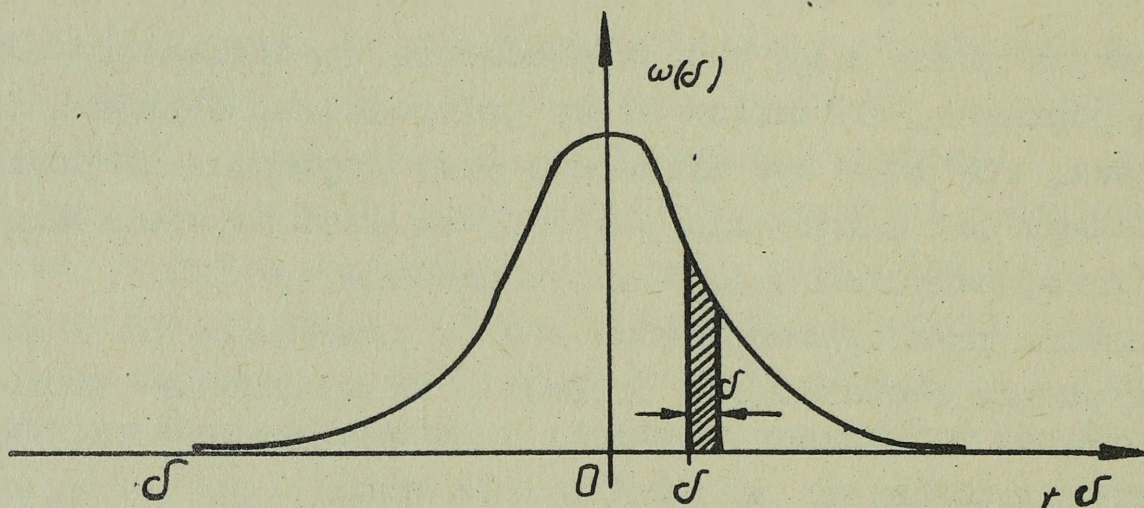
które uważane jest jako najbardziej prawdopodobne znaczenie mierzonej wielkości A . Następnie znajduje się błędy dopuszczalne przy każdym pomiarze $\delta_i = \alpha_i - \alpha$ i z kolei oblicza się średniokwadratowy błąd za pomocą wzoru:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1}}$$

Jeżeli następnie wykonać wykres funkcji w/δ / ze wzoru /17/, to otrzymana krzywa będzie charakteryzowała zmiany gęstości prawdopodobieństwa błędów przypadkowych w zależności od ich wielkości /patrz rys. 16/.

Na podstawie otrzymanych danych można określić prawdopodobieństwo tego, że błąd będzie znajdował się w granicach od δ do $\delta + \Delta\delta$

$$dp = w/\delta / d\delta$$



Rys. 16

Prawdopodobieństwo tego, że błąd pomiaru będzie znajdował się w granicach od zero do $\pm \delta$ określa się za pomocą całki:

$$p/\delta / = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\delta}^{+\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta$$

Całka powyższa nosi nazwę całki prawdopodobieństwa, wartość, której często podawane są w tablicach. Liczbowe znaczenie prawdopodobieństwa, w zależności od stosunku δ/σ przedstawione są poniżej

δ/σ	0,5	0,65	1	2	3	∞
p	0,38	0,90	0,68	0,95	0,997	1

Jako kryterium dla oceny dokładności pomiarów w nawigacji wykorzystuje się średniokwadratowy błąd σ , posiadający prawdopodobieństwo $p/\sigma = 0,68$ oraz podwójny średniokwadratowy błąd 2σ , posiadający wartość prawdopodobieństwa $p/2\sigma = 0,95$. W niektórych wypadkach jako kryterium dokładności przyjmowany jest prawdopodobny błąd ρ z prawdopodobieństwem $p/\rho = 0,5$.

Jeżeli proces otrzymywania informacji nawigacyjnej jest zautomatyzowany, to może być otrzymane N niezależnych pomiarów bieżącego znaczenia wielkości nawigacyjnej A . Po opracowaniu danych i uśrednieniu rezultatów, błędy przypadkowe mogą być zmniejszone o \sqrt{N} razy, co zwiększa dokładność otrzymywanych danych.

Dokładność RNU i RNS narzucana jest z góry przy projektowaniu sprzętu, zgodnie z przeznaczeniem. Dążenie do otrzymywania bardzo dużych dokładności, jeżeli nie jest to uzasadnione potrzebami, prowadzi do skomplikowania aparatury i pociąga za sobą obniżenie niezawodności, rosną przy tym koszty eksploatacji.

3.2.3. Zasięg działania środków radionawigacyjnych

Zasięgiem działania RNU i RNS nazywamy największą odległość między obiektem nawigowanym i punktem radionawigacyjnym, przy której zapewniony jest pomiar nawigacyjnych elementów lotu zadaną dokładnością. Normalnie dokładność środków radionawigacyjnych zależy od kierunku. Kierunek, na którym zapewnia się najlepszą dokładność ^{pomiaru} elementów nawigacyjnych nazywa się głównym kierunkiem systemu radionawigacyjnego. Zasięg działania nie jest wielkością stałą, zależy od wielu czynników, a przede wszystkim od terenu i warunków klimatycznych i meteorologicznych.

3.2.4. Odporność na zakłócenia środków radionawigacyjnych

Odporność na zakłócenia urządzeń można określić jako właściwość aparatury dotycząca niezawodnej pracy w warunkach naturalnych lub sztucznych zakłóceń radioelektronicznych. Odporność na zakłócenia osiąga się poprzez konstruowanie odpowiednich układów zabezpieczających przed zakłóceniami oraz poprzez skrytość pracy sprzętu. Skrytością pracy nazywamy przekazywanie danych /informacji/ tylko tym korespondentom, którzy posiadają odpowiednie dane o zasadniczych parametrach sprzętu

radionawigacyjnego, z którym współpracują.

Skrytość pracy osiąga się poprzez kierunkowe promieniowanie fal radiowych, skrócenie czasu pracy urządzeń do niezbędnej konieczności, zwężenie widma promieniowanych sygnałów, zmniejszenie promieniowanej mocy oraz zmiany zasadniczych parametrów technicznych w czasie.

Odporność na zakłócenia nazywamy zdolność aparatury do zachowania swoich parametrów taktyczno-technicznych w zadanych granicach tolerancji przy pracy w warunkach zakłóceń radioelektronicznych danego typu. Zdolność ta zależna jest przede wszystkim od racjonalnego wyboru układu i parametrów urządzeń odbiorczo-pomiarowych stosowanych w środkach radionawigacyjnych. Należy mieć na uwadze, że odporność na zakłócenia osiąga się poprzez zatury energetyczne lub też skomplikowanie aparatury, względnie zwiększenie czasu otrzymywania informacji nawigacyjnej. To wszystko prowadzi do zmniejszenia niezawodności sprzętu.

3.2.5. Przepustowość środków radionawigacyjnych

Pojęcie przepustowości RNU i RNS określa zdolność jednostkowej obsługi określonej ilości korespondentów. Zwiększenie przepustowości ponad przewidzianą liczbę prowadzi do przeciążeń naziemnych punktów radionawigacyjnych oraz wzajemnych zakłóceń, a także do obniżenia jakości i błędów pomiaru nawigacyjnych elementów lotu.

3.2.6. Ekonomiczność środków radionawigacyjnych

Ekonomiczność radionawigacyjnego wyposażenia określa się kosztami związanymi z produkcją i eksploatacją. W zastosowaniu do wyposażenia naziemnego, przy porównawczej ocenie ekonomiczności różnorodnej aparatury radionawigacyjnej, szczególnie zależy nam na określeniu kosztów na kwadratowy kilometr obsługiwanej powierzchni, w wypadku gdy system radionawigacyjny przeznaczony jest do wyposażenia danego terytorium. Względnie na kilometr trasy powietrznej, jeżeli system przeznaczony jest do obsługi zadanych marszrut, lub też kosztami wyposażenia radionawigacyjnego jednego lotniska określonej klasy.

Bardziej ekonomiczny będzie ten system radionawigacyjny, który przy jednakowych możliwościach nawigacyjnych wymaga

mniejszych nakładów na siły i środki przy jego produkcji i eksploatacji.

W zastosowaniu do pokładowego wyposażenia radionawigacyjnego, ważna jest ocena kosztów kompleksu wyposażenia obiektu nawigacyjnego /samolotu, okrętu, czołgu itp/, przy jego produkcji, a w szczególności w procesie eksploatacji z uwzględnieniem kosztów na przeglądy profilaktyczne, remonty, części zamienne i obsługę. Zmniejszenie ciężaru i rozmiarów pokładowej aparatury radionawigacyjnej, zmniejszenie poboru mocy z sieci pokładowej, uproszczenie obsługi podczas lotu, automatyzacja, w dużym stopniu wpływają na poprawienie wskaźnika ekonomiczności urządzeń.

3.3. R a d i o n a m i e r n i k i

Spółród wielu środków radionawigacyjnych, stosowanych w lotnictwie, radionamierniki znalazły bardzo szerokie zastosowanie. Stosowane są one do prowadzenia samolotów według wyznaczonej trasy, doprowadzania samolotów do lotniska lądowania, dowodzenia w strefie przylotniskowej, wykonania lądowania i innych zadań nawigacyjnych.

Pokładowe radionamierniki, zwane radiokompasami, pracują w zasadzie na falach średnich, natomiast radionamierniki naziemne pracują na falach krótkich i ultrakrótkich, przy czym radionamierniki UKF znajdują najszersze zastosowanie.

Szybki rozwój lotnictwa i nasilenie ruchu powietrznego w strefie przylotniskowej wymaga zwiększenia operatywności dowodzenia ruchem powietrznym oraz wykorzystania dużej ilości kanałów radiowych, a także wykonania dużej ilości namiarów w określonym czasie. Wymagania te mogą być zrealizowane jedynie przy zastosowaniu automatyzacji dowodzenia i wykorzystaniu ultrakrótkofalowych radionamierników automatycznych.

W związku z powyższym współczesne radionamierniki naziemne pracują w zakresach fal metrowych, decymetrowych i centymetrowych, a czas otrzymania namiaru nie przekracza 2 + 3 sek.

Głównymi parametrami radionamierników jest czułość katowa i dokładność określania namiaru. Pod pojęciem czułości katowej rozumiemy jego zdolność rejestrowania najmniejszych odchyleń osi kierunkowej charakterystyki antenowej od linii namiaru. Czułość zależy od metody, krzywizny charakterystyki kierunkowej anteny, sposobu zobrazowania, poziomu szumów

oraz od subiektywnych właściwości operatora. Czynniki te określają t.zw. realną eksploatacyjną czułość radionamierników.

Dokładność pracy radionamierników charakteryzuje się błędem kątowym określenia namiaru. Błędy te mogą powstać z powodu różnorodnych przyczyn, do których zaliczamy między innymi:

- wpływ różnorodnych warunków propagacyjnych fal radiowych;
- wpływ zakłóceń radioelektronicznych;
- błędy konstrukcyjne układów radionamierników;
- niewystarczająca czułość radionamiernika.

Dokładność współczesnych radionamierników różnego przeznaczenia określa się poziomem stawianych wymagań i mieści się w granicach od 1° + 2° . Zwiększenie dokładności i czułości radionamierników prowadzi do rozbudowania układów, co z kolei pogarsza manewrowość, która nie jest bez znaczenia w warunkach zastosowań wojskowych. Ciężar radionamierników stosowanych w lotnictwie mieści się w granicach od paru kilogramów do kilkudziesięciu ton.

Głównym problemem zwiększenia czułości i dokładności namiarów jest zagadnienie usunięcia błędów powstających na skutek różnorodnych warunków rozchodzenia się fal radiowych oraz błędów powstających z powodu odbić fal radiowych od jonosfery i przedmiotów terenowych. W tym celu rozpracowuje się coraz to nowsze konstrukcje anten, o większej kierunkowości i zyskach kierunkowych.

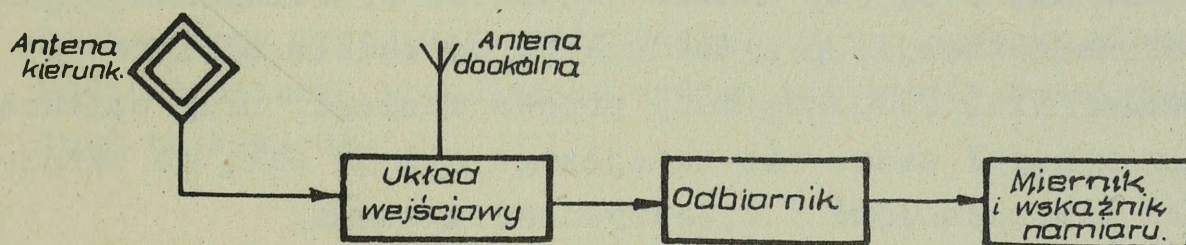
Pośród radionawigacyjnych radionamierników amplitudowych, istnieją urządzenia pracujące na zasadzie wykorzystania jednej z możliwych metod amplitudowego namiaru: metody minimum, maksimum lub porównywania sygnałów. W praktyce często spotyka się radionamierniki wykorzystujące jednocześnie trzy metody namiaru i w procesie eksploatacji, w zależności od potrzeb, istnieje możliwość wyboru jednej z nich. Są to t.zw. radionamierniki kombinowane.

3.3.1. Radionamierniki z pomiarem według metody minimum

Proces określenia kierunku na pracującą radiostację składa się z trzech zasadniczych operacji:

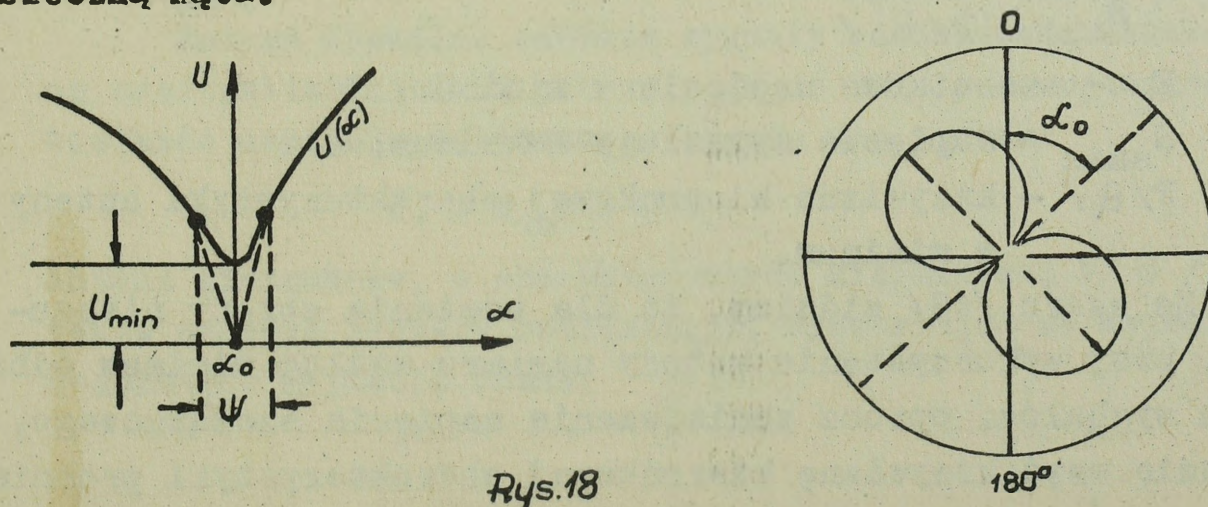
- nastrojenie odbiornika radiokompasu na częstotliwość i odbiór sygnałów radiostacji /radiolatarni/;
- określenie namiaru;
- usunięcie niejednoznaczności odczytu i odczyt kąta.

Celem wykonania poszczególnych operacji, typowy układ radionamiernika powinien posiadać antenę kierunkową, antenę bezkierunkową, blok wejściowy, odbiornik, urządzenie pomiarowe i wskaźnik namiaru /patrz rys. 17/



Rys. 17

W pierwszych wzorach radionamierników, tak pokładowych jak i naziemnych, wykorzystywana była metoda namiaru na minimum sygnałów odbieranych. Prostsze typy takich radionamierników posiadały antenę kierunkową o charakterystyce ósemkowej, która obracana była przez operatora i ustawiana w takie położenie, w którym występował najmniejszy odbiór sygnałów /patrz rys. 18/. Punkt odczytu namiaru na skali kątowej określany był na podstawie odchylenia anteny od minimum w obie strony. Minimum znajdowało się jako dwusieczną kąta.



Rys. 18

Antena bezkierunkowa wykorzystywana była do uprzedniego odbioru sygnałów radiostacji, celem jej rozpoznania i zestrojenia odbiornika. Następnie w procesie namiaru stosowana była dla "wyostrzenia" minimum /kompensacji/ oraz usunięcia dwuznaczności odczytu, ponieważ ósemkowa charakterystyka kierunkowa anteny dawała dwa namiary różniące się o 180° .

Minimum odbioru sygnałów określało się metodą akustyczną, przy czym wysoka czułość ucha ludzkiego, w stosunku do małych przyrostów sygnałów /około 1 db/, zapewniała stosunkowo wysoką czułość radionamierników. Oprócz tego właściwość ucha rozróżniania bliskich częstotliwości drgań akustycznych, różniących się o 0,3 %, dawała możliwość rozróżnienia sygnałów od dwóch radiostacji, przychodzących od kanału odbiorczego radionamiernika. Jednakże cały proces namiaru, przy opisanej metodzie wymagał czasu nie mniejszego niż 30 sek, co bardzo obniżało przepustowość i operatywność systemu.

W związku z powyższym, akustyczny sposób odczytu zamieniony został odczytem wzrokowym, a proces określania namiaru zautomatyzowano. Powstały półautomatyczne radionamierniki, stosowane jeszcze do dzisiaj.

W radionamiernikach półautomatycznych kierunkowa charakterystyka promieniowania anteny obraca się w sposób ciągły, a zmieniający się poziom odbieranych sygnałów przekazuje się na płytki odchylające wskaźnika oscyloskopowego, na ekranie którego odczytuje się odpowiedni namiar.

Szerokość strefy nieczułości ψ radionamiernika akustycznego można wyznaczyć na podstawie wzoru:

$$\psi = \frac{E_n}{E_{smax}} \frac{1}{F/\theta_0} \quad /18/$$

Gdzie: E_n - szczytkowe napięcie w minimum;

E_{smax} - napięcie sygnału w maksimum;

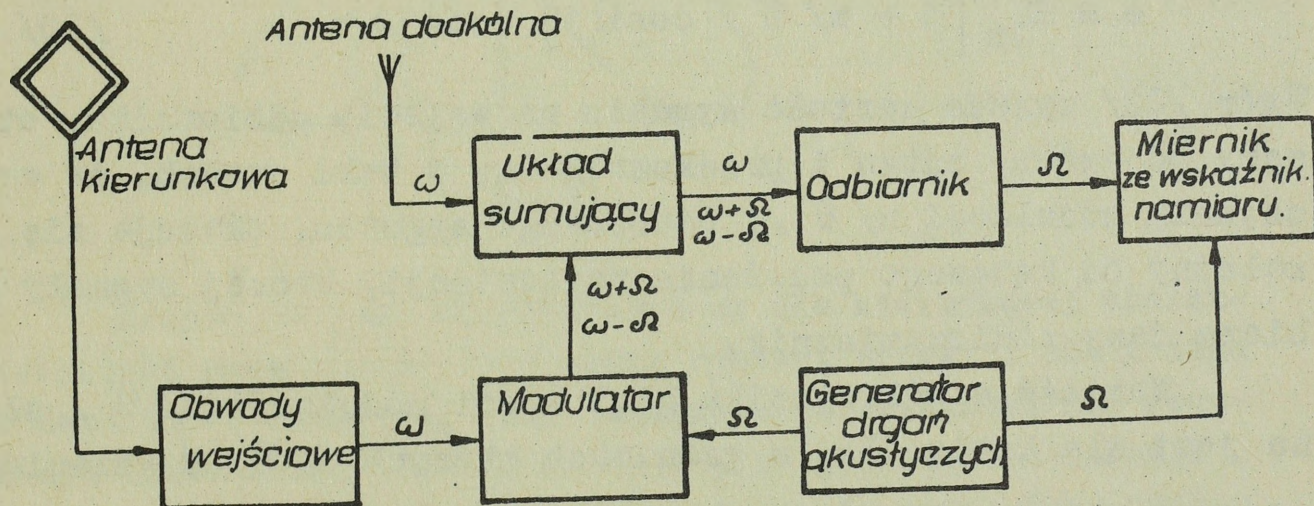
F/θ_0 - krzywizna kierunkowej charakterystyki anteny w minimum.

Ze wzoru /18/ widzimy, że dla zwężenia strefy nieczułości, przy wykorzystaniu metody namiaru według minimum odbieranych sygnałów, oprócz zmniejszenia napięcia szczytkowego, należy zwiększyć krzywiznę kierunkowej charakterystyki promieniowania anteny. Zwiększenie charakterystyki promieniowania można

osiągnąć poprzez zastosowanie bardziej skomplikowanych anten, co prowadzi do zwiększenia rozmiarów konstrukcji i nie zawsze jest to możliwe, ze względów taktycznych.

Dalszym udoskonaleniem radionamierników, pracujących według zasady minimum, było wykorzystanie metody pomiaru minimum głębokości modulacji sygnałów odbieranych. Radionamierniki tego typu całkowicie zastąpiły radionamierniki pracujące według metody minimum poziomu odbieranych sygnałów.

Informacja o kierunku w przestrzeni zawarta w sygnale radiowym jest funkcjonalnie związana z głębokością modulacji. Zależność głębokości modulacji m / Θ / od kierunku może posiadać wyraźnie zaznaczone minimum, co pozwala na określenie kierunku na pracującą radiostację. Typowy schemat blokowy radionamiernika pracującego według tej zasady przedstawiony jest na rys. 19.



Rys. 19

Antena dookólna odbiera sygnały radiostacji nadawczej na częstotliwości ω i przesyła je do układu sumującego. Wielkość napięcia odbieranego wyraża się wzorem:

$$e_1 = E_{1m} \cos \omega t$$

Antena kierunkowa, o charakterystyce kierunkowej F / Θ /, także odbiera sygnały radiostacji, wytwarzając na wejściu modulatora napięcie równe:

$$e_2 = E_{2m} F / \theta / \cos \omega t$$

Modulator balansujący, sterowany generatorem akustycznym o częstotliwości Ω przetwarza sygnały w postać następującą:

$$e_2^+ = E_{2m} F / \theta / \cos \Omega t \cos \omega t$$

które przekazywane są do układu sumującego. Na wejściu układu sumującego otrzymujemy:

$$e = e_1 + e_2^+ = E_{1m} \cos \omega t + E_{2m} F / \theta / \cos \omega t \cos \Omega t$$

po przekształceniu otrzymamy następującą postać:

$$e = E_{1m} \left[1 + \frac{E_{2m}}{E_{1m}} F / \theta / \cos \Omega t \right] \cos \omega t \quad /19/$$

przyjmując oznaczenia:

$$m / \theta / = \frac{E_{2m}}{E_{1m}} F / \theta / = s F / \theta / , \text{ gdzie: } a = \frac{E_{2m}}{E_{1m}}$$

otrzymamy ostatecznie:

$$e = E_{1m} \left[1 + m / \theta / \cos \Omega t \right] \cos \omega t \quad /20/$$

Wzór /20/ wyraża wartość sygnału na wejściu odbiornika, otrzymany od dwóch anten i przekształcony w taki sposób, że współczynnik modulacji $m / \theta /$, odebranego sygnału, okazuje się być zależny od kąтового położenia radiostacji, której sygnały odbiera dany radionamiernik.

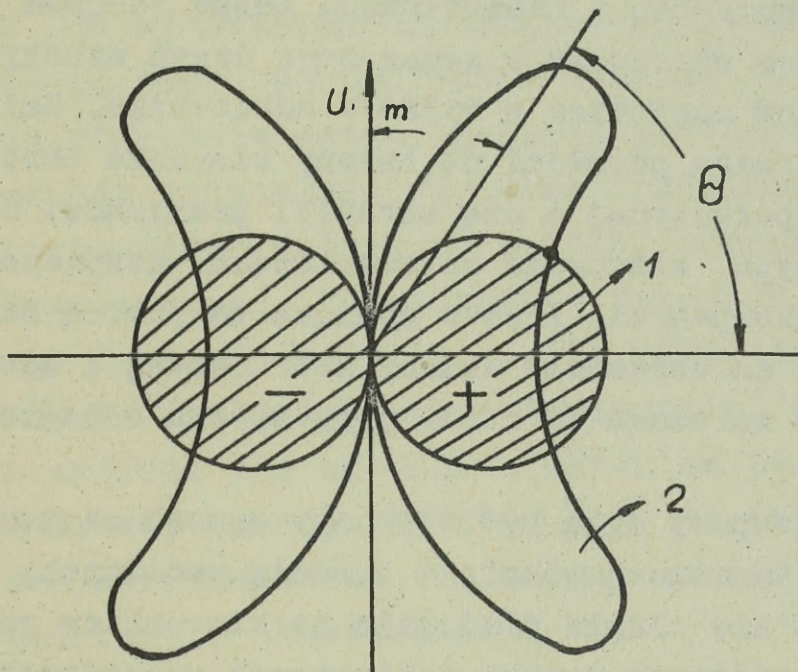
Wartość współczynnika głębokości modulacji $m / \theta /$ słuszną jest dla kątów θ , w granicach których $m / \theta /$ zmienia się od zera do jedności:

$$0 < m / \theta / < 1$$

Jeżeli stosunek amplitud sygnałów z anteny kierunkowej E_{2m} i dookólnej E_{1m} w obwodzie sumującym jest taki, że współczynnik $a < 1$, to wyrażenie /20/ jest słuszne dla dowolnych kątów od zera do 360° . Przy $a > 1$, występuje zjawisko przemodulowania, procesy w układzie radionamiernika komplikują się i wzór przestaje być słuszny. Nie ma w tym wypadku możliwości namiaru.

Po wzmocnieniu i detekcji sygnałów, na wyjściu odbiornika, otrzymuje się napięcie niskiej częstotliwości Ω , posiadające informację o kątowym położeniu radiostacji.

Na rys. 20 pokazana jest zależność głębokości modulacji i sygnału wyjściowego od kierunku na radiostację przy normalnych amplitudach t.zn. przy $a \leq 1$ /krzywa 1/ oraz przy przemodulowaniu t.tn. przy $a > 1$ /krzywa 2/.



Rys. 20

Krzywe na rys. 20 określone są dla kierunkowej charakterystyki promieniowania anteny w postaci ósemki i odbiornika z detektorem liniowym, przy zastosowaniu automatycznej regulacji wzmacnienia. Jeżeli $\theta = 90^\circ$, to głębokość modulacji i napięcia na wyjściu odbiornika równa się zero. Przy odchyleniu od tego kierunku, głębokość modulacji i napięcie wyjściowe wzrasta. Zmianę kierunku odchylenia od radiostacji o kąt $\pm / 90^\circ - \theta /$ prowadzi do zmiany fazy obwiedni napięcia wyjściowego i fazy sygnału wyjściowego o 180° , co oznaczone jest na rys. 20 znakami + i -. Ta właściwość sygnału wyjściowego pozwala na usunięcie niejednoznaczności odczytu; jednocześnie z dokonaniem namiaru, co znacznie przyspiesza proces radionamierzenia.

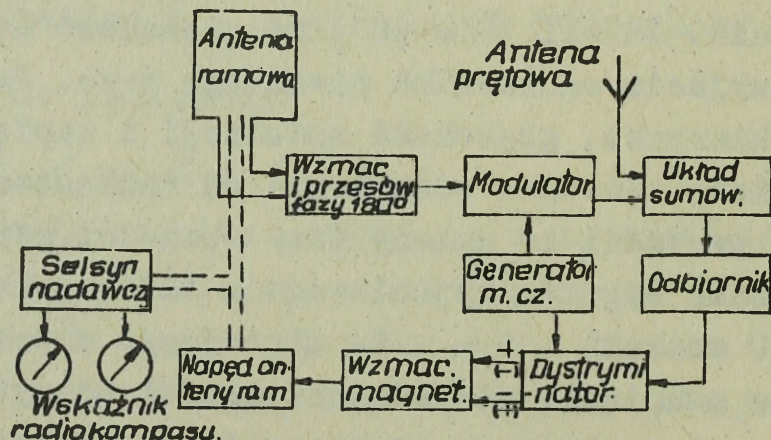
Charakterystyka kierunkowa anteny obracana jest aż do zerowego wskazania przyrządu pomiarowego, przy którym doko-

nuje się odczytu kąta namiaru. Przy tym namiar odczytuje się taki, przy którym kierunek odchylenia strzałki przyrządu jest zgodny z kierunkiem odchylenia anteny. Przy odwrotnym odczycie namiar różnić się będzie o 180° .

Często zamiast rozpatrywanego urządzenia pomiarowego z synchronizowanym detektorem balansowym, wykorzystuje się ferrodynamiczny przyrząd prądu zmiennego, składający się z dwóch cewek: ruchomej i nieruchomej. Cewka ruchoma zasila-
na jest napięciem wzorcowym z generatora drgań akustycznych, ruchoma natomiast napięciem z wyjścia odbiornika. Zmiana fazy napięcia wyjściowego prowadzi do zmiany kierunku obrotu cewki ruchomej i połączonej z nią strzałki przyrządu. Radionamierniki tego typu, stosowane na samolotach, nazywane są często radiopółkompasami. Proces namiaru za pomocą radiopółkompasów polega na obracaniu anteny kierunkowej i zatrzymaniu jej w położeniu zerowego odbioru, przy którym odczytuje się namiar.

Radiopółkompasy mogą być w prosty sposób zautomatyzowane za pomocą serwomechanizmów i układów nadążnych, dzięki którym zapewnia się ciągłe śledzenie za kierunkiem przychodzących sygnałów radiowych danych radiostacji prowadzących. Urządzenia pokładowe automatycznych radionamierników otrzymały nazwę r a d i o k o m p a s ó w.

Na rys. 21 przedstawiony jest typowy układ blokowy radiokompasu pokładowego, który znalazł najszersze zastosowanie w lotnictwie.



Rys. 21

Schemat blokowy radiokompasu (automatycznego radionamiernika pokładowego).

Automatyczny układ nadążny obraca antenę ramową aż do momentu wyszukania minimalnego odbioru i utrzymuje ją w tym położeniu. Siła elektromotoryczna, indukowana w antenie ramowej, przesunięta jest względem siły elektromotorycznej w antenie dookólnej o 180° . Przesunięcie to eliminuje przesuw-
nik fazy, włączony na wyjściu wzmacniacza napięcia anteny ramowej. Napięcie z anteny ramowej modulowane jest w modulatorze napięciem małej częstotliwości, otrzymywanym z generatora akustycznego. Na wyjściu modulatora uzyskuje się dwa pasma boczne modulacji bez częstotliwości nośnej.

Podczas obracania anteny ramowej położeniu minimalnego odbioru odpowiada największa głębokość modulacji. Wypadkowa faza obu pasm bocznych zależy od połówki charakterystyki kierunkowej anteny ramowej. Po dodaniu w układzie sumowania do tego przebiegu fazy odniesienia, czyli napięcia z anteny dookólnej, uzyskuje się przebieg napięcia małej częstotliwości, którego faza zmienia się zgodnie z właściwą połówką charakterystyki kierunkowej anteny ramowej. Faza ta jest ostatecznie wyróżniona w dyskryminatorze, do którego doprowadzone jest napięcie z generatora akustycznego.

Na wejściu dyskryminatora powstaje napięcie określonej biegunowości, które poprzez wzmacniacz magnetyczny uruchamia silnik napędu anteny ramowej. Napięcie to maleje do zera z chwilą osiągnięcia przez antenę ramową położenia minimalnego odbioru.

Oś anteny ramowej sprzężona jest za pomocą łącza selsynowego ze wskaźnikami umieszczonymi na tablicy przyrządów nawigacyjnych pilota i nawigatora. Skala wskaźników podzielona jest na 360° . Łącza selsynowe są ^{tak} zsynchronizowane, że wartość kąta zerowego odbioru odpowiada kierunkowi na radiostację, zgodnemu z osią podłużną samolotu. Antena bezkierunkowa pozwala jednocześnie odbierać informacje radiofoniczne, sygnały identyfikujące i p.

Radiokompasy pokładowe pracują w zakresie częstotliwości $150 \div 2000$ kHz, co umożliwia dokonywanie namiarów na dowolne radiostacje foniczne pracujące w podanym paśmie.

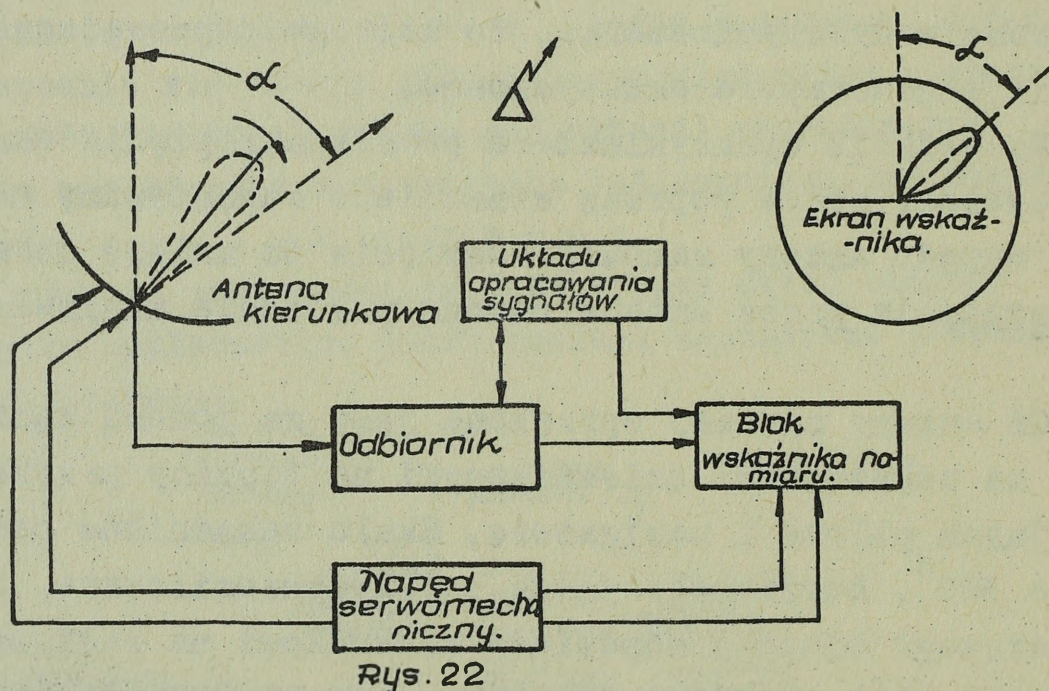
Czułość radiokompasów waha się w granicach od 10 do 40 μV , zaś dokładność namiaru jest rzędu 2%.

3.3.2. Radionamierniki pracujące z wykorzystaniem namiaru na maksimum

Metoda radionamiaru na maksimum odbieranych sygnałów wymaga zastosowania anten o wąskich charakterystykach promieniowania, co z kolei pociąga za sobą stosowanie zakresu fal UKF, gdyż w przeciwnym wypadku rozmiary anten kierunkowych byłyby niedopuszczalnie duże.

Zastosowanie anten o dużej kierunkowości znacznie obniża wpływ odbić od przedmiotów terenowych na dokładność namiaru oraz pozwala w pełni wykorzystać moc sygnału w punkcie odbioru, a także zapewnia możliwość namiaru kilku radiostacji pracujących jednocześnie na tej samej fali radiowej.

Istnieje kilka modyfikacji radionamierników pracujących według zasady namiaru na maksimum. Ogólną zasadę pracy tego typu radionamierników wyjaśnimy przy pomocy schematu blokowego przedstawionego na rys. 22.



Kierunkową charakterystykę antenową, za pomocą układów napędowych, wprowadza się w szybkie obroty. Sygnały odbierane z namierzanej radiostacji doprowadza się do odbiornika, gdzie po wzmacnieniu i detekcji przekazywane są do wskaźnika oscyloskopowego. System odchylający lampy obrazowej obraca się

synchronicznie z kierunkową charakterystyką promieniowania anteny radionamiernika. W rezultacie na ekranie wskaźnika tworzy się zobrazowanie charakterystyki kierunkowej anteny w postaci wąskiego promienia w kształcie listka, położenie katowe którego odpowiada namiarowi na radiostację.

W celu ukształtowania odpowiedniej charakterystyki kierunkowej w wielu radionamiernikach zakresu UKF stosuje się wieloelementowe anteny z dużą ilością promienników, ułożonych w kształcie koła. Poprzez obrotowy przełącznik antenowy, typu pojemnościowego, część promienników podłącza się na wejście odbiornika. Napięcie od wszystkich promienników uprzednio zgrywa się w fazie za pomocą urządzenia kompensacyjnego, zbudowanego z linii opóźniających, a następnie sumuje się synfazowo. W rezultacie tworzy się charakterystyka kierunkowa, maksimum której zorientowane jest względem dwusiecznej kąta, w którym podłączone są promienniki na wejście odbiornika.

Ważnym zagadnieniem udoskonalenia radionamierników pracujących według metody maksimum, jest zapewnienie wymaganej dokładności namiaru. W tym celu, za pomocą układu opracowania sygnałów, dokonuje się uprzedniego opracowania sygnałów wyjściowych, które następnie podaje się do wskaźnika. Pozwala to z dużą dokładnością określić położenie maksimum na ekranie lampy oscyloskopowej.

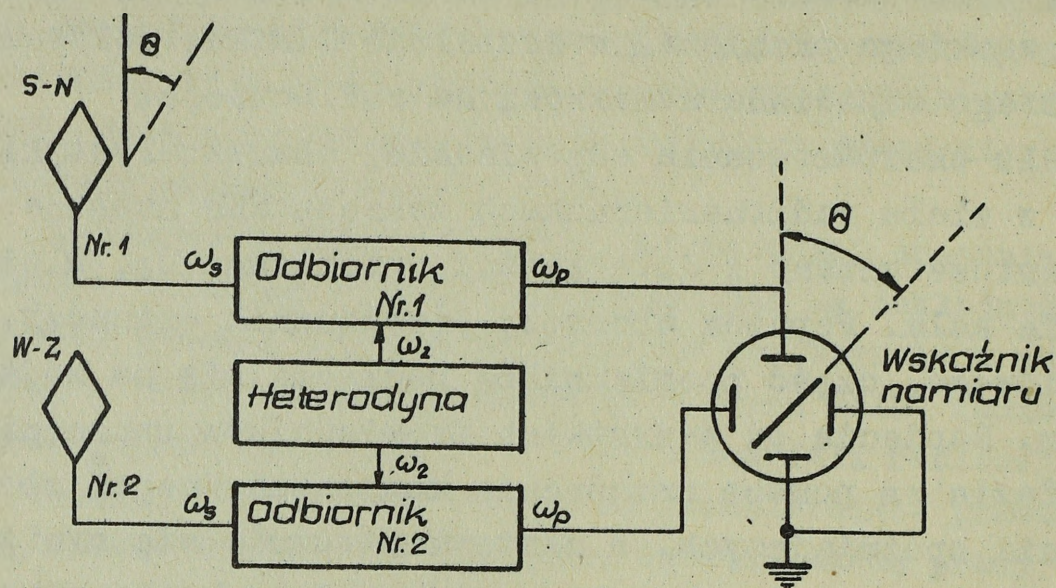
Błędy pomiaru tego typu radionamierników nie przekraczają $0,25^\circ$, a czas namiaru nie przewyższa 0,2 sek.

3.3.3. Radionamierniki pracujące według zasady porównywania sygnałów

W praktyce radionawigacyjnej wykorzystywane są dwie wersje radionamierników pracujących z wykorzystaniem metody porównywania sygnałów. Różnica między nimi polega na tym, że w jednych dokonuje się bezpośredniego porównywania poziomu sygnałów odebranych przez dwie anteny kierunkowe, podczas gdy w drugiej wersji odebrane sygnały uprzednio poddawane są modulacji amplitudowej, a następnie w wyjściowym urządzeniu pomiarowym, dokonuje się porównania głębokości modulacji.

Na rys. 23 przedstawiony jest uproszczony schemat blokowy radionamiernika, w którym wykorzystuje się metodę porównywania poziomu sygnałów jednocześnie odebranych przez dwie anteny

kierunkowego promieniowania. Charakterystyki kierunkowe

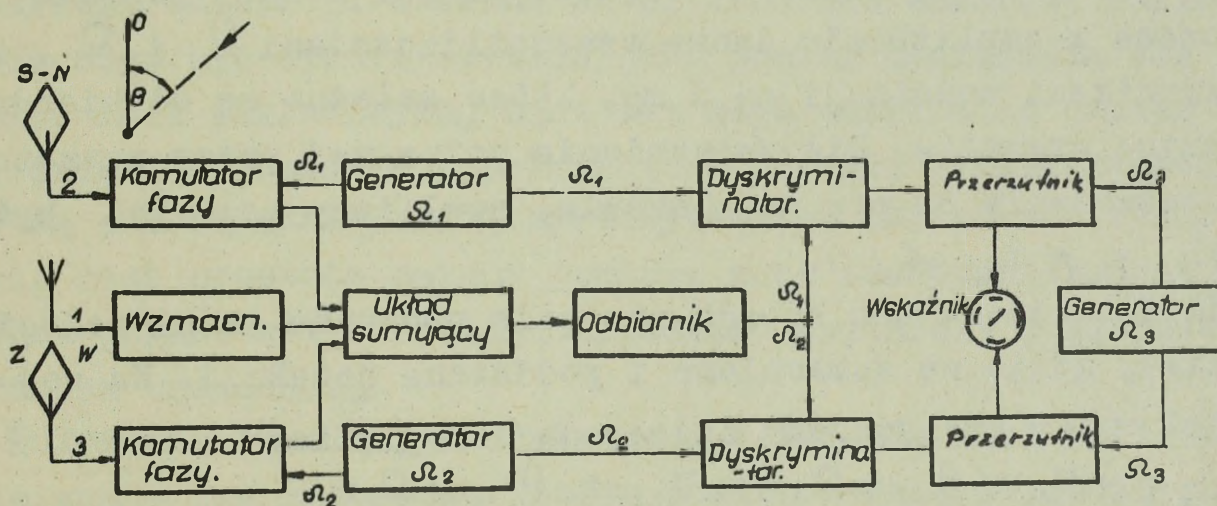


Rys. 23

anten Nr 1 i Nr 2 przesunięte są w płaszczyźnie poziomej względem siebie o 90° i wyrażają się funkcjami $\sin \theta = F_1 / \theta /$ i $\cos \theta = F_2 / \theta /$. Odebrane sygnały namierzanej radiostacji przez obie anteny przekazywane są na wejścia dwu odbiorników Nr 1 i Nr 2, gdzie podlegają wzmocnieniu i przemianie na sygnały pośredniej częstotliwości (ω_p) za pomocą wspólnej heterodyny. Przemiana częstotliwości pozwala na wykorzystanie właściwości odbioru superheterodynowego oraz na zachowanie stałej częstotliwości i faz na wyjściu obu odbiorników. Po kolejnym wzmocnieniu sygnały podawane są na dwie pary płytek odchylających lampy oscyloskopowej, na ekranie której otrzymuje się świecącą linię, kątowne położenie której odpowiada namiarowi na radiostację.

Jak widzimy z zasady pracy omawianego radionamiernika, odczyt namiaru nie jest jednoznaczny. W celu usunięcia dwuznaczności odczytu stosuje się dodatkową antenę bezkierunkową, napięcie z której wykorzystywane jest do ogniskowania lub też rozjaśniania lampy oscyloskopowej, a tym samym zaciemnienia połowy zobrazowania świecącej linii w zależności od polaryzacji odebranego sygnału.

Na rys. 24 przedstawiony jest schemat blokowy radio-
namiernika, w którym wykorzystuje się metodę porównywania
głębokości modulacji sygnałów odbieranych od namierzanych
radiostacji. W metodzie tej sygnały namierzanej radiostacji
odbierane



Rys. 24

są jednocześnie przez antenę bezkierunkową i dwie anteny
kierunkowe o charakterystykach ósemkowych, ustawionych
względem siebie pod kątem 90° . Fazy sygnałów, odebranych
przez anteny kierunkowe, uwarunkowane są napięciami z gene-
ratorów Ω_1 i Ω_2 . Napięcia obu anten kierunkowych, od-
powiednio zfazowane poprzez komutator fazy, podawane są do
układu sumującego. Do tegoż układu poprzez wzmacniacz po-
daje się również napięcie z anteny bezkierunkowej.

Siły elektromotoryczne, indukowane we wszystkich
trzech antenach, z uwzględnieniem fazowania anten kierun-
kowych, odpowiednio będą następujące:

$$e_1 = E_{1m} \cdot \cos \omega t$$

$$e_2 = E_{2m} \cdot \cos \Omega_1 t \cdot \cos \omega t \cdot \cos \theta$$

$$e_3 = E_{3m} \cdot \cos \Omega_2 t \cdot \cos \omega t \cdot \sin \theta$$

przy czym:

$$E_{2m} = E_{3m} = E_{pm} \quad , \quad \text{a } E_{1m} = E_{am}$$

Po zsumowaniu wszystkich napięć w układzie sumującym otrzy-
mamy napięcie wypadkowe, które podawane jest na wejście

odbiornika:

$$e = E_{am} (1 + a \cos \theta \cos \Omega t + a \sin \theta \cos \Omega_2 t) \cdot \cos \omega t$$

lub też w innej postaci:

$$e = E_{am} / 1 + m_1 \cos \Omega_1 t + m_2 \cos \Omega_2 t / \cdot \cos \omega t \quad /21/$$

gdzie: $m_1 = a \cdot \cos \theta$, $m_2 = a \sin \theta$, $a = \frac{E_{pm}}{E_{em}}$

Z wyrażenia /21/ widzimy, że w rezultacie przetwarzania sygnałów odebranych, napięcie częstotliwości nośnej zostało zmodulowane w amplitudzie dwoma częstotliwościami Ω i Ω_2 , ze współczynnikami modulacji m_1 i m_2 , które zależne są od kierunku odbieranych sygnałów. Dla zapewnienia normalnej pracy aparatury i niedopuszczenia do przemodulowania, spełniony powinien być warunek: $m_1 + m_2 < 1$.

Zmodulowane w ten sposób napięcia podawane są na wejście odbiornika, gdzie są wzmacniane i poddawane detekcji. Na wejściu odbiornika otrzymujemy następujące napięcie:

$$u = U_m \cos \theta \cos \Omega_1 t + U_m \sin \theta \cos \Omega_2 t$$

Napięcie to podaje się na dwa dyskryminatory, do których także dochodzą napięcia wzorcowe z generatorów Ω_1 i Ω_2 . Przy pokryciu się faz, napięcia wzorcowego i napięcia z odbiornika, z wyjścia dyskryminatora otrzymamy dwa napięcia:

$$U_I = U_m + 1/2 \cdot U_m \cos \theta$$

$$U_{II} = U_m - 1/2 \cdot U_m \cos \theta$$

Po zsumowaniu otrzymamy:

$$U_I - U_{II} = U_1 = U_m \cdot \cos \theta$$

Analogicznie na wyjściu drugiego dyskryminatora otrzymamy:

$$U_2 = U_m \sin \theta$$

Widzimy z powyższego, że napięcia U_1 i U_2 zależne są od kąta tzn. od kierunku odbieranych sygnałów przez obie anteny kierunkowe.

Jeżeli napięcia wyjściowe U_1 i U_2 podać bezpośrednio na płytki odchylające X i Y lampy obrazowej, to na jej ekranie zobrazowana zostanie świecąca linia, nachylona pod odpowiednim kątem θ . Pozwala to na odczytanie namiaru.

Dla polepszenia zobrazowania i dokładności odczytu napięcia U_1 i U_2 podawane są na przerzutniki, sterowane

specjalnym generatorem Ω_3 , a następnie na płytki odchylające lampy wskaźnika osyloskopowego.

3.4. Przeznaczenie i rodzaje radiolatarni

Radiolatarnią nazywamy nadawcze urządzenie radiotechniczne promieniujące fale radiowe o określonych z góry parametrach. Radiolatarnie tworzą w przestrzeni radionawigacyjne pole promieniowania, w którym amplituda drgań niegasnących, względnie współczynnik modulacji zależne są od kierunku odbioru. Radiolatarnie mogą być wykorzystywane jako punkty nawiazania dla radionamierników pokładowych, bądź też mogą umożliwiać namiar kierunku, dzięki kierunkowemu promieniowa^{niu} energii elektromagnetycznej. Dużą zaletą nawigacji z wykorzystaniem naziemnych radiolatarni, jest prostota metody pomiaru oraz nieskomplikowana aparatura pokładowa. W szeregu wypadków wystarczy pokładowa radiostacja łączności.

Położenie dowolnej radiolatarni w terenie musi być dokładnie znane nawigatorowi, bowiem radiolatarnie stanowią punkty nawiazania dla nawigacji obiektów w przestrzeni. Miejsce rozmieszczenia radiolatarni jest dokładnie oznaczone na mapach nawigacyjnych.

Zakres częstotliwości pracy radiolatarni dobierany jest ze względu na zasięg systemu radionawigacyjnego oraz z uwagi na przeznaczenie. Ze względu na długość wykorzystywanych fal radiowych, radiolatarnie dzielą się na: długofalowe, średniofalowe, krótkofalowe i UKF. Ze względu na zasięg mogą być różniane jako radiolatarnie dużych, średnich i małych odległości.

Podstawowym wymaganiem stawianym radiolatarniom dowolnego rodzaju jest ciągłość i niezawodność pracy, a to ze względów na bezpieczeństwo nawigacyjne obiektów, korzystających z radionawigacyjnego pola radiolatarni. Dlatego też każda radiolatarnia wyposażona jest w zapasowy nadajnik, który może być w każdej chwili włączony do pracy. Przełączanie zapasowego nadajnika może odbywać się przez obsługę w sposób ręczny lub też automatycznie, bez udziału człowieka. Każda radiolatarnia ma własny kod rozpoznawczy, który umożliwia identyfikowanie jej położenia geograficznego. Kodem rozpoznawczym są najczęściej dwie lub trzy litery pełnej nazwy radiolatarni, przekazywane sygnałami Morse'a.

Ze względu na przeznaczenie radiolatarnie mogą być podzielone na cztery następujące grupy:

- radiolatarnie oznaczające, zwane też radiomarkierami;
- radiolatarnie bezkierunkowe;
- radiolatarnie kierunkowe;
- radiolatarnie kursowe.

3.4.1. Radiolatarnie oznaczające

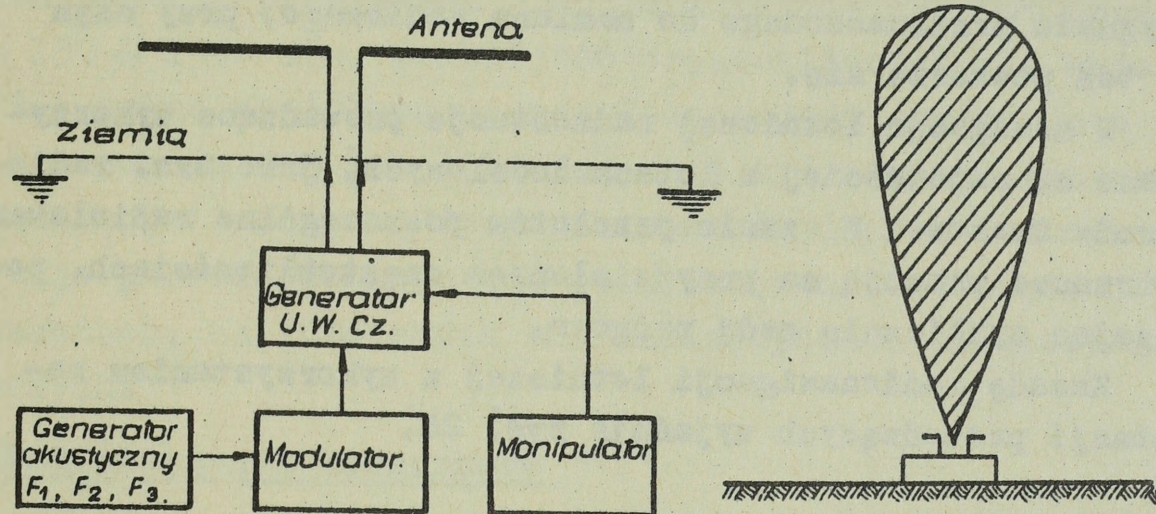
Radiolatarnią oznaczającą lub radiomarkierem nazywamy urządzenie radiotechniczne promieniujące fale radiowe, przeznaczone do oznaczania punktów naziemnych, znajomość których ważna jest dla celów radionawigacyjnych. Radiolatarnie tego typu tworzą pole promieniowania, zlokalizowane w ograniczonej przestrzeni, w wyniku czego odbiór ich sygnałów możliwy jest tylko w pobliżu rozmieszczenia radiomarkiera.

Odbiór sygnałów radiolatarni oznaczającej na pokładzie samolotu sygnalizuje o znajdowaniu się samolotu w pobliżu punktu ustawienia radiomarkiera, lub też sygnał jest odbierany w momencie przelotu samolotu nad radiolatarnią.

W praktyce radionawigacyjnej radiomarkiery oznaczają punkty zbiórek samolotów, punkty zmiany kursu marszruty, punkty wyjścia na lotnisko, kontrolne punkty radionawigacyjne zajścia do lądowania itp.

Na trasie lotu samolot może kolejno przechodzić nad kilkoma radiolatarniami oznaczającymi. Dlatego też radiomarkiery, usytuowane wzdłuż trasy, zestrojone są na jedną częstotliwość nośną stabilizowaną kwarcem. Dla oznaczania poszczególnych punktów trasy stosuje się system selekcji sygnałów radiomarkiera. Selekcji dokonuje się modulacją fali nośnej oraz znakiem jej manipulacji. Najczęściej stosowaną częstotliwością modulacji jest 400, 1300, 3000 Hz.

Typowy schemat blokowy radiomarkiera przedstawiony jest na rys. 25.



Rys. 25

Urządzenie składa się z generatora ultrawielkiej częstotliwości, pracującego na antenę kierunkową, skierowaną listkiem promieniowania do góry, modulatora, generatora akustycznego z manipulatorem oraz układów pomocniczych. Przy odbiorze sygnałów radiomarkiera na samolocie stosuje się zobrazowanie akustyczno-optyczne, tzn. dzwonek i lampka sygnalizacyjna, przy tym tych ostatnich może być kilka zależnie od ilości punktów oznaczających na trasie.

3.4.2. Radiolatarnie bezkierunkowe

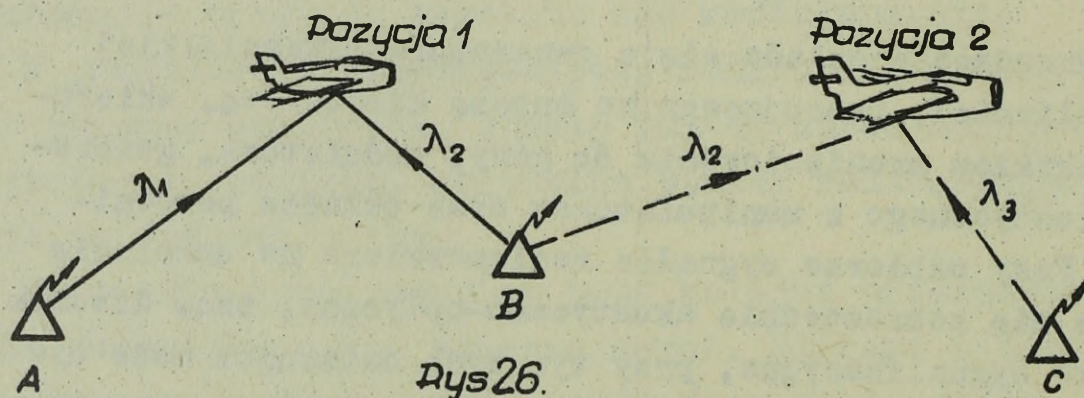
Często do grupy radiolatarni zalicza się grupę urządzeń radiotechnicznych wykorzystywanych łącznie z amplitudowymi radionamiernikami pokładowymi w kompleksie systemu radionawigacyjnego. Urządzenia te przedstawiają sobą specjalne radiostacje nadawcze o promieniowaniu dookólnym. Radiostacje tego typu, wykorzystywane w radionawigacji, noszą nazwę radiolatarni bezkierunkowych lub też radiostacji prowadzących, mimo że ten ostatni termin nie jest zbyt ścisły.

Bardziej ścisłym terminem tego typu urządzeń byłby termin radiostacji nawigacyjnych.

Każda radiostacja prowadząca promieniuje sygnały radiowe odpowiednie do radionamierzenia, zwane programem radiolatarni. Program ten składa się z kodu rozpoznawczego, powtarzanego dwa lub trzykrotnie oraz serii znaków radiotelegraficznych służących do nastrojenia radiokompasu, a także sygnału przeznaczanego do namiaru radiowego, przy czym cykl ten powtarza się.

W nawigacji lotniczej radiostacje prowadzące wykorzystywane są najczęściej w lotach docelowych, jako tzw. radiolatarnie trasowe. W czasie przelotów poszczególne radiolatarnie trasowe pracują na przydzielonych częstotliwościach, powtarzając cyklicznie swój program.

Zasadę radionawigacji lotniczej z wykorzystaniem radiostacji prowadzących wyjaśnia rys. 26.



Pierwsza pozycja samolotu określona jest przez namiar na dwie radiolatarnie A i B, z których jedna pracuje na fali λ_1 , a druga na fali λ_2 . Druga pozycja samolotu wyznaczona jest przez namiar na radiostacje B i C, z których C pracuje na fali λ_3 .

Moc radiostacji prowadzących zależna jest od wymaganego zasięgu. Orientacyjne zasięgi typowych radiolatarni bezkierunkowych i moce przy pracy nad lądem podane są w poniższej tabeli. Nad morzem zasięgi wzrastają ok. 30 % w ciągu dnia i 20 % w ciągu nocy. Dane te dotyczą

obiektów naziemnych i nawodnych. Dla obiektów powietrznych, oprócz zależności zasięgu od mocy radiostacji, zasięg różni się dla różnych wysokości lotu samolotów.

Moc w antenie W	10	50	100	500	1000	5000
Zasięg w dzień w km	130	250	330	500	600	600
Zasięg w nocy km	90	180	250	390	390	390

Radiostacje prowadzące pracują w paśmie częstotliwości zakresu 130 ÷ 1300 kHz. Stabilność częstotliwości nie mniejsza 10^{-4} . Fala nośna radiolatarni modulowana jest amplitudowo sygnałem akustycznym 400 lub 1020 Hz. Może być również wykorzystana modulacja foniczna do przekazywania innych informacji. Radiostacje prowadzące mogą być rozmieszczone wzdłuż tras lotu, na zakamaniach, na lotniskach oraz na wyspach i okrętach zakotwiczonych.

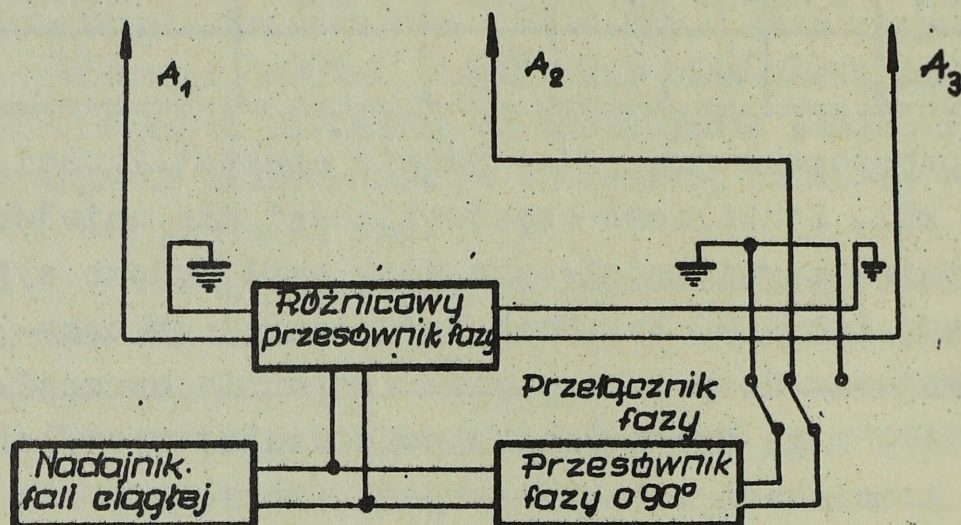
3.4.3. Radiolatarnie kierunkowe

Radiolatarnie kierunkowe pozwalają na pomiar dowolnego kąta w konkretnym obszarze nawigacyjnym, jednak w określonym sektorze kąta pełnego. Pracują w większości wypadków w zakresie fal długich i przeznaczone są do nawigacji morskiej i lotniczej na duże odległości rzędu setek i tysięcy kilometrów. Radiolatarnie tego typu mogą być wykorzystywane jako tzw. radiolatarnie kierunkowe, umożliwiające pomiar kąta z dowolnego kierunku, lub też jako tzw. radiolatarnie kursowe przeznaczone do wyznaczania stałych kursów na obszarach nawigacji lotniczej lub morskiej - docelowej.

Istnieją różne systemy długofalowych radiolatarni kierunkowych. Podstawą zasady pracy jest wykorzystanie strefy równych sygnałów, powstającej w rezultacie przestrzennego przesunięcia charakterystyki promieniowania anten kierunkowych. Różni się radiolatarnie kierunkowe wykorzystujące jednolistkowe lub wielolistkowe charakterystyki promieniowania anten.

Ponieważ radiolatarnie długofalowe, jako kierunkowe i kursowe, są dostosowane do współpracy ze zwykłymi odbiornikami radiowymi, za pomocą których określa się pozycję okrętu lub samolotu, dlatego też charakterystyki promieniowania tych radiolatarni powinny zmieniać się w określony sposób. Radiolatarnia taka składa się z trzech masztów antenowych, ustawionych

na jednej linii w odległości 1000 do 1500 metrów jeden od drugiego. Uproszczony układ blokowy takiej radiolatarni przedstawiony jest na rys. 27. Skrajne anteny A_1 i A_3

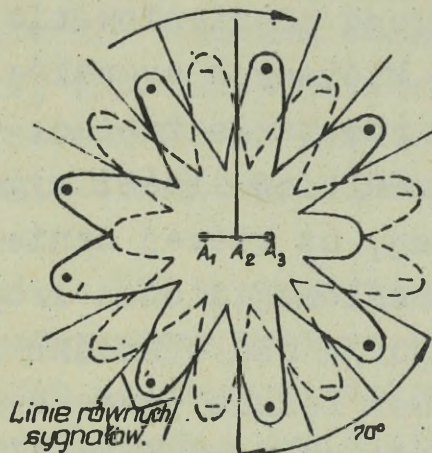


Rys. 27

zasilane są napięciem fali ciągłej z nadajnika poprzez różnicowy przesuwnik fazy, przestrajany w sposób płynny. Antena środkowa A_2 zasilana jest z tego samego źródła poprzez przesuwnik fazy o stałym przesunięciu o 90° . Oprócz tego faza prądu w antenie środkowej A_2 , jest przełączana skokowo o 180° .

Wypadkowa charakterystyka promieniowania wszystkich trzech anten radiolatarni przedstawiona jest na rys. 28 linią ciągłą. Jest to charakterystyka wielolistkowa, w której liczba i szerokość listków zależy od stosunku odległości skrajnych anten A_1 i A_3 do długości fali roboczej. Charakterystyka przedstawiona na rysunku odnosi się do przypadku, gdy anteny skrajne odległe są od siebie o 4 długości fali roboczej.

Kierunek obrotu charakterystyki



Rys. 28.

Wypadkowa wielolistkowa charakterystyka radiolatarni systemu Consol.

Gdy faza prądu w antenie środkowej zostanie zmieniona o 180° , wówczas powstaje charakterystyka przestrzenna promieniowania anten, jak pokazano na rys. 28 linią przerywaną. Faza prądu zmieniana jest co $1/8$ i $3/8$ sekundy. W rezultacie navigator obiektu nawigowanego, odbiera albo krótkie sygnały o czasie trwania $1/8$ sek, albo dłuższe sygnały o czasie trwania $3/8$ sek. Zależy to od tego czy samolot znajduje się w strefie objętej ciąglą czy przerywaną charakterystyką promieniowania w polu radionawigacyjnym. Jeżeli obiekt znajdzie się w strefie równych sygnałów /na linii równych sygnałów/, wówczas navigator odbiera sygnał ciągły.

Oprócz przełączania fazy anteny środkowej, jednocześnie płynnie zmienia się faza napięć w antenach skrajnych, co powoduje obrót całej charakterystyki przestrzennej promieniowania w kierunku zaznaczonej na rys. 28 strzałką. Po zmianie fazy o 180° , charakterystyki przestrzenne /ciągłe i przerywane na rys./ zmieniają się wzajemnie, co powoduje, że navigator, który odbiera dłuższe sygnały, odbiera teraz krótkie i na odwrót. Cykl roboczy radiolatarni wynosi 40 sek, w ciągu którego realizowany jest program radiolatarni.

Na podstawie bezkierunkowego promieniowania anteny środkowej A_1 , nawigator rozpoznaje radiolatarnię i w przybliżeniu określa sektor nawigacyjny za pomocą radiokompasu pokładowego. Podczas kierunkowego promieniowania, nawigator podlicza liczbę dłuższych lub krótszych sygnałów, przy czym pozycję samolotu wyznacza na podstawie tablic, w których podane są wartości namiarów dla określonej ilości sygnałów. Pozycję wyznacza z mapy nawigacyjnej, na której naniesione są linie kierunkowe odpowiadające określonej ilości kropek lub kresek.

Jeżeli samolot znajduje się w środku listka promieniowania, liczba kropek i kresek będzie jednakowa, jeżeli zaś samolot znajdzie się na linii równych sygnałów, nawigator będzie słyszał ton ciągły.

Zasięg tego typu radiolatarni wynosi ponad 1700 km w ciągu dnia i około 2700 km w ciągu nocy. Dokładność określania kierunku wynosi $0,1 \div 0,3^\circ$ w dzień i nieco maleje w nocy. Podstawową wadą radiolatarni jest stosunkowo długi czas określania pozycji samolotu. Dlatego też opracowano nowsze systemy dalekosiężne o zasięgu 3700 km nad lądem i 4800 km nad morzem. Dokładność określania kierunku wynosi $0,5 \div 1^\circ$, natomiast dokładność pomiaru odległości rzędu 1%.

Systemy radiolatarni kierunkowych, pracujących na falach długich, mogą być zautomatyzowane, a dane pomiarów wprowadzane do układów przelicznikowych, gdzie są opracowywane i w postaci napięć wykonawczych mogą sterować autopilotem.

3.4.4. Ultrakrótkofalowe radiolatarnie kursowe

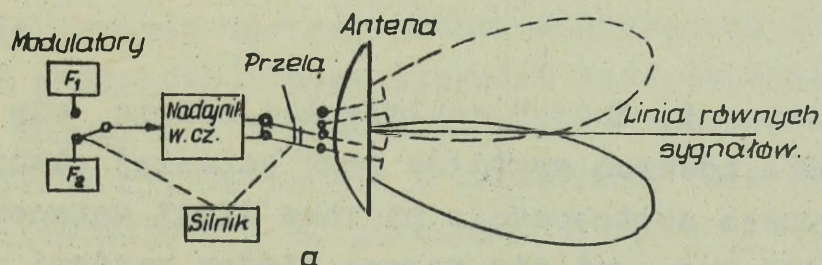
Dla potrzeb nawigacji na małe i średnie odległości wykorzystuje się radiolatarnie kursowe, pracujące w zakresie fal UKF, tzn. na falach krótszych od 10 m. Zasięg działania tych radiolatarni określa się bezpośrednią widzialnością, co wynika z prostoliniowości rozchodzenia się fal radiowych tego zakresu.

Radiolatarnie UKF, wykorzystywane w nawigacji morskiej, posiadają zasięg kilkudziesięciu kilometrów, natomiast w nawigacji lotniczej zasięg zależny jest od wysokości lotu samolotu i może osiągać nawet kilkaset kilometrów. Na przykład: dla wysokości lotu $10 \div 15$ km, zasięg radiolatarni UKF może dochodzić do 400 - 500 kilometrów.

Radiolatarnie UKF pracują na zasadzie wykorzystania strefy równych sygnałów, podobnie jak radiolatarnie długofalowe. Jednakże w radiolatarniach tego typu linia równych sygnałów pokrywa się dokładnie z kursem samolotu lub okrętu.

Istnieje szereg typów radiolatarni UKF. Do najczęściej spotykanych należą radiolatarnie kursowe z podwójną modulacją oraz radiolatarnie dużej dokładności, wykorzystywane w systemach lądowania.

W radiolatarniach UKF z podwójną modulacją, których schemat blokowy przedstawiony jest na rys. 29, nadajnik fali nośnej jest kolejno modulowany napięciami małej częstotliwości F_1 i F_2 , otrzymywanych z dwóch niezależnych modulatorów. Modulatory te przełączane są razem z antenami za pomocą silnika. W rezultacie anteny promieniują sygnały o różnej modulacji, które tworzą w przestrzeni dwie charakterystyki listkowe wzajemnie nakrywające się, linia przecięcia się których tworzy strefę równych sygnałów.



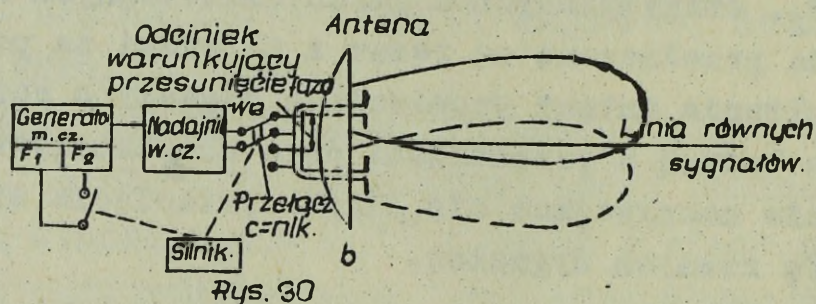
Rys. 29

Schemat działania radiolatarni ultrakrótkofalowych kursowych): a - z podwójną modulacją;

Jeżeli samolot porusza się wzdłuż strefy równych sygnałów, to wskutek odbioru dwóch sygnałów, zmodulowanych różnymi częstotliwościami i posiadającymi równą amplitudę, wskaźnik urządzenia pokładowego nie wychyli się. Jeżeli samolot zboczy ze strefy równosygnałowej, to ulegnie zmianie natężenie odbieranych sygnałów, w rezultacie czego na wskaźnik pokładowy przyjdzie sygnał wypadkowy, który spowoduje

wychylenie strzałki w tę stronę, która odpowiada kierunkowi odchylenia samolotu od strefy równych sygnałów. Radiolatar-
nie z podwójną modulacją zapewniają prowadzenie samolotów
po trasie z dokładnością 1° .

Większą dokładność nawigacji, rzędu kilku minut kąto-
wych, zapewniają radiolatar-
nie kursowe dużej dokładności,
których zasadę działania wyjaśnia rys. 30.



Schemat działania radiolatar-
ni ultrakrótkofalowych (kursowych):
b - o dużej dokładności.

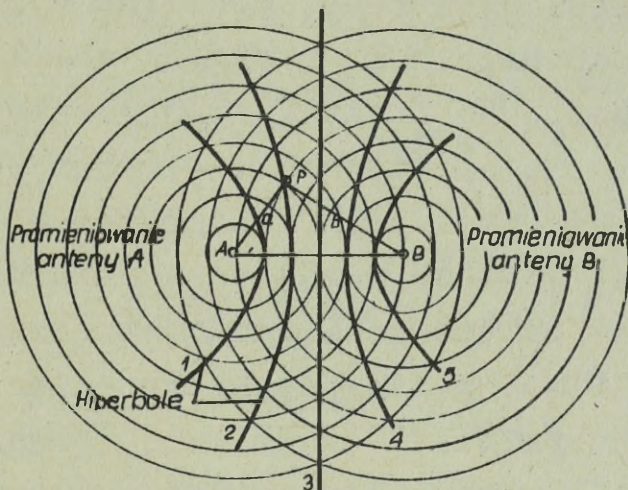
Radiolatar-
nie dużej dokładności różnią się głównie
tym, że strefa równych sygnałów jest bardziej stabilna, co
uzyskano poprzez zastosowanie odcinka linii antenowej, który
zapewnia stałe przesunięcie fazowe między prądami zasilają-
cymi obie anteny. Drgania wielkiej częstotliwości nadajnika
również modulowane są napięciami o różnych częstotliwościach
 F_1 i F_2 . Nadajnik kolejno podłączany jest do obu anten za
pośrednictwem silnika, który jednocześnie przełącza napię-
cie modulujące. Określenie kursu samolotu odbywa się podob-
nie jak w przypadku radiolatar-
ni z podwójną modulacją.

3.5. Hiperboliczne systemy radionawigacyjne

3.5.1. Zasada systemu hiperbolicznego

Wyznaczenie pozycji samolotu lub okrętu za pomocą ra-
dionawigacyjnego systemu hiperbolicznego opiera się na wy-
korzystaniu zasady pomiaru różnicy odległości danego obiektu
od dwóch par obranych punktów na Ziemi, których współrzędne

są znane. Ogólna koncepcja układu hiperbolicznego jest przedstawiona schematycznie na rys. 31.



Rys. 31
Schemat ogólnej koncepcji układu hiperbolicznego.

W punktach A i B ustawione są radiostacje, których anteny promieniają energię elektromagnetyczną dookoła. Rolę tych radiostacji mogą spełniać radiolatarnie bezkierunkowe. Anteny A i B promieniają fale radiowe w sposób zsynchronizowany. Do punktu P przychodzą fale promieniowane przez radiostację A i B, pokonując drogi a i b. Ponieważ fala radiowa rozchodzi się ze stałą prędkością równą w przybliżeniu prędkości światła, to fala elektromagnetyczna promieniowana przez stację A osiągnie wcześniej punkt P niżeli fala wypromieniowana synchronicznie przez radiostację B.

Różnica czasu przelotu fali z obu radiostacji do punktu P jest więc proporcjonalna do różnicy przebytych dróg:

$$\Delta t = \frac{b - a}{c}$$

gdzie: c - prędkość rozchodzenia się fal radiowych.

Jak widzimy z rys. 31, punkt P znajduje się na linii zwanej hiperbolą, która jest właśnie miejscem geometrycznym

równych różnic odległości danego punktu P od radiostacji A i B. Traktując radiostacje A i B jako ogniska hiperbol, można wykreślić całą rodzinę hiperbol, stanowiących tzw. siatkę hiperboliczną linii pozycyjnych.

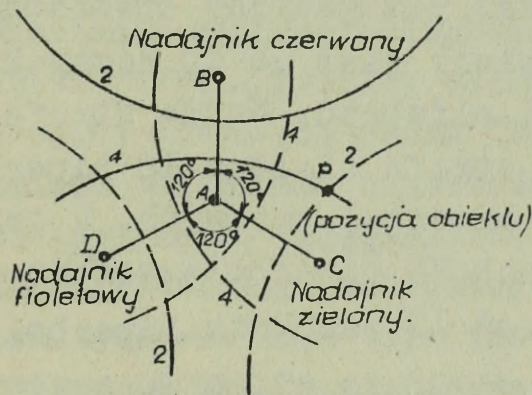
Dwa punkty nawiazania A i B nie są wystarczające do określenia pozycji samolotu lub okrętu, ponieważ wyznaczają jedynie jedną z dwóch możliwych hiperbol pozycyjnych. Taką samą bowiem różnicę odległości, jak punkt P, mają nie tylko wszystkie punkty znajdujące się na hiperboli 2, lecz również wszystkie punkty leżące na hiperboli 4. Dlatego też do określenia pozycji konieczne jest jeszcze określenie różnicy odległości względem dwóch innych punktów nawiazania, tworzących drugą siatkę hiperboliczną linii pozycyjnych. Przecięcie się dwóch hiperboli pozycyjnych wyznacza poszukiwaną pozycję.

Stosowane są dwie metody wyznaczania odległości do punktów nawiazania A i B, w których znajdują się radiostacje. Pierwsza metoda wykorzystuje do pomiaru różnicy odległości różnicę faz fal radiowych przychodzących od obu radiostacji A i B do danego punktu P. Metoda ta stanowi podstawę fazowego systemu radionawigacji hiperbolicznej. W drugiej metodzie pomiar różnicy odległości dokonywany jest metodą impulsową. Dokonuje się w tym wypadku pomiaru różnicy czasu przychodzenia impulsów do punktu P z obu radiostacji A i B. Metoda ta stała się podstawą impulsowego systemu radionawigacji hiperbolicznej.

3.5.2. Fazowy system radionawigacji hiperbolicznej

Pomiar różnicy faz dwóch fal radiowych promieniowanych przez dwa nadajniki, stanowi podstawę fazowego systemu radionawigacyjnego typu DECCA, stosowanego na Zachodzie. System składa się z 4 nadajników /radiostacji/, z których jeden jest główny, a trzy pozostałe podległe /patrz rys. 32/. Nadajniki podległe ustawiane są w odległości od 110 do 220 km od nadajnika głównego. Ustawia się je promieniście, mniej więcej co 120° jeden od drugiego. Grupa czterech radiostacji tworzy węzeł radionawigacyjny obejmujący swoim zasięgiem obszar o promieniu około 550 km od nadajnika głównego. W nocy zasięg węzła maleje o około 100 km, ze względu na załamania w odbiorze radiowym, powodowane przez jednoczesny odbiór fal przyziemnych i przestrzennych.

Węzeł radionawigacyjny tworzy trzy rodziny hiperbol, z których na rys. 32, dla uproszczenia, narysowano jedynie po dwie hiperbole 2 i 4, z każdej rodziny.



Rys. 32
Schemat węzła nawigacyjnego systemu Decca.

Każdej parze nadajników /A i B, A i C oraz A i D/ odpowiada jedna rodzina hiperbol. Rodziny tych hiperbol, w celu lepszego odróżnienia, rysowane są na mapie nawigacyjnej trzema różnymi kolorami. Hiperbole pary nadajników A i B oznacza się kolorem czerwonym, a sam nadajnik B nazywa się czerwony. Hiperbole pary nadajników A i C oznaczone są kolorem zielonym, zaś sam nadajnik C nazywa się zielony. Podobnie hiperbole pary nadajników A i D oznacza się kolorem fioletowym, a nadajnik D zwię się nadajnikiem fioletowym.

Dla poszczególnych nadajników systemu przydzielone są następujące zakresy częstotliwości:

dla nadajnika głównego A częstotliwość w zakresie 84 + 86 kHz;

dla nadajnika czerwonego B częstotliwość w zakresie 112 + 115 kHz;

dla nadajnika zielonego C częstotliwość w zakresie 126 + 129 kHz;

dla nadajnika fioletowego D częstotliwość w zakresie 70 + 72 kHz.

Powyższe zakresy podzielone są na 9 kanałów, których częstotliwości różnią się wzajemnie o $150 \div 300$ Hz.

Poszczególne węzły nawigacyjne systemu DECCA posiadają numerację cyfrową, w celu ich wzajemnego różniczenia. Istnieje około 20 węzłów radionawigacyjnych zainstalowanych głównie w Europie Zachodniej i Kanadzie.

Każdy obszar nawigacyjny utworzony przez dany węzeł nawigacyjny podzielony jest na 10 równych stref, oznaczonych kolejnymi literami alfabetu. Każda strefa czerwona zawiera 24 hiperbole zerowe, strefa zielona 18 hiperbol zerowych, zaś strefa fioletowa 30 hiperbol zerowych. W celu wyeliminowania pomyłek przy odczytach, 24 hiperbole ^{zerowe} czerwone otrzymują numerację od zera do 23, zaś 18 zerowych hiperbol zielonych posiada numerację kolejną od 30 do 47, a 30 zerowych hiperbol fioletowych otrzymuje numerację od 50 do 79.

Całość pracy danego węzła nawigacyjnego kierowana jest przez nadajnik główny o mocy około 2 kW, zasilany z generatora kwarcowego o dużej stabilności. Częstotliwości drgań nadajników podległych są synchronizowane przez drgania nadajnika głównego, które są odbierane przez każdy nadajnik podległy.

Aparatura pokładowa radionawigacyjnego systemu DECCA instalowana jest na okrętach i samolotach w postaci specjalnych odbiorników. Każdy odbiornik posiada 4 kanały, umożliwiające odbiór sygnałów poszczególnych nadajników danego węzła nawigacyjnego. Wszystkie cztery kanały odbiorcze podłączone są do wspólnej anteny prętowej. W każdym kanale odbiornika znajduje się wzmacniacz z wąskopasmowym filtrem kwarcowym, nastrojonym na częstotliwość roboczą danego nadajnika. W kanałach odbiornika, przeznaczonych do odbioru sygnałów z nadajników podległych, znajdują się powielacze o odpowiednim współczynniku powielania. Dzięki temu na wyjściu powielaczy uzyskuje się częstotliwości porównawcze charakterystyczne dla każdej z trzech rodzin hiperbol. Częstotliwości porównawcze doprowadzone są do dyskryminatorów fazy poszczególnych kanałów, w których odbywa się pomiar różnicy faz napięć wielkiej częstotliwości, promieniowanych przez nadajnik główny i nadajniki podległe. Poszczególne napięcia z dyskryminatorów przekazywane są do odpowiednich dekometrów / czerwonego, zielonego i fioletowego/, które wskazują hiperbolę określonej strefy danej

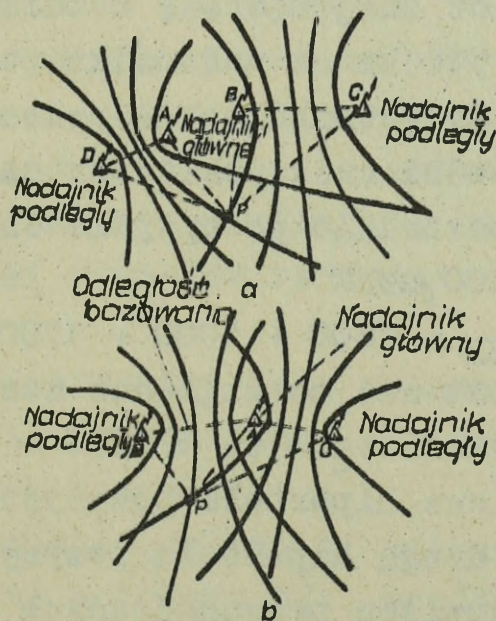
rodziny /czerwonych, zielonych lub fioletowych/. Punkt przecięcia tych hiperbol na mapie nawigacyjnej wskazuje pozycje obiektu.

3.5.3. Impulsowy system radionawigacji hiperbolicznej

Zasada pracy impulsowego systemu radionawigacji hiperbolicznej polega na określeniu różnicy odległości danego obiektu od dwóch punktów stałych. Różnicę odległości określa się przez pomiar różnicy czasu przyścia impulsów z dwóch nadajników. Stałym różnicom odległości odpowiadają hiperbole wykreślone na specjalnej mapie nawigacyjnej, podobnie jak w przypadku fazowego systemu hiperbolicznego.

Najbardziej znanym systemem tego typu jest impulsowy system radionawigacyjny typu LORAN, przeznaczony do radionawigacji na duże odległości. Zasięg systemu LORAN na fali przyziemnej w dzień wynosi 1300 ± 1700 km, zaś w nocy na fali przestrzennej zasięg dochodzi do 2600 km.

Podstawę systemu LORAN stanowią dwie pary nadajników, tworzących tzw. łańcuch nadajników radionawigacyjnych. Jeden nadajnik danej pary /patrz rys. 33/, jest nadajnikiem głównym /kierującym/, drugi nadajnikiem podległym. Każdy nadajnik promieniuje impulsy o czasie trwania 40 μ sek na częstotliwości w zakresie $1,7 \div 2$ MHz. Częstotliwość powtarzania



Rys 33

Łańcuch nadajników radionawigacyjnych systemu Loran:
a - z dwoma nadajnikami głównymi
A/B : b - z jednym wspólnym nadajnikiem głównym A.

impulsów mieści się w granicach 25 - 33,5 Hz, przy czym jest ona różna dla każdego łańcucha i dla każdej pary nadajników.

Poszczególne pary nadajników danego łańcucha radionawigacyjnego promieniują impulsy kolejno. Dzięki temu można zastosować jeden nadajnik główny, który kolejno współpracuje z dwoma nadajnikami podległymi danego łańcucha. Dlatego też można zmniejszyć liczbę nadajników łańcucha radionawigacyjnego do trzech, co przedstawione jest na rys. 33 b.

Odległość bazowa między nadajnikiem głównym i nadajnikami podległymi jest rzędu kilkaset kilometrów i jest większa niż w przypadku fazowego systemu radionawigacyjnego.

System radionawigacji impulsowej pracuje w sposób następujący. Nadajnik główny A promieniuje w momencie t_0 impuls o czasie trwania 40 μ sek. Impuls ten jest jednocześnie odbierany przez odbiornik na pokładzie samolotu oraz przez nadajniki podległe B i C.

Jeżeli odległość między daną parą nadajników A i B wynosi na przykład 480 km, to impuls wysłany przez nadajnik główny A dojdzie do nadajnika podległego B po upływie czasu $t_{AB} = 1600 \mu$ sek. Impuls ten uruchamia nadajnik podległy B, który promieniuje nowy impuls ze stałym opóźnieniem czasowym równym np. $\Delta t = 1000 \mu$ sek.

Załóżmy, że samolot znajduje się w odległości 660 km od nadajnika głównego A i 510 km od nadajnika podległego B. W takim przypadku impulsy promieniowane przez oba nadajniki zostaną odebrane przez odbiornik pokładowy samolotu, znajdujący się w punkcie P, odpowiednio po upływie czasów:

1. $t_1 = t_{AP} = 2200 \mu$ sek
2. $t_2 = t_{AB} + t_{BP} = 1600 + 1000 + 1700 = 4300 \mu$ sek.

Istotną rzeczą jest nie bezwzględna wartość powyższych czasów, lecz różnica czasów $t_2 - t_1 = 4300 - 2200 = 2100 \mu$ sek, której odpowiada określona hiperbola pozycyjna. Przecięcie tej hiperboli pozycyjnej z drugą hiperbolą pozycyjną, określoną przez różnicę czasów impulsów przychodzących od drugiej pary nadajników A i C, wyznacza punkt P, określający aktualną pozycję samolotu /patrz rys. 33 b/.

Na mapach nawigacyjnych systemu LORAN hiperbole pozycyjne wykreślone są w odległości odpowiadającej różnicy czasu

przejścia impulsów od obu nadajników danej pary, wynoszącej 20 μ sek, co odpowiada odległości 6 km.

Różnice czasu odbioru impulsów przychodzących od obu nadajników danej pary są rejestrowane za pomocą wskaźnika optycznego, zbudowanego na lampie oscyloskopowej z dwoma liniami podstawy czasu. Na ekranie lampy oscyloskopowej strumień elektronów kreśli dwie linie świetlne, na których specjalny układ synchronizujący wytwarza dwa znaczniki umożliwiające dostrojenie odbieranych impulsów do właściwej skali czasu.

Po dokonaniu pomiaru różnicy odległości dla obu par nadajników, wyznacza się hiperbole pozycyjne dwóch różnych rodzin. Na przecięciu tych hiperbol pozycyjnych znajduje się aktualną pozycję samolotu. Czas wykonania namiaru pozycji wynosi około 1 minuty. W udoskonalonych systemach typu LORAN, przy zastosowaniu specjalnych układów, czas ten skrócono do kilku sekund.

Impulsowy system radionawigacyjny LORAN obsługuje żeglugę morską i powietrzną na kontynencie amerykańskim oraz wodach Atlantyku i Pacyfiku. Ogółem u wybrzeży oceanów pracuje przeszło 50 nadajników systemu LORAN.

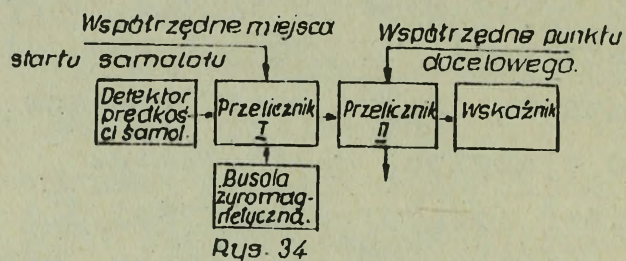
3.6. Pokładowe autonomiczne urządzenie radionawigacyjne

W związku z szybkim rozwojem transportu lotniczego i lotami samolotów nad terenami, gdzie występują silne zakłócenia dalekiego odbioru sygnałów radiolatarni lub hiperbolicznych systemów radionawigacyjnych, powstała potrzeba opracowania autonomicznych urządzeń radionawigacyjnych. Aparatura takiego urządzenia radionawigacyjnego jest w całości umieszczona na pokładzie samolotu. Informacje nawigacyjne uzyskuje się wskutek odpowiedniej obróbki sygnałów radiowych odbitych od powierzchni Ziemi.

Na rys. 34 przedstawiony jest schemat blokowy typowego układu radionawigacji autonomicznej. W zestaw aparatury wchodzi następujące podstawowe zespoły:

- detektor prędkości, w którym wytwarzane są informacje o prędkości podróźnej samolotu, tj. prędkości względem Ziemi oraz o prędkości znoszenia. Dane te przekazywane są do przelicznika I;

- przelicznik I, który określa współrzędne bieżące dodając do współrzędnych miejsca startu samolotu, iloczyn chwilowej wartości prędkości podróźnej i przyrostu czasu.



Rys. 34
Schemat blokowy systemu radionawigacji autonomicznej.

- busola żyromagnetyczna, która wyznacza aktualny kurs samolotu. Dane dotyczące kursu podawane są na wejście przelicznika II;

- przelicznik II porównuje bieżące współrzędne, otrzymane z przelicznika I, ze współrzędnymi punktu docelowego i wyznacza wymagany kurs oraz odległość do punktu docelowego;

- wskaźniki, na których odczytuje się uzyskane dane pomiarowe dotyczące kursu oraz odległości do punktu docelowego. Dane te mogą być także kierowane do autopilota bezpośrednio z przelicznika II.

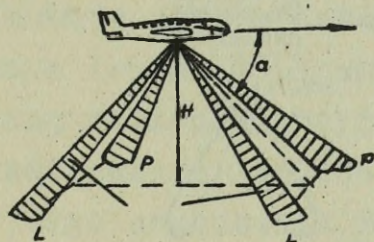
W autonomicznym urządzeniu radionawigacyjnym prędkość lotu jest zatem podstawowym parametrem i mierzona jest na podstawie wykorzystania zjawiska Dopplera. Dlatego też urządzenia radionawigacji autonomicznej, bazujące na wykorzystaniu tego zjawiska, nazywane są również urządzeniami radionawigacji dopplerowskiej.

Zasadę pomiaru prędkości można wyjaśnić w oparciu o rysunek 35. Sygnały wielkiej częstotliwości wytwarzane są w nadajniku umieszczonym na pokładzie samolotu i promieniowane przez antenę A w postaci wąskiej wiązki, nachylonej pod kątem α względem kierunku lotu. Po osiągnięciu powierzchni Ziemi w punkcie P, część energii elektromagnetycznej zostaje odbita i odebrana przez odbiornik pokładowy. Ponieważ samolot leci z prędkością podrózną V , dlatego też częstotliwość odebranego sygnału będzie się różniła, wskutek

wystąpienia zjawiska Dopplera, od częstotliwości sygnału wy-
promieniowanego o wartość:

$$F_D = \frac{2Vf}{c} \cos \alpha = \frac{2V}{\lambda} \cos \alpha$$

gdzie: c - prędkość rozchodzenia się fali radiowej
 f - częstotliwość wypromieniowana.

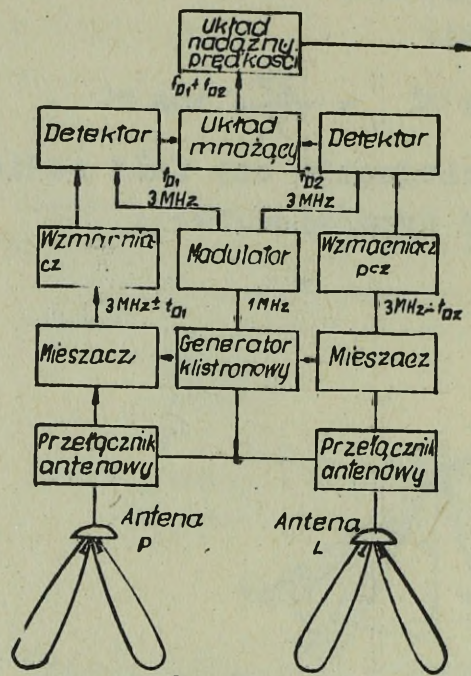


Rys. 35
Zasada radionawigacji
dopplerowskiej:
b- z czterema wiązkami fal.

Częstotliwość F_D zwana jest częstotliwością dopplerowską. Wartość tej częstotliwości jest wprost proporcjonalna do prędkości lotu samolotu. Mierząc częstotliwość dopplerowską w odbiorniku pokładowym, można określić prędkość podróży samolotu. Można również określić prędkość znoszenia samolotu, ale w tym celu nadajnik pokładowy powinien promieniować dwie wiązki fal, wzajemnie przesunięte o pewien kąt, lub też musi być zastosowana ruchoma wiązka promieniowania energii.

W nowszych urządzeniach radionawigacji dopplerowskiej stosuje się przeważnie cztery oddzielne wiązki promieniowania skierowane parami do przodu i tyłu pod określonymi kątami /rys. 35 b/. Urządzenia tego typu pracują na fali ciągłej modulowanej częstotliwościowo lub impulsowo.

Na rys. 36 przedstawiony jest uproszczony schemat funkcjonalny urządzenia dopplerowskiego z modulacją częstotliwości fali nośnej.



Rys. 36

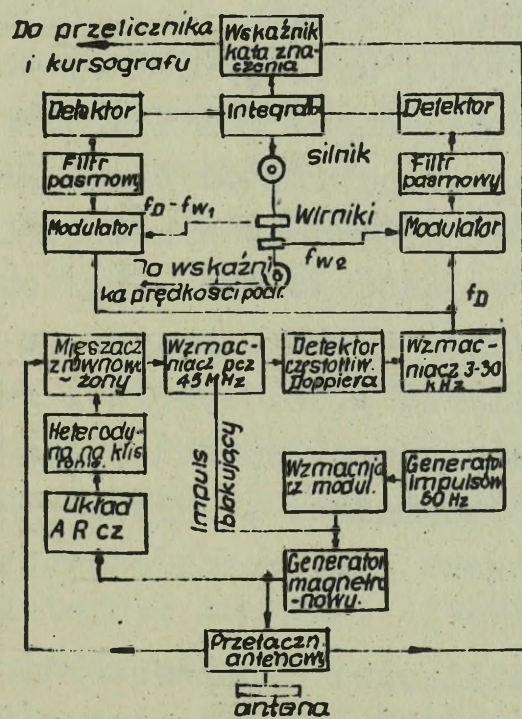
Schemat blokowy urządzenia radionawigacji dopplerowskiej z modulacją częstotliwości fali nośnej.

Generator klistronowy wytwarza napięcie wielkiej częstotliwości, które jest modulowane częstotliwościowo napięciem o częstotliwości 1 MHz, otrzymywanym z modulatora. Zmodulowane napięcie w.cz. jest wypromieniowane przez dwie anteny P i L. Każda antena wytwarza dwie wiązki fal. Antena P promieniuje dwie wiązki, z których jedna skierowana jest w prawo do przodu, a druga w prawo do tyłu. Analogicznie antena L promieniuje podobne dwie wiązki, skierowane w lewo. Ferrytowe przełączniki antenowe przełączają kolejno anteny do generatora klistronowego oraz do mieszaczy własnych kanałów odbiorczych. Sygnały wypromieniowane przez obie anteny wracają z powrotem po odbiciu od Ziemi do odbiornika. W każdym kanale odbiorczym znajduje się mieszacz, wzmacniacz i detektor. Na wyjściu mieszacza powstają sygnały częstotliwości pośredniej, odpowiednio równe $3 \text{ MHz} \pm F_{D1}$ oraz $3 \text{ MHz} \pm F_{D2}$. Po wzmocnieniu, napięcia tych częstotliwości doprowadzane są do detektorów, w których w wyniku doprowadzenia z modulatora częstotliwości 3 MHz, zostają wydzielone częstotliwości dopplerowskie F_{D1} i F_{D2} . Obie te częstotliwości doprowadzane są z kolei do układu mnożącego, w którym uzyskuje się sumę częstotliwości

dopplerowskich F_{D1} i F_{D2} . Napięcie sumaryczne częstotliwości dopplerowskiej działa na układ nadążny prędkości, w którym powstają sygnały proporcjonalne do zmierzonej prędkości. Sygnały te są następnie doprowadzane do mechanizmów wykonawczych.

Pomiar prędkości w układzie nadążnym sprowadza się do automatycznego porównania uzyskanej częstotliwości dopplerowskiej z częstotliwością odniesienia specjalnego generatora, wytwarzającego częstotliwość porównawczą. Układ nadążny wykonujący tę funkcję jest w istocie przelicznikiem analogowym elektronicznym lub mechanicznym.

Inną odmianą radionawigacyjnego urządzenia dopplerowskiego jest urządzenie z impulsową modulacją fali nośnej. Schemat blokowy tego urządzenia przedstawiony jest na rys. 37.



Rys. 37

Schemat blokowy impulsowego urządzenia radionawigacji dopplerowskiej.

W układzie tym generator jest z reguły zbudowany na magnetronie, który wytwarza impulsy drgań wielkiej częstotliwości. Generator zasila dwie pary anten przełączanych okresowo za pomocą przełącznika falowodowego. Anteny wytwarzają wiązki fal, skierowane także samo jak w urządzeniu dopplerowskim z modulacją częstotliwości. Wejście odbiornika jest blokowane na czas generacji impulsu poprzez doprowadzenie z układu

wzmacniacza modulacyjnego impulsu blokującego do wzmacniacza pośredniej częstotliwości.

Charakterystyczną cechą tego układu jest jeden wspólny kanał odbiorczy dla sygnałów obu par promieniowanych wiązek. Układ automatycznej regulacji częstotliwości zapewnia odpowiednie dostrojenie heterodyny klistronowej, zgodnie ze zmianami częstotliwości generatora magnetronowego. Generator impulsów wytwarza ciąg impulsów o czasie trwania 4 μ sek i częstotliwości powtarzania 50 Hz, przemodulowanych częstotliwościowo napięciem zmiennym 50 Hz. Po wzmożeniu we wzmacniaczu modulacyjnym impulsy te o amplitudzie 800 V modułują generator magnetronowy. Moc drgań wytwarzanych w generatorze magnetronowym wynosi około 20 W w impulsie. Częstotliwość drgań wynosi około 8800 MHz. Promieniowanie par wiązek przełączane jest 30 razy na sekundę. Antena jest wykonana w postaci tzw. liniowej kraty fazowej. Wszystkie cztery wiązki fal są promieniowane ^{przez} jedną antenę, której kierunkowość promieniowania zależy od stosunków faz napięć w poszczególnych elementach anteny. Sygnał odbity od Ziemi jest odbierany przez antenę i poprzez falowodowy przełącznik antenowy doprowadzony do mieszacza zrównoważonego. Częstotliwość pośrednia kanału odbiorczego wynosi 45 MHz, przy czym szerokość pasma przepuszczenia wzmacniacza p.cz. wynosi 1 MHz. W układzie detektora częstotliwości dopplerowskiej znajduje się wzmacniacz z pasmem przepuszczenia w zakresie 3 - 30 kHz, wskutek czego nie przepuszcza składowych częstotliwości powtarzania.

Napięcia częstotliwości dopplerowskich po wyjściu ze wzmacniacza przychodzą do dwóch identycznych kanałów, w których znajduje się modulator, filtr pasmowy i detektor. Układ nadożny prędkości zbudowany jest na welodynie, czyli na generatorze elektrycznym z dwoma wirnikami o różnej liczbie zębów. Generator ten umieszczony jest na wspólnej osi z silnikiem i tachometrem. Gdy prędkość obrotowa generatora jest proporcjonalna do mierzonej prędkości, to częstotliwości wypadkowe $F_D - F_{w1}$ oraz $F_D - F_{w2}$ są jednakowe. W przypadku zaistnienia błędu, symetria częstotliwości wypadkowych zostanie zachwiana, co objawi się w powstaniu różnicy napięć stałych na wyjściu detektorów. Napięcia te spowodują z kolei zmianę

napięcia integratora zasilającego silnik napędzający oba wirniki. Stan taki będzie trwał do chwili ustalenia się właściwej liczby obrotów obu wirników. Tachometr umieszczony na wspólnym wale z wirnikami, wytwarza napięcie, będące analogiem prędkości podróżnej samolotu. Napięcie to podawane jest na wejście odpowiedniego wskaźnika.

Impulsowe radionawigacyjne urządzenie dopplerowskie zapewnia pomiar prędkości podróżnej samolotu w zakresie od 185 do 1850 km/godz., z dokładnością $\pm 6\%$, pomiar kąta znośności w zakresie $\pm 40^{\circ}$, z dokładnością $\pm 0,5^{\circ}$.

3.7. Radionawigacyjne systemy lądowania

Omawiane dotychczas środki radionawigacyjne umożliwiają loty samolotów w dowolnych warunkach atmosferycznych, jednakże nie spełniają warunków nawigacyjnych w najtrudniejszym etapie lotu, jakim jest podejście do lądowania oraz samo lądowanie. W szczególnie złych warunkach atmosferycznych, bez widoczności lotniska, lądowanie samolotu należy do najbardziej odpowiedzialnych i trudnych zadań nawigacyjnych.

Istnieje cały szereg różnorodnych systemów lądowania, z których najbardziej współczesnym okazał się system lądowania według przyrządów.

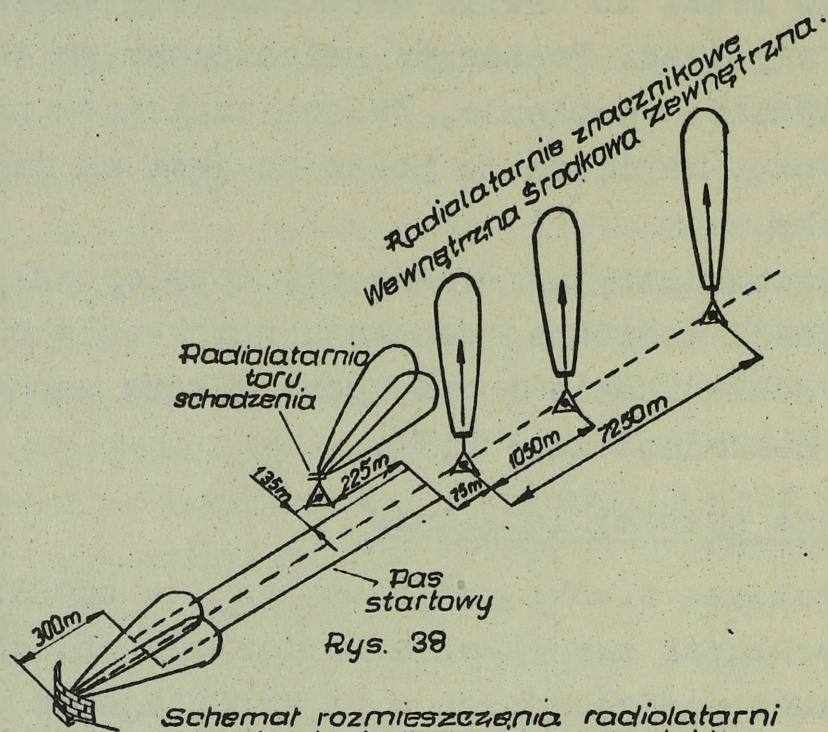
W skład systemu lądowania według przyrządów wchodzi wyposażenie lotniskowe oraz wyposażenie pokładowe. Podstawowym wyposażeniem lotniskowym stanowi pięć radiolatarni, do których należą:

- jedna radiolatarnia kursowa, wyznaczająca kurs samolotu podchodzącego do lądowania;

- jedna radiolatarnia ścieżki schodzenia, która wyznacza tor schodzenia samolotu lądującego;

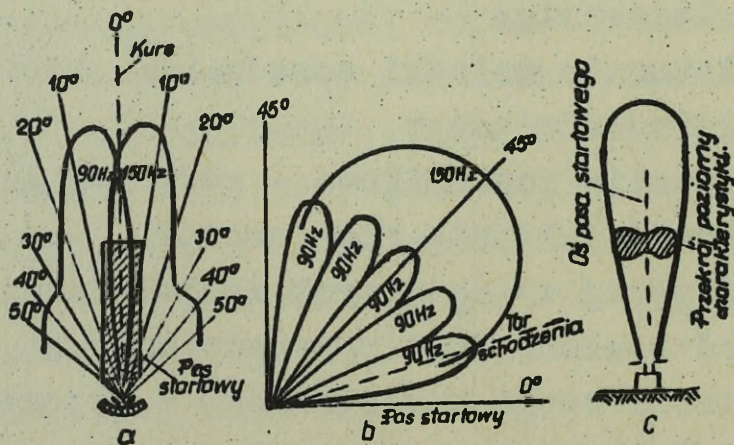
- trzy radiolatarnie znacznikowe - radiomarkiery, służące do kontroli prędkości zniżania się samolotu.

Rozmieszczenie wyżej wymienionych radiolatarni w rejonie pasa startowego przedstawione jest schematycznie na rys. 38. Oprócz tego dla kontroli ruchu powietrznego w rejonie lotniska przewidziane są radiolokacyjne stacje wykrywania z wyposażeniem w środki łączności i dowodzenia.



Rys. 38
Schemat rozmieszczenia radiolatarni w systemie lądowania samolotów według przyrządów.

Zasięg radiolatarni kursowej wynosi około 60 km dla samolotu lecącego na wysokości 600 m. Nadajnik tej radiolatarni za pomocą układu antenowego promieniuje dwie wiązki fal radiowych w paśmie około 108 + 115 MHz. Charakterystyka promieniowania radiolatarni kursowej pokazana jest na rys. 39a. Linia kursu samolotu wyznaczona jest w płaszczyźnie pionowej przez strefę równych sygnałów dwulistkowej charakterystyki promieniowania anteny. Fala nośna jednej charakterystyki modulowana jest amplitudowo napięciem o częstotliwości 90 Hz, a drugiej napięciem o częstotliwości 150 Hz.



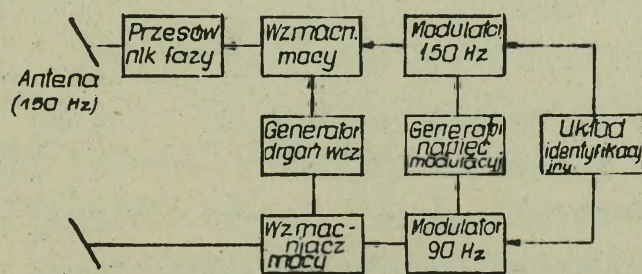
Rys. 39

Charakterystyki kierunkowe promieniowania radiolatarni w systemie lądowania samolotów według przyrządów: a - charakterystyka radiolatarni kursowej; b - charakterystyka radiolatarni toru schodzenia; c - charakterystyka radiolatarni znacznikowej.

Zależnie od kąta nachylenia samolotu od strefy równych sygnałów, w odbiorniku pokładowym przeważa albo napięcie o częstotliwości 90 Hz, albo 150 Hz, w związku z czym pilot jest w stanie naprowadzić samolot dokładnie na strefę równych sygnałów. Radiolatarnia kursowa wytwarza również specjalny sygnał identyfikujący, który powstaje w wyniku modulowania fali nośnej nadajnika radiolatarni napięciem o częstotliwości akustycznej zgodnie z kodem Morse'a. Sygnał identyfikujący składa się z kilku liter, nadawanych 6 razy w ciągu minuty.

Radiolatarnia ścieżki schodzenia promieniuje fale radiowe w paśmie częstotliwości 328 ÷ 326 MHz. Zasięg radiolatarni wynosi około 20 km, co umożliwia sprowadzenie samolotu nad pas do lądowania. Radiolatarnia ta, podobnie jak radiolatarnia kursowa, promieniuje dwie wiązki fal, dających charakterystyki w przestrzeni, których widok przedstawiony jest na rys. 39b. Charakterystyki wytworzone są przez dwie anteny radiolatarni. Jedna antena umieszczona jest kilka metrów nad ziemią i wytwarza szeroką charakterystykę promieniowania, przemodulowaną amplitudowo częstotliwością 150 Hz. Druga antena umieszczona jest bardzo nisko nad ziemią i wytwarza wielolistkową charakterystykę promieniowania przemodulowaną napięciem o częstotliwości 90 Hz. Tor schodzenia utworzony jest przez strefę równych sygnałów szerokiej charakterystyki promieniowania i dolnego listka charakterystyki wielolistkowej. Strefa równych sygnałów jest prawie równoległa do powierzchni lotniska.

Pod względem układowym obie radiolatarnie - kursowa i toru schodzenia, różnią się jedynie częstotliwością i mocą promieniowania. Wynika to z zapewnienia odpowiednich zasięgów. Moc radiolatarni kursowej wynosi około 25 W, natomiast radiolatarni ścieżki schodzenia około 6 W. Uproszczony schemat blokowy radiolatarni kursu przedstawiony jest na rys. 40.



Rys. 40
Schemat funkcjonalny radiolatarni kursowej

Generator drgań wielkiej częstotliwości posiada stabilizację kwarcową, przy czym żadaną częstotliwość roboczą nadajnika uzyskuje się poprzez wielokrotne powielanie częstotliwości podstawowej generatora w.cz. Wzmacniacze mocy są oddzielne dla każdego kanału modulacji. Napięcia modulujące o częstotliwości 90 i 150 Hz, wytwarzane są we wspólnym generatorze, dającym napięcie o częstotliwości 30 Hz, które jest następnie powielane odpowiednią ilość razy, aż do uzyskania częstotliwości odpowiednich dla obu kanałów.

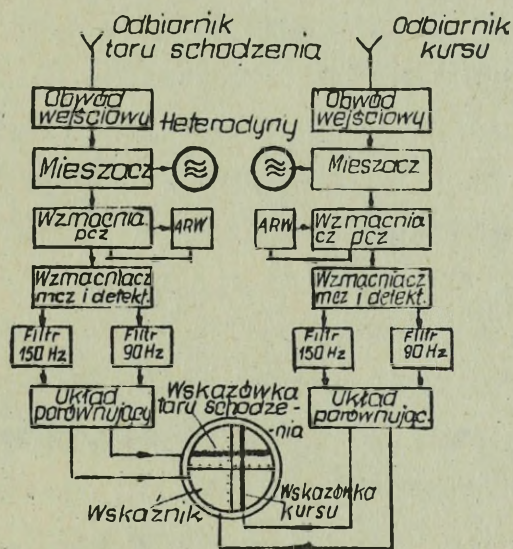
W układzie identyfikacyjnym powstaje napięcie o częstotliwości 1000 Hz, które służy do wytwarzania sygnału identyfikującego. Napięcie to jest doprowadzone do każdego modulatora kanału, gdzie łącznie z napięciem 90 lub 150 Hz, moduluje odpowiednią wiązkę promieniowania. Na wyjściu kanału 150 Hz znajduje się przesuwnik fazy, który umożliwia ściśle synfazowe zasilanie anten, co jest niezbędnym warunkiem wytworzenia prawidłowej charakterystyki kierunkowej radiolaterni kursu lub radiolaterni ścieżki schodzenia.

Radiolaternie znacznikowe - radiomarkiery, rozstawione są na osi pasa startowego w odległościach podanych na rys. 38. Wszystkie one pracują na jednej częstotliwości nośnej równej 75 MHz, a różnią się tylko częstotliwością modulacji i sygnałem identyfikującym. Napięcie nośne zewnętrznej radiolaterni znacznikowej modulowane jest napięciem 400 Hz i sygnałem telegraficznym np. litery T. Środkowa radiolaterna modulowana jest napięciem o częstotliwości 1300 Hz i sygnałem telegraficznym, np. litery TE. Wewnętrzna radiolaterna znacznikowa modulowana jest napięciem o częstotliwości 3000 Hz i sygnałem telegraficznym, np. litery E. Charakterystyka promieniowania radiomarkiera w płaszczyźnie pionowej przedstawiona jest na rys. 39c. Kąt rozwarcia stożka charakterystyki zależy od wymaganego czasu przelotu samolotu nad danym radiomarkierem. Czas ten zależy od wysokości lotu i prędkości samolotu. Przy prędkości lotu około 200 km/godz., czas ten dla radiolaterni zewnętrznej powinien wynosić - 8 - 16 sek., dla radiolaterni środkowej 4 - 8 sek oraz dla radiolaterni wewnętrznej 2 - 4 sek.

Oprócz wyposażenia naziemnego, w skład systemu lądowania według przyrzędów, wchodzi urządzenia pokładowe składające się z odbiornika sygnałów kursu i odbiornika sygnałów

ścieżki schodzenia, współpracujące ze wspólnym wskaźnikiem oraz odbiornika sygnałów radiolatarni znacznikowych.

Schemat blokowy zespołu odbiorników pokładowych odbierających sygnały radiolatarni kursowej i ścieżki schodzenia przedstawiony jest na rys. 41. Heterodyny w tych odbiornikach są stabilizowane kwarcem. Na wyjściu wzmacniaczy małej częstotliwości znajdują się wąskopasmowe filtry zestrojone na częstotliwości odpowiednio 90 i 150 Hz, otrzymywane



Rys. 41

Schemat blokowy odbiorników sygnałów kursu i toru schodzenia wraz ze wskaźnikami pokładowym.

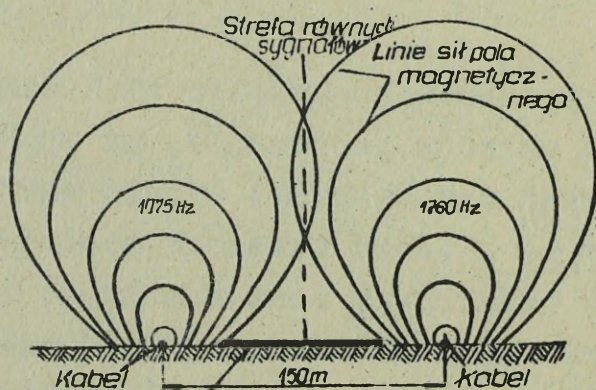
z wyjścia detektorów. Wyprostowane napięcia tych częstotliwości są doprowadzone do układów porównania, na wyjściu których włączony jest przyrząd wskazówkowy. Zwykle oba przyrządy wskazówkowe połączone są w jeden wskaźnik posiadający dwie wskazówki: pionową, wskazującą kurs samolotu, i poziomą, wskazującą ścieżkę schodzenia. Odchylenie wskazówek od linii środkowych przyrządu oznacza zejście samolotu z linii toru schodzenia lub z kursu. W takich wypadkach pilot, manewrując sterami naprowadza samolot na właściwy kurs i odpowiedni tor schodzenia, posługując się wskaźnikiem przyrządów pokładowych urządzenia lądowania.

Odbiornik sygnałów radiomarkierów jest odbiornikiem bezpośredniego wzmocnienia. Odebrany sygnał radiolatarni znacznikowej po detekcji i wzmocnieniu uruchamia przekaz-

nik włączający obwód lampki kontrolnej i sygnału akustycznego, które sygnalizują pilotowi przelot samolotu nad danym radiomarkierem.

System lądowania według przyrządów pozwala na doprowadzenie samolotu do 50 m nad pas startowy, następnie pilot realizuje ostatnią fazę lądowania, wyłącznie na podstawie obserwacji pasa startowego i świateł. Widzimy z powyższego, że omawiany system lądowania zapewnia lądowanie samolotów jedynie przy sprzyjających warunkach meteorologicznych. Przy słabej widoczności, podczas gęstej mgły, burz śniegowych itp. lądowanie może być bardzo ryzykowne.

W związku z tym ważnym zagadnieniem radionawigacyjnym jest problem całkowitego zautomatyzowania procesu lądowania. Istnieje kilka systemów automatycznego lądowania, dla przykładu przytoczymy jeden z systemów, rozpracowanych w Anglii, który umożliwia lądowanie samolotów bez widoczności pasa startowego. W systemie zastosowano dwa kable prowadzące, ułożone symetrycznie wzdłuż osi pasa startowego na długości około 1500 m od radiolatarni ścieżki schodzenia, w stronę podejścia do lądowania. Odległość między kablami około 150 m /patrz rys. 42/.



Rys. 42

Linie sił pola magnetycznego wytwarzane przez kable sterujące ułożone wzdłuż pasa startowego.

Kable są zasilane prądem zmiennym o natężeniu 4A i częstotliwości 1075 Hz jeden kabel i 1760 Hz drugi kabel. Kable są zasilane z oddzielnych generatorów o mocy około 1 kVA.

Wzdłuż obu kabli powstaje pole magnetyczne o różnej częstotliwości, którego linie sił w płaszczyźnie prostopadłej do pasa startowego przedstawiono na rys. 42. Nad środkiem pasa startowego zostaje wytworzona strefa równych sygnałów, na którą reaguje czuły odbiornik pokładowy zamontowany na samolocie. Odbiornik ten składa się z zespołu antenowego, wzmacniacza i bloku manipulacyjno-kontrolnego.

W zespole antenowym zastosowano dwie anteny ramowe ustawione względem siebie pod kątem prostym i obracające się z prędkością 1000 obr/min, przy czym oś obrotowa systemu antenowego jest równoległa do osi podłużnej samolotu. Powoduje to modulowanie odbieranych z kabli sygnałów z częstotliwością 30 Hz, dzięki czemu układ taki staje się niezależny od efektu kierunkowego i wpływu wysokości, a reaguje wyłącznie na wartość bezwzględną natężenia pola magnetycznego obu kabli. Odbiornik zapewnia niezawodną pracę układu, poczynając od wysokości 135 m, aż do zetknięcia się kół samolotu z pasem startowym. Kontrolę lądowania przeprowadza się wizualnie ze wskaźnika bloku manipulacyjno-kontrolnego.

Istnieją również radiolokacyjne systemy lądowania według komend z ziemi, które w wyposażeniu współczesnych lotnisk stanowią urządzenia uzupełniające i dublujące.

3.8. Radiowysokościomierze pokładowe

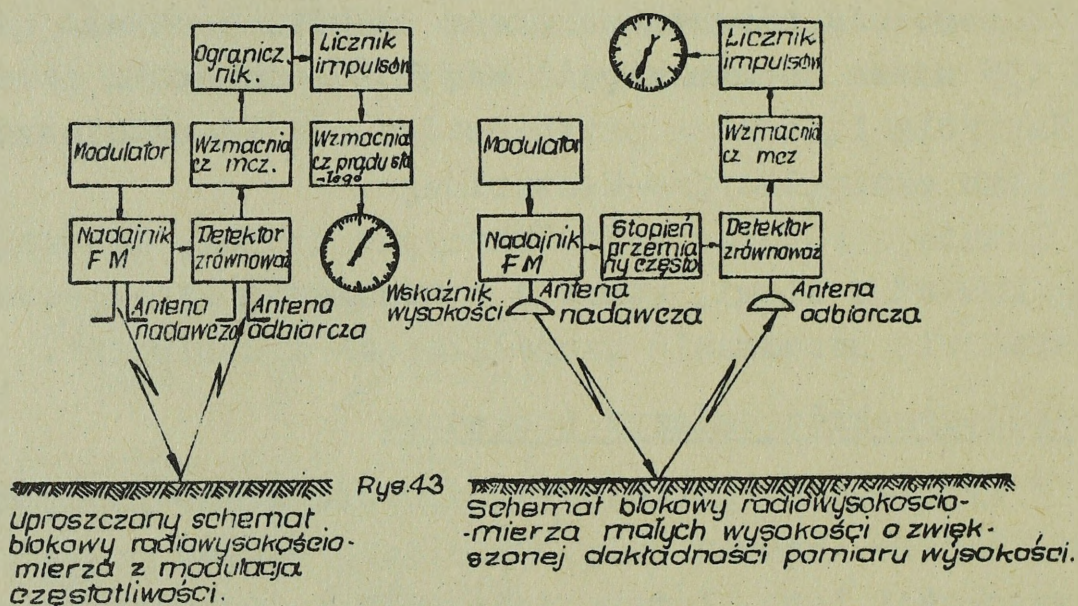
W wyposażeniu pokładowym samolotu radiowysokościomierz spełnia bardzo istotną rolę, umożliwia bowiem pomiar rzeczywistej wysokości lotu. Istota działania radiowysokościomierza polega na zasadzie pomiaru czasu przejścia fali radiowej od nadajnika pokładowego do powierzchni Ziemi i z powrotem. W tym celu na pokładzie samolotu montuje się urządzenie nadawczo-odbiorcze z dwoma antenami: jedną nadawczą, promieniującą fale w kierunku powierzchni ziemi, drugą odbiorczą, odbierającą energię fali odbitej.

W zasadzie istnieją dwa podstawowe rozwiązania układowe radiowysokościomierzy. Do pierwszego rozwiązania należy radiowysokościomierz pracujący na fali ciągłej z modulacją częstotliwości, zapewniający pomiar małych wysokości. Do drugiego rozwią-

zania należy radiowysokościomierz impulsowy, zapewniający pomiar dużych wysokości.

3.8.1. Radiowysokościomierze małych wysokości

Radiowysokościomierze z modulacją częstotliwości stosowane są do pomiaru małych wysokości, ponieważ ich dokładność jest zależna od wysokości¹ maleje ze wzrostem wysokości. Radiowysokościomierze małych wysokości stanowią jeden z podstawowych przyrządów wyposażenia samolotów. Są one szczególnie potrzebne przy automatycznym lądowaniu, gdy wykonanie manewru wyrównania samolotu wymaga niezwykle precyzyjnego kontrolowania chwilowej wysokości samolotu, poczynając od wysokości około 18 m. Błąd w określeniu przy użyciu radiowysokościomierza małych wysokości nie powinien przekraczać 0,5%. Schemat blokowy radiowysokościomierza małych wysokości przedstawia rys. 43.



Nadajnik radiowysokościomierza generuje sygnał ciągły, który jest modulowany w częstotliwości przebiegiem sinusoidalnym otrzymywanym z modulatora. Wytworzony sygnał promieniowany jest przez antenę w kierunku Ziemi i po odbiciu od niej odbierany jest przez antenę odbiorczą. Odebrany sygnał

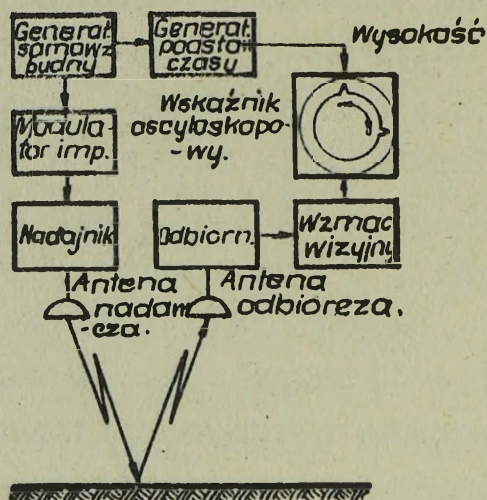
odbity doprowadzany jest do detektora zrównoważonego, do którego doprowadza się również sygnał bezpośredni z nadajnika. W rezultacie podania na wejście detektora sygnału bezpośredniego i odbitego od Ziemi, na wyjściu detektora zrównoważonego powstaje sygnał o częstotliwości dudnień, przy czym obwiednia tego sygnału zmienia się sinusoidalnie z częstotliwością zależną od wysokości. Po wzmocnieniu napięcie to jest przekształcane w impulsy, które powstają w chwilach odpowiadających maksymalnej amplitudzie obwiedni. W ten sposób liczba impulsów powstających w ciągu sekundy stanowi miarę wysokości, dla określonej której zastosowano licznik impulsów. Licznik taki działa na zasadzie gromadzenia ładunku w kondensatorze. Prąd stały, powstający w wyniku wyładowania kondensatora jest proporcjonalny do liczby impulsów na sekundę, co pozwala na wycechowanie wskaźnika wychyłowego w metrach.

Dokładność pomiaru wysokości zależna jest od długości fali, na jakiej pracuje radiowysokościomierz i zwiększa się ona przy zmniejszaniu długości fali roboczej. Radiowysokościomierze małych wysokości pracują w zakresie fal o częstotliwości 440 MHz, przy mocy promieniowania przędu 0,1 - 0,2 W. Pracują na dwóch podzakresach pomiaru wysokości: 0 - 120 m i 100 - 1200 m. Dokładność pomiaru na pierwszym podzakresie $\pm 1,2$ m, dla drugiego podzakresu ± 16 m.

Do pomiaru wysokości w zautomatyzowanych systemach lądowania stosowane są radiowysokościomierze bardziej udoskonalone, pracujące w zakresie fal rzędu 4200 - 4400 MHz, zapewniające dokładność pomiaru wysokości 0,3 m przy wysokości lotu samolotu 15 metrów. Moc nadajnika takich radiowysokościomierzy wynosi około 0,8 kW, system antenowy - tubowy.

3.8.2. Radiowysokościomierze impulsowe

Radiowysokościomierze impulsowe są już w istocie stacjami radiolokacyjnymi, stosowanymi do pomiaru dużych wysokości. Nadajnik poprzez antenę wypromieniowuje impulsy w kierunku Ziemi i po odbiciu są one odbierane, a następnie po wzmocnieniu, przemianie i detekcji, są odtwarzane na ekranie wskaźnika oscyloskopowego. Schemat blokowy radiowysokościomierza impulsowego przedstawiony jest na rys. 44.



Rys. 44.

Schemat blokowy radiowysokościomierza impulsowego do pomiaru dużych wysokości

W układzie wysokościomierza impulsowego czasostereem jest samowzbudny generator kwarcowy, który steruje pracą modulatora impulsowego. Napięcie z generatora samowzbudnego podawane jest do bloku generatora kołowej podstawy czasu wskaźnika oscyloskopowego. Modulator impulsowy uruchamia nadajnik UKF, który promieniuje impulsy sondujące o czasie trwania $0,25 \mu\text{sek}$. Sygnał odbity od Ziemi zostaje odebrany przez antenę odbiorczą, a następnie wzmacniony i podany do detektora. Impulsy prądu stałego po wzmacnieniu we wzmacniaczu wizyjnym, działają na elektrodę sterującą lampy oscyloskopowej, w wyniku czego powstaje wyskok świetlny na linii podstawy czasu. Odległość między obrazowaniem impulsu sondującego, a obrazowaniem impulsu odbitego jest proporcjonalna do wysokości lotu samolotu.

Radiowysokościomierze impulsowe charakteryzują się stałym błędem pomiaru wysokości, zależnym od czasu trwania impulsu sondującego. Przy czasie trwania impulsu rzędu $0,25 \mu\text{sek}$, błąd pomiaru wysokości wynosi około 37 m, ponieważ taką odległość zajmuje w przestrzeni impuls sondujący. Błąd ten nie ma istotnego znaczenia przy dużych wysokościach, niemniej jednak można go zmniejszyć przez zastosowanie impulsów o bardzo małym czasie trwania.

S p i s t r e ś c i

str.

1.	Wstęp - - - - -	3
1.	Pojęcia podstawowe - - - - -	4
1.1.	Przedmiot, podstawowe pojęcia oraz zadania nawigacji - - - - -	4
1.2.	Podstawowe elementy nawigacyjne - - - - -	5
1.3.	Klasyfikacja urządzeń nawigacyjnych - - - - -	9
1.4.	Zasady radionawigacji - - - - -	10
1.5.	Rodzaje fal wykorzystywanych dla celów radio- nawigacji - - - - -	14
2.	Radiotechniczne metody pomiaru elementów nawigacyjnych - - - - -	18
2.1.	Określenie kierunku - - - - -	18
2.2.	Pomiar odległości - - - - -	20
2.3.	Pomiar różnicy odległości - - - - -	24
2.4.	Pojęcie powierzchni położenia i linie położenia - - - - -	27
2.5.	Pomiar wysokości - - - - -	29
2.6.	Obserwacja powierzchni ziemskiej - - - - -	30
2.7.	Pomiar prędkości podróźnej - - - - -	31
3.	Radiotechniczne środki nawigacji stosowane w lotnictwie - - - - -	35
3.1.	Klasyfikacja środków radionawigacyjnych - - -	36
3.2.	Podstawowe wymagania stawiane środkom radionawigacyjnym - - - - -	38
3.2.1.	Niezawodność środków radionawigacyjnych - - -	38
3.2.2.	Dokładność określania danych nawigacyjnych -	40
3.2.3.	Zasięg działania środków radionawigacyjnych -	43
3.2.4.	Odporność na zakłócenia środków radionawiga- cyjnych - - - - -	43
3.2.5.	Przepustowość środków radionawigacyjnych - -	44
3.2.6.	Ekonomiczność środków r/nawigacyjnych - - - -	44
3.3.	Radionamierniki - - - - -	45
3.3.1.	Radionamierniki z pomiarem według metody minimum - - - - -	46
3.3.2.	Radionamierniki pracujące z wykorzystaniem namiaru na maksimum - - - - -	54
3.3.3.	Radionamierniki pracujące według zasady porów- nywania sygnałów - - - - -	55
3.4.	Przeznaczenie i rodzaje radiolatarni - - - - -	59
3.4.1.	Radiolatarnie oznaczające - - - - -	60

3.4.2.	Radiolatarnie bezkierunkowe	61
3.4.3.	Radiolatarnie kierunkowe	63
3.4.4.	Ultrakrótkofalowe radiolatarnie kursowe	66
3.5.	Hiperboliczne systemy radionawigacyjne	68
3.5.1.	Zasada systemu hiperbolicznego	68
3.5.2.	Fazowy system radionawigacji hiperbolicznej	70
3.5.3.	Impulsowy system radionawigacji hiperbolicznej	73
3.6.	Pokładowe autonomiczne urządzenia radionawigacyjne	75
3.7.	Radionawigacyjne systemy lądowania	81
3.8.	Radiowysokościomierze pokładowe	87
3.8.1.	Radiowysokościomierze małych wysokości	88
3.8.2.	Radiowysokościomierze impulsowe	89

Spis treści

Bibliografia.

B i b l i o g r a f i a

1. Astafiew G.P., Szepszajewicz W.S., Jurkow J.A.
Radiotekhnicheskije sredstva nawigacii letatielnykh
apparatow.
"Sowietskoje Radio" - 1962.
2. Frołow W.S. Inercyjnyje sistemy nawigacii.
Wojenizdat Moskwa - 1963
3. Jagodziński Z. Systemy radionawigacyjne, Wyd. MON Warszawa
1961.
4. Mangiel N. Urządzenia radionawigacyjne komunikacji lotniczej.
Wyd. MON Warszawa - 1964.
5. Bolchowitinow W.F. Puti rozwitia letatielnykh aparatow.
Oboronogiz - 1962.

Odbito w 30 egz.

Egz. nr 1-30 Bibl. Jawna

Wyk. Siwicki - kpt.

Druk. ZU

Nr ks. 2959/WW

Kor. A.J.

Druk. ASG-0-XV-4782

