AKADEMIA SZTABU GENERALNEGO
im. generała broni K. Świerczewskiego

ODDZIAŁ Nr 2

Egz. Nr 23

kpt. mgr Jerzy SIWICKI

CHARAKTERYSTYKI OBIEKTÓW POWIETRZNYCH ORAZ PARAMETRY STACJI RADIOLOKACYJNYCH WPŁYWAJĄCE NA ZASIĘG WYKRYWANIA CELÓW

WARSZAWA CZERWIEC 1967

AKADEMIA SZTABU GENERALNEGO
im. generała broni K. Świerczewskiego

ODDZIAŁ Nr 2

Egz. Nr 23

kpt. mgr Jerzy SIWICKI

CHARAKTERYSTYKI OBIEKTÓW POWIETRZNYCH ORAZ PARAMETRY STACJI RADIOLOKACYJNYCH WPŁYWAJĄCE NA ZASIĘG WYKRYWANIA CELÓW

WARSZAWA CZERWIEC 1967

A K A D E M I A S Z T A B U G E N E R A L N E G O
im, generała broni Karola Swierczewskiego

ODDZIAŁ Nr 2

"ZATWIERDZAM
SZEF KATEDRY NR 36

Dnia 10 czerwca 1967 r.

Kpt. mgr Jerzy SIWICKI

CHARAKTERYSTYKI OBIEKTÓW POWIETRZNYCH ORAZ PARAMETRY STACJI RADIOLOKACYJNYCH WPŁYWAJCE NA ZASIĘG WYKRYWANIA CELÓW

WARSZAWA Czerwiec 1967 r.

PODZIAŁ OBIEKTÓW RADIOLOKACYJNYCH

Obiektami radiolokacyjnymi nazywamy wszelkie przedmioty, znajdujące się w przestrzeni otaczającej stację radiolokacyjną, posiadające zdolność odbijania energii elektromagnetycznej padającej na nie. Zdolność ta nazywana jest często wtórnym promieniowaniem, a sygnał odbity od danego obiektu nosi nazwę echa radiolokacyjnego.

Wszystkie obiekty radiolokacyjne, w zależności od charakteru wtórnego promieniowania można podzielić w zasadzie na trzy grupy.

Do pierwszej grupy należą obiekty pojedyncze /pojedynczy samolot, okręt, pocisk rakietowy i t.p./, od których odbity wypadkowy sygnał radiowy odbierany jest przez odbiornik stacji radiolokacyjnej niezależnie od sygnałów odbitych od innych celów.

Do drugiej grupy należą tzw. cele grupowe, składające się z kilku lub kilkunastu obiektów pojedynczych. Typowym przykładem celu grupowego jest zwarty szyk samolotów /eskadra, pułk i t.p./. Wypadkowy sygnał odbity od celu grupowego jest rezultatem złożenia sygnałów odbitych od kilku obiektów pojedynczych jednocześnie.

Do trzeciej grupy należą takie obiekty radiolokacyjne, jak: opady atmosferyczne, odbijacze dipolowe, powierzchnia ziemi, przedmioty terenowe, duże grupy przelatujących ptaków i t.p. Są to tzw. obiekty wieloznaczne obejmujące znaczne objętości przestrzenne i powierzchnie.

Intensywność fal radiowych wtórnego promieniowania, to jest intensywność sygnałów odbitych od obiektów radiolokacyjnych, proporcjonalna jest intensywności energii elektromagnetycznej wypromieniowanej przez stację radiolokacyjną. Niezależnie od tego, intensywność wtórnego promieniowania w znacznym stopniu zależna jest od charakterystyki obiektów radiolokacyjnych.

EFEKTYWNA POWIERZCHNIA ODBICIA CELU POJEDYNCZEGO

Bardzo ważną, uogólnioną ilościową charakterystyką celu radiolokacyjnego jest jego efektywna powierzchnia odbicia σ wyrażona w metrach kwadratowych.

Stacja radiolokacyjna, wykrywająca obiekt, w miejscu znajdowania się celu wytwarza gęstość strumienia mocy padającej p_{pad}. Pod działaniem padającej fali radiowej cel staje się źródłem wtórnego promieniowania z mocą promieniowania $P_{odb.}$. Moc wtórnego promieniowania związana jest z gęstością strumienia mocy padającej na cel następującą zależnością:

$$P_{odb} = p_{pad} \cdot \sigma \qquad /1/$$

Skuteczna powierzchnia odbicia celu σ wyrażona jest w metrach kwadratowych i charakteryzuje właściwości obiektu dotyczącego wtórnego promieniowania. Im większa jest skuteczna powierzchnia odbicia obiektu, tym większa ilość mocy odbitej odebrana zostanie przez antenę stacji radiolokacyjnej.

Skuteczną powierzchnię odbicia celu można przedstawić jako ekwiwalentną płaszczyznę wtórnego promiennika, która równomiernie rozsiewa całą energię padającą na niego i stwarza w punkcie odbioru taką gęstość strumienia energii, jaką daje realny wtórny promiennik.

Dla obiektów o prostych kształtach geometrycznych skuteczną powierzchnię odbicia można wyliczyć teoretycznie. Dla bardziej skomplikowanych obiektów /samoloty, okręty, rakiety/ jest ona określana praktycznie.

Praktyczny znaczenie rozpatrywanej charakterystyki celu jest to, że znając zawczasu skuteczną powierzchnię odbicia danego obiektu, a także konieczne parametry stacji radiolokacyjnej, można wyliczyć gęstość strumienia mocy wtórnego promieniowania przy antenie stacji P_{odb} i sprawdzić tym samym możliwość wykrycia danego obiektu.

Niżej będzie pokazane, że znając skuteczną powierzchnię odbicia, można określić maksymalny zasięg wykrycia obiektu radiolokacyjnego. Zmiana czynników, od których zależy wielkość skutecznej powierzchni odbicia, w bardzo znacznym stopniu wpływa na prawdopodobieństwo wykrycia celu.

Gęstość strumienia mocy wtórnego promiennika, w punkcie umieszczenia stacji radiolokacyjnej można określić ze wzoru:

$$P_{odb} = \frac{P_{odb}}{4\pi D^2} = \frac{p_{pad} \cdot \sigma}{4\pi D^2} \qquad /2/$$

gdzie: $4\pi D^2$ - powierzchnia kuli o promieniu D

D - odległość pochyła do celu.

Przekształcając wyrażenie /2/ otrzymamy dla efektywnej powierzchni odbicia wzór:

$$\sigma = 4\pi D^2 \frac{P_{odb}}{p_{pad}} \qquad /3/$$

Jak wynika ze wzoru /3/ skuteczna powierzchnia odbicia obiektu radiolokacyjnego proporcjonalna jest stosunkowi: gęstości strumienia mocy wtórnego promieniowania przy antenie stacji, do gęstości strumienia mocy padającej na cel.

Skuteczna powierzchnia odbicia obiektów powietrznych nie jest zależna od odległości /przy założeniu, że rozmiary celu są znacznie mniejsze od objętości odbijającej/ mimo, że odległość D wchodzi do wzoru /3/. Rzecz w tym, że gęstość strumienia mocy padającej na cel jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości, a gęstość strumienia mocy wtórnego promieniowania odwrotnie proporcjonalna czwartemu stopniowi odległości.

Rzeczywiście

$$p_{pad} = \frac{k_1}{D^2}; \quad p_{odb} = \frac{k_2}{D^4}$$

podstawiając powyższe do wzoru /3/ otrzymamy:

$$\sigma = 4\pi \frac{k_2}{k_1}$$

gdzie k_1, k_2 - współczynniki niezależne od odległości.

Skuteczna powierzchnia odbicia obiektów radiolokacyjnych zależna jest od długości fali promieniowującej cel, od elektrycznych właściwości materiału, rozmiarów, kształtu i położenia celu względem kierunku na stację wykrywającą.

Im lepsza jest przewodność elektryczna materiału /z którego zbudowany jest cel/, tym większa jest skuteczna powierzchnia odbicia. Dwa obiekty o jednakowych rozmiarach i kształcie, wykonane z różnych materiałów, posiadają różne efektywne powierzchnie odbicia. Obiekty metalowe zawsze posiadają większą efektywną powierzchnię odbicia w porównaniu z innymi obiektami niemetalowymi.

Zasadniczy wpływ na wielkość skutecznej powierzchni odbicia posiadają rozmiary obiektu i stosunek między rozmiarami obiektu i długością fali radiowej padającej na wykrywany obiekt. Im większa jest geometryczna powierzchnia obiektu radiolokacyjnego, tym większa jest efektywna powierzchnia odbicia. Jednakże geometryczna powierzchnia liczbowo nie jest równa jej efektywnej powierzchni odbicia. Na przykład: dla kuli $S = 4\pi R^2$, a jej efektywna powierzchnia odbicia $\sigma = \pi R^2$, przy założeniu, że kula jest metalowa, a promień kuli R jest znacznie większy od długości fali radiowej padającej na nią.

Jeżeli rozmiary liniowe obiektu radiolokacyjnego są mniejsze od długości fali radiowej, to fale radiowe uginają się i odbicie od obiektu nie następuje. Wtórne promieniowanie w tym wypadku jest bardzo nieduże, a zasięg działania stacji radiolokacyjnej dla obiektów o małych rozmiarach będzie bardzo mały.

Duży wpływ na charakter wtórnego promieniowania, w kierunku na stację radiolokacyjną, posiada kształt obiektu radiolokacyjnego. Każdy obiekt jako wtórny promiennik przedstawia sobą jakby antenę nadawczą ze swoją kierunkową charakterystyką promieniowania. Kierunkowa charakterystyka promieniowania obiektu przedstawia sobą rozdzieloną intensywność wtórnego promieniowania w zależności od kierunku.

Nieskomplikowane, pod względem geometrycznym, obiekty radiolokacyjne posiadają proste twory kierunkowej charakterystyki wtórnego promieniowania. Na przykład charakterystyka kierunkowa dla kuli przedstawia sobą koło w dowolnej płaszczyźnie, ponieważ wtórne promieniowanie kuli jest jednakowe dla dowolnego kierunku padającej nań fali radiowej. Natomiast dla metalowej płytki o rozmiarach liniowych

większych od długości fali radiowej, padającej na płytkę pod kątem 90°, można wyliczyć ze wzoru:

$$\sigma = 4\pi \frac{S^2}{\lambda^2} \qquad /4/$$

gdzie: S - geometryczna powierzchnia płytki

λ - długość fali

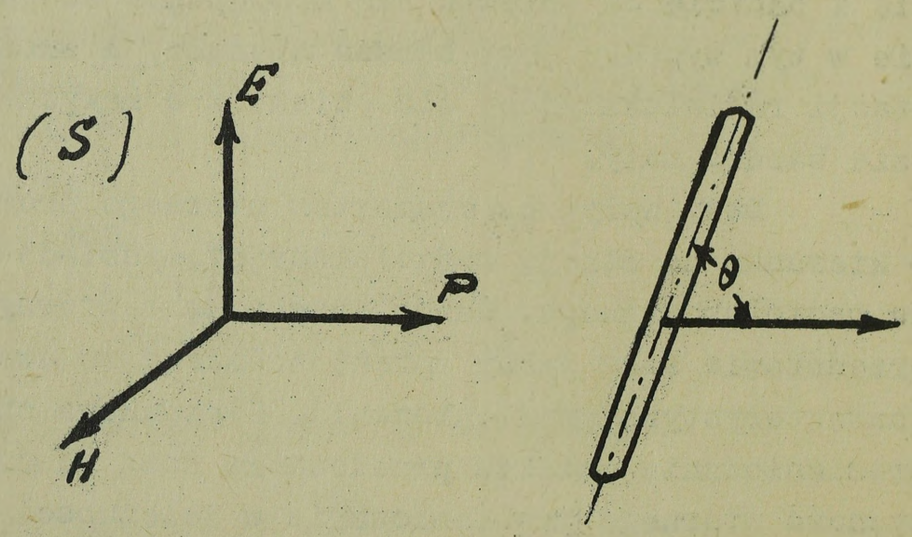
/dowód wzoru /4/ pomijam/.

Rozpatrzmy wpływ położenia celu na wielkość efektywnej powierzchni odbicia na przykładzie półfalowego dipola. Efektywną powierzchnia odbicia dipola, znajdującego się w płaszczyźnie S /rys.1/ określa się ze wzoru:

$$\sigma = 0{,}86\,\lambda^2 \sin^4\theta \qquad /5/$$

gdzie θ - kąt zawarty między kierunkiem rozchodzenia się fali radiowej i osią dipola.

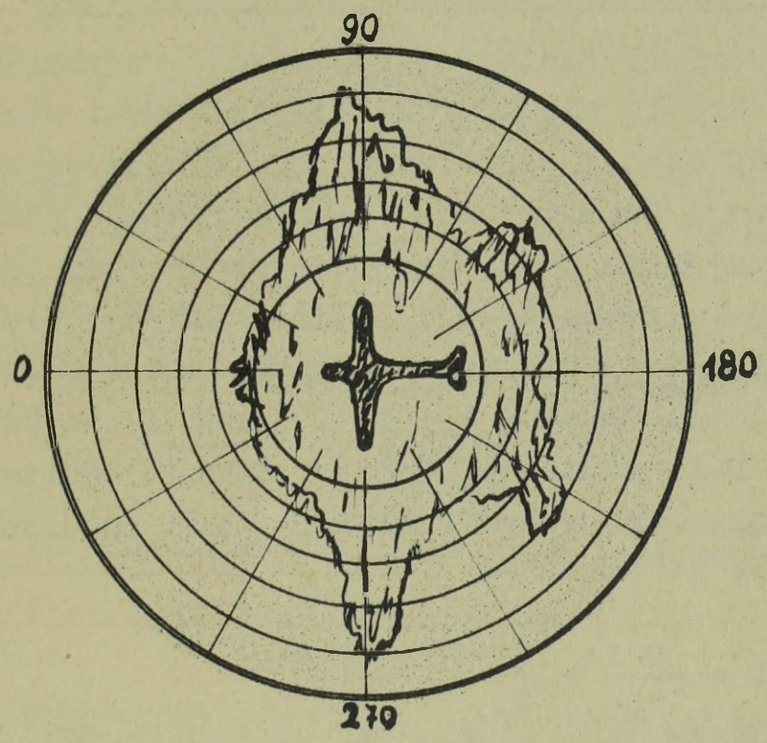
Jak widać z wyrażenia /5/ przy zmianie kąta θ odpowiednio zmienia się efektywna powierzchnia odbicia.



Rys.1

Jako drugi przykład obiektu, od położenia którego zależy efektywna powierzchnia odbicia, weźmy samolot. Charakterystyka zmian efektywnej powierzchni odbicia w zależności od kierunku, przedstawia stosunkowo skomplikowaną formę/rys.2/.

Należy podkreślić, że wraz ze skróceniem długości fali, zwiększa się ilość listków w charakterystyce wtórnego promieniowania. Nierównomierność wtórnego promieniowania wzdłuż różnych kierunków i tym samym ostre zmiany efektywnej powierzchni odbicia powoduje, że odległość wykrycia obiektu zależna jest od kursu i może przy zmianach kursu celu spowodować całkowity zanik impulsu odbitego na ekranie wskaźnika radiolokacyjnego.



Rys. 2

Mimo że skuteczna powierzchnia odbicia zależna jest od kursu celu, to jednak dla wyliczeń praktycznych wykorzystuje się średnie statystyczne wielkości efektywnej powierzchni odbicia, zbliżone co do swej wielkości dla wszystkich kierunków.

Przybliżone średnie wielkości efektywnej powierzchni odbicia dla niektórych obiektów radiolokacyjnych podane są w zamieszczonej tabelce:

Obiekt pojedynczy	Efektywna powierzchnia odbicia w m^2
Samolot myśliwski	5- 10
Sredni bombowiec	15- 25
Ciężki bombowiec	30-100
Sredni okręt	ponad 1000 m^2

EFEKTYWNA POWIERZCHNIA ODBICIA CELOW GRUPOWYCH

Strefa promieniowania fal radiowych w azymucie i kącie wzniesienia określa się szerokością charakterystyki promieniowania anteny stacji radiolokacyjnej w płaszczyznach poziomej i pionowej. Czas opromieniowania każdego punktu obiektu radiolokacyjnego równy jest szerokości impulsu sondującego τ wysyłanego przez stację radiolokacyjną. Głębokość impulsu w przestrzeni, w kierunku rozchodzenia się fali radiowej, jest równa iloczynowi c : τ , gdzie c- szybkość rozchodzenia się fali radiowej. Odbiór sygnału odbitego od pojedynczego obiektu, w przerwie między dwoma impulsami odbywa się w czasie:

$$t = \frac{2l}{c} + \tau$$

gdzie l - rozciągłość celu w kierunku rozchodzenia się fali radiowej.

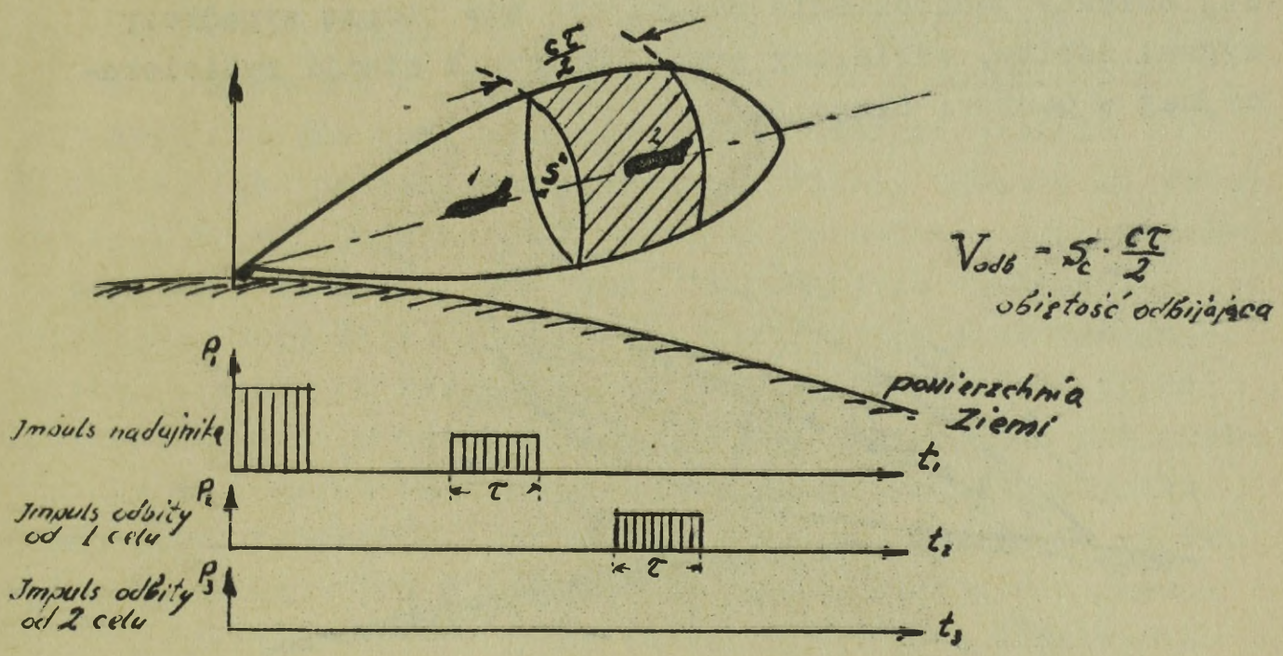
Jeżeli $\frac{2l}{c}$ jest znacznie mniejsze od τ , to $t \approx \tau$.

Załóżmy, że w granicach strefy promieniowania znajdują się dwa pojedyncze cele /rys.3/. Rozpatrzmy na jakiej najmniejszej odłegłości powinny znajdować się cele, aby sygnał odbity od nich nie składał się w jeden ciągły impuls.

Jak wynika z rys. 3, dwa sygnały odbite od dwóch obiektów będą niezależne jeżeli odbiór drugiego sygnału rozpocznie się po czasie większym od czasu trwania impulsu sondującego τ . Stąd wniosek, że najmniejszą odległością między dwoma obiektami, przy której sygnały odbite będą od siebie niezależne, będzie:

$$d = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad \text{przy} \quad t \gg \frac{c \cdot \tau}{2}$$

gdzie: d - najmniejsza odległość między obiektami, od których odbite sygnały będą odebrane przez odbiornik i zobrazowane na wskaźniku stacji jako oddzielne impulsy.



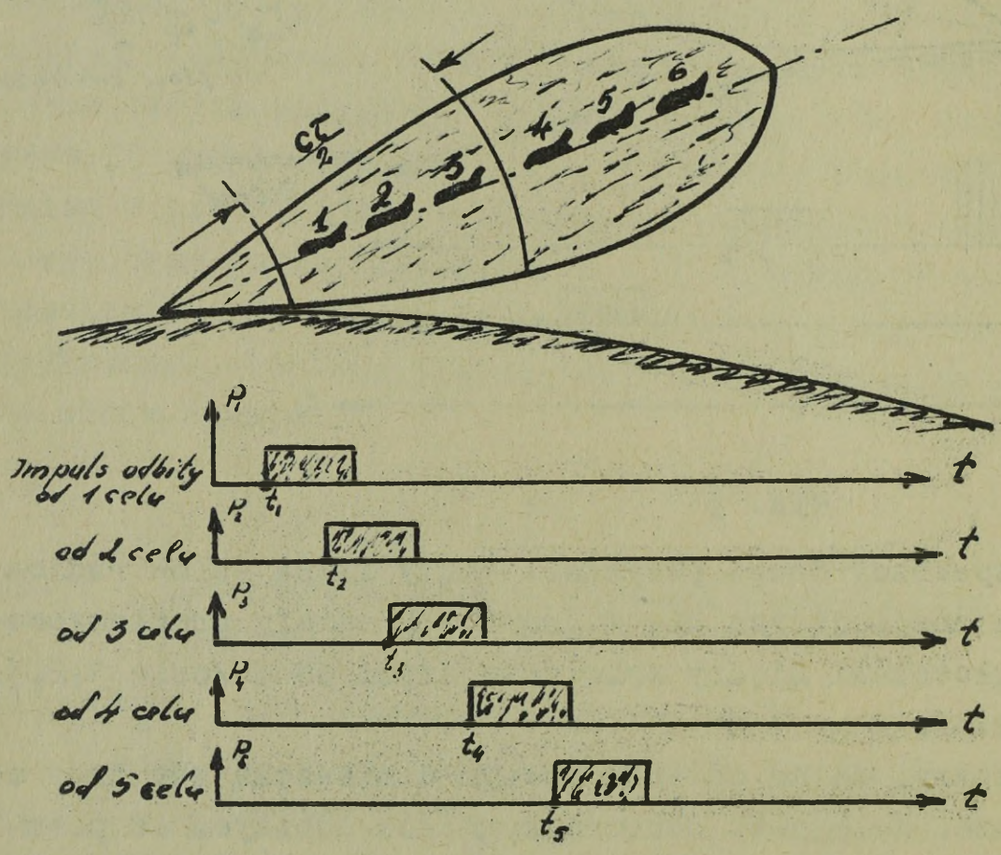
Rys. 3

Rozpatrzmy drugi przykład. Weźmy kilka celów radiolokacyjnych znajdujących się w granicach strefy promieniowania z odległościami między sobą mniejszymi od d /cele 1,2,3, 4,5,6/ /rys.4/.

Załóżmy, że na odcinku równym d mieszczą się trzy cele pojedyncze. Kolejność odbioru sygnałów odbitych od poszczególnych celów pokazana jest na rys.4. W okresie od t_1 do t_2 na wejście odbiornika będzie przychodził sygnał odbity tylko od celu pierwszego. Od t_2 do t_3 sygnał odebrany będzie od celów pierwszego i drugiego. Od t_3 do t_4 sygnał odebrany będzie od celów pierwszego, drugiego i trzeciego. Od t_4 do t_5 sygnał odebrany będzie od celów drugiego, trzeciego i czwartego i t.d.

Na podstawie powyższego można sformułować ważny wniosek: że jednoczesny odbiór sygnałów odbitych od kilku

obiektów, rozmieszczonych na głębokości większej od d, możliwy jest tylko od celów znajdujących się w granicach objętości, głębokość której wynosi d, a przekrój określony jest konfiguracją kierunkowej charakterystyki promieniowania /rys.3/. Jest to tzw. objętość odbijająca. A zatem - objętość odbijająca jest to obszar w przestrzeni, wewnątrz której obiekty jednocześnie znajdujące się tworzą wypadkowy sygnał odbity, odbierany przez odbiornik stacji radiolokacyjnej w postaci ciągłej.



Rys.4

Jeżeli w granicach objętości odbijającej znajduje się jeden obiekt, to taki cel radiolokacyjny nazywamy celem pojedynczym. Natomiast jeżeli w granicach objętości odbijającej znajduje się kilka obiektów pojedynczych, to taki cel nazywamy grupowym.

Określmy teraz efektywną powierzchnię odbicia celu grupowego. Dla celu grupowego efektywna powierzchnia odbicia jest proporcjonalna ilości pojedynczych obiektów radiolokacyjnych, znajdujących się jednocześnie w granicach jednej objętości odbijającej. Moc wypadkowa sygnału odbitego nie zależy od ogólnej ilości obiektów znajdujących się w strefie promieniowania fal radiowych, a zależna jest jedynie od ilości obiektów znajdujących się w jednej objętości odbijającej. Jednakże skuteczna powierzchnia odbicia celu grupowego nie jest arytmetyczną sumą skutecznych powierzchni odbicia obiektów pojedynczych. Powierzchnia odbicia, zgodnie ze wzorem /3/, proporcjonalna jest gęstości strumienia mocy sygnału odbitego. Wielkość ta z kolei zależna jest od ilości obiektów, które jednocześnie odbijają energię elektromagnetyczną. W realnych warunkach, kiedy obiekty radiolokacyjne rozmieszczone są w objętości odbijającej i znajdują się praktycznie na różnych odległościach od stacji radiolokacyjnej, jednoczesne istnienie sygnałów odbitych od wszystkich celów będzie możliwe tylko od jakiejś to części szerokości impulsu τ. Dlatego też nie można zakładać, że gęstość strumienia energii odbitej, otrzyma w rezultacie odbicia od n obiektów pojedynczych, będzie o n razy większa od gęstości strumienia mocy odbitej od obiektu pojedynczego. Z tego też powodu i efektywna powierzchnia odbicia celu grupowego nie może być o n razy większa od skutecznej powierzchni odbicia obiektu pojedynczego.

Biorąc pod uwagę powyższe należy przyjąć, że efektywna powierzchnia odbicia celu grupowego może być wyliczona ze wzoru po wprowadzeniu współczynnika zapełnienia η =:

$$\sigma_{gr.} = \eta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \cdots + \sigma_n) \qquad /5/$$

gdzie η - współczynnik zapełnienia zależny od wzajemnego usytuowania obiektów w objętości odbijającej. Współczynnik ten wybierany jest eksperymentalnie w granicach od 0,4 do 0,9.

σ_i - efektywne powierzchnie odbicia obiektów pojedynczych znajdujących się w jednej objętości odbijającej i = 1,2,3,...,n.

W wypadku kiedy cel grupowy składa się z pojedynczych obiektów o jednakowych powierzchniach to skuteczną powierzchnię odbicia dla celu grupowego wylicza się ze wzoru:

$$\sigma_{gr} = \eta \, n \, \sigma_o \qquad /9/$$

gdzie: n - ilość obiektów pojedynczych znajdujących się w jednej objętości odbijającej;

σ_o - efektywna powierzchnia odbicia celu pojedynczego.

P r z y k ł a d :

$n = 9$ samolotów

$\sigma_o = 25 \ m^2$

$\eta = 0,4$

$\sigma_{gr} = \eta \, n \, \sigma_o = 0,4 \cdot 9 \cdot 25 = 90 \ m^2.$

Widzimy z powyższego przykładu, że cel grupowy, składający się z 9 samolotów, średnich bombowców, posiada efektywną powierzchnię odbicia równą w przybliżeniu efektywnej powierzchni odbicia ciężkiego bombowca /patrz tabelka efekt.pow./.

EFEKTYWNA POWIERZCHNIA ODBICIA CELOW WIELOZNACZNYCH

Celami wieloznacznymi nazywamy obiekty, rozmiary których znacznie przewyższają rozmiary objętości odbijającej. Obiekt taki składa się z dużej ilości różnych elementów odbijających.

Cele wieloznaczne można podzielić na powierzchniowe i objętościowe. Do pierwszej grupy zaliczamy powierzchnie ziemi, morza i t.p. Do drugiej grupy celów objętościowych zaliczamy pasma opadów atmosferycznych, chmur, odbijaczy dipolowych, grupy przelatujących ptąków i t.p.

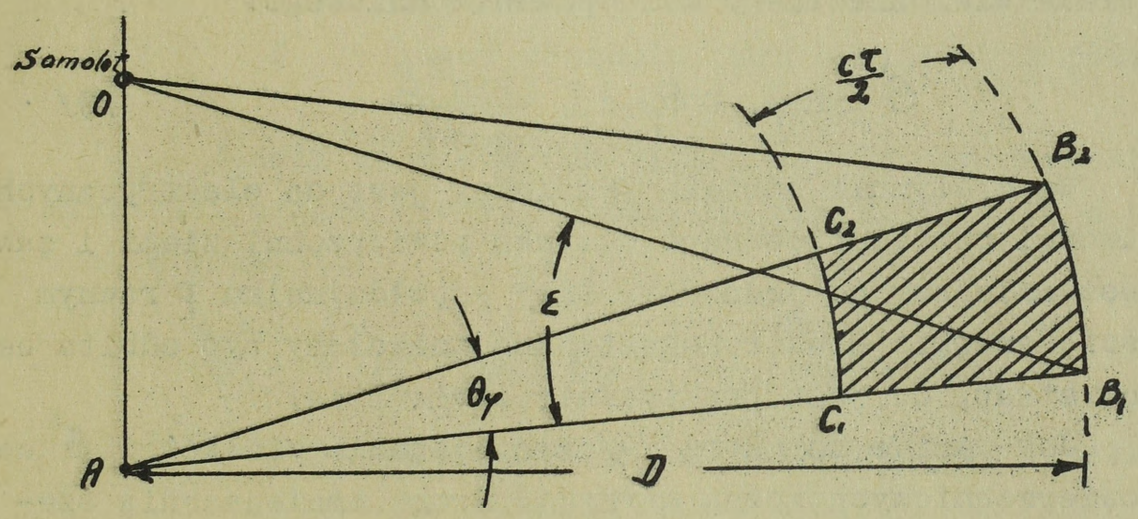
Z celami powierzchniowymi spotykamy się przy wykorzystaniu samolotowych panoramicznych stacji radiolokacyjnych. Na wskaźniku tych stacji w określonej skali można obserwować zobrazowanie wycinków powierzchni ziemi, morza /panoramę/.

Cele wieloznaczne charakteryzują się tym, że ilość elementów, tworzących jednoczesny sygnał odbity, jest bardzo duża i różnorodna. Dlatego też wypadkowy sygnał odbity może być określany jedynie na podstawie teorii prawdopodobieństwa i statystyki.

EFEKTYWNA POWIERZCHNIA ODBICIA POWIERZCHNIOWEGO CELU WIELOZNACZNEGO

Określmy efektywną powierzchnię odbicia celu wieloznacznego dla pewnej powierzchni ziemi opromieniowanej anteną radiolokacyjnej stacji panoramicznej.

Samolot ze stacją panoramiczną znajduje się w punkcie O, opromieniowuje odcinek powierzchni ziemi w sektorze A B_1 B_2 /rys.5/. Szerokość tego sektora przyjmujemy równą szerokości charakterystyki promieniowania anteny w płaszczyźnie poziomej.



Rys.5

Jako powierzchnię odbijającą można uważać płaszczyznę geometryczną o powierzchni S równej:

$$S = B_1 C_1 \cdot B_1 B_2 \quad \text{/wynik z rysunku 5/.}$$

Odcinek $C_1B_1 = \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot \frac{1}{\cos \varepsilon}$, a odcinek B_1B_2, dla małych kątów θ_φ równy jest $B_1B_2 = D \cdot \theta_\varphi$, podstawiając do wyrażenia S otrzymamy:

$$S = \frac{c\,\tau}{2 \cos \varepsilon} \cdot D\,\theta_\varphi \qquad /7/$$

Wyrażenie S na geometryczną powierzchnię nie odpowiada efektywnej powierzchni odbicia celu powierzchniowego. Rozpatrując powierzchnię ziemi jako rozpraszającą energię elektromagnetyczną w różnych kierunkach, można otrzymać następujący wzór dla efektywnej powierzchni odbicia danej powierzchni ziemi o rozmiarach S:

$$\sigma = 4 S \rho \sin^2 \varepsilon \qquad /8/$$

gdzie: ρ - współczynnik odbicia fal radiowych. Współczynnik ten jest mniejszy od jedności;

$4 \rho \sin^2 \varepsilon = \sigma_0$ - efektywna powierzchnia odbicia elementu powierzchni ziemi przy rozproszonym odbiciu fal radiowych.

Podstawiając wyrażenie S ze wzoru /7/ do wyrażenia /8/ otrzymamy zależność dla wyliczenia efektywnej powierzchni odbicia wieloznacznego celu powierzchniowego:

$$\sigma = 2 \rho \; D \theta_\varphi \, c \tau \frac{\sin^2 \varepsilon}{\cos \varepsilon} \qquad /9/$$

Współczynnik odbicia ρ zależny jest od elektrycznych właściwości opromieniowanego odcinka powierzchni ziemi i zawsze jest mniejszy od jedności. Przy współczynniku ρ równym jedności, energia elektromagnetyczna musiałaby być odbita bez żadnych strat, co jest praktycznie niemożliwe.

Jak wynika ze wzoru /9/ zmniejszenie wielkości σ celów powierzchniowych można otrzymać drogą zmniejszenia szerokości kierunkowej charakterystyki promieniowania θ_φ i szerokości impulsu sondującego.

EFEKTYWNA POWIERZCHNIA ODBICIA WIELOZNACZNEGO CELU OBJETOSCIOWEGO

Dla celów wieloznacznych objętościowych efektywna powierzchnia odbicia może być wyliczona ze wzoru:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot n \qquad /10/$$

/patrz wyrażenie /6//. $\eta = 1$.

gdzie: n - ilość elementarnych odbijaczy w objętości odbijającej;

σ_0 - średnie znaczenie efektywnej powierzchni odbicia elementarnego odbijacza.

We wzorze /10/ współczynnik zapełnienia η przyjęty jest równy jedności, ponieważ rozmiary wieloznacznego celu objętościowego mogą kalkanaście razy przewyższać rozmiary objętości odbijającej, a sygnały odbite od wszystkich elementarnych odbijaczy znajdujących się w objętości odbijającej, będą jednocześnie działać na wejście odbiornika w okresie czasu trwania impulsu sondującego.

Przy określonej ilości elementarnych odbijaczy w jednej objętości odbijającej, wzór /10/ może być zapisany w innej formie:

$$\sigma = /D^2 \cdot \theta_\varphi \cdot \theta_\varepsilon \frac{c \cdot \tau}{2}/ \cdot N \cdot \sigma_o \qquad /11/$$

gdzie: θ_φ i θ_ε - odpowiednia szerokość charakterystyki kierunkowej anteny w płaszczyźnie poziomej i pionowej;

N - ilość elementarnych odbijaczy w jednostce objętości odbijającej.

Jeżeli objętość odbijająca zapełniona jest elementarnymi odbijaczami niecałkowicie, na przykład tylko w kącie wzniesienia, to:

$$\sigma = k\, /D^2 \cdot \theta_\varphi \cdot \theta_\varepsilon \cdot \frac{c \cdot \tau}{2}/ \cdot N \sigma_o \qquad /12/$$

gdzie: k - współczynnik uwzględniający stopień zapełnienia objętości odbijającej.

Charakterystyczne jest, że przy wykrywaniu celów wieloznacznych powierzchnia odbicia od obiektu wzrasta wraz ze wzrostem odległości D.

Powierzchniowe i objętościowe cele wieloznaczne, przy wykrywaniu obiektów pojedynczych, posiadają duże właściwości maskujące. Obserwowanie celu pojedynczego /np. samolotu/ na tle odbić od obiektów wieloznacznych, będzie zależne od stosunku efektywnej powierzchni odbicia celu pojedynczego do efektywnej powierzchni odbicia celu wieloznacznego.

Z wyrażenia /9/ i /10/ wynika, że w celu poprawienia jakości obserwacji celu pojedynczego na ekranie wskaźnika, należy zmniejszyć szerokość charakterystyki kierunkowej anteny i czas trwania impulsu sondującego.

Efektywna powierzchnia odbicia obiektów radiolokacyjnych nie jest jedynym parametrem wpływającym na wykrywanie i zasięg działania stacji radiolokacyjnej. Między innymi na wykrywanie i zasięg stacji radiolokacyjnej wpływają charakterystyki techniczne samej stacji, obiektów radiolokacyjnych, atmosfery, ziemi oraz innych czynników. W dalszych rozważaniach ograniczymy się jedynie do podstawowych parametrów technicznych wpływających na zasięg wykrywania obiektów powietrznych przez stacje radiolokacyjne.

PARAMETRY TECHNICZNE STACJI RADIOLOKACYJNYCH

Techniczne parametry każdej stacji radiolokacyjnej, do których należą: długość fali, moc impulsowa, częstotliwość powtarzania, szerokość impulsu, czułość odbiornika i t.p., określają zasadnicze dane taktyczne stacji, takie jak:

- zasięg i strefa wykrywania obiektów;
- sposoby i czas obserwacji strefy wykrywania;
- dokładność określania współrzędnych obiektów;
- rozróżnialność stacji;
- inne dane taktyczne.

Jak widzimy z powyższego, znając dane techniczne stacji radiolokacyjnej, zawsze można określić jej możliwości taktyczne.

MAKSYMALNY ZASIEG WYKRYCIA OBIEKTOW POWIETRZNYCH W SWOBODNEJ PRZESTRZENI

Maksymalny zasięg wykrywania obiektów przez stację radiolokacyjną nazywamy taką odległość celu od stacji, na kierunku maksymum promieniowania charakterystyki kierunkowej anteny, przy której wypromieniowany sygnał fal radiowych powraca po odbiciu i może być jeszcze widoczny na ekranie wskaźnika na tle szumów własnych odbiorników.

Maksymalny zasięg wykrywania dla dowolnej stacji radiolokacyjnej określa się szeregiem wielkości wchodzących do wyrażenia zasadniczego równania radiolokacji. Wzajemną zależność tych wielkości omówimy bez dowodów matematycznych dla swobodnej przestrzeni przy założeniu, że:

- atmosfera na drodze rozprzestrzeniaia się fali radiowej jest jednorodna;
- nie następuje tłumienie promieniowanej energii elektromagnetycznej w przestrzeni;
- nie następuje odbicie energii elektromagnetycznej od ziemi i innych przedmiotów;
- między stacją radiolokacyjną i wykrywanym celem nie ma przeszkód zasłaniających obiekt.

Przy powyższym założeniu zasadnicze równanie radiolokacji w ogólnej formie wyraża się wzorem:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_i \cdot G \cdot A \cdot \sigma}{(4\pi)^2 \cdot P_o}} \qquad /13/$$

Przy zastosowaniu stacji radiolokacyjnych do wykrywania obiektów powietrznych równanie /13/ posiada praktyczne znaczenie, kiedy wyraża ono maksymalną odległość, na której jeszcze można wykryć żądany obiekt.

Wprowadzając do wzoru /13/ odpowiednie wielkości dla maksymalnego zasięgu otrzymamy:

$$D_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_i \; G_{max} \; A_{max} \cdot \sigma}{(4\pi)^2 \; P_{o\,min}}} \qquad /14/$$

Maksymalne znaczenie zysku antenowego G_{max} anteny odbiorczej związane jest z jej efektywną powierzchnią promieniowania A_{max} następującą zależnością:

$$G_{max} = \frac{4\pi A_{max}}{\lambda^2} \qquad /15/$$

lub:

$$A_{max} = \frac{G_{max} \lambda^2}{4\pi} \qquad /16/$$

Podstawiając maksymalne znaczenie G_{max} i A_{max} do wzoru /14/ otrzymamy:

$$D_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_i \; A^2_{max} \cdot \sigma}{4\pi \lambda^2 \; P_{o\,min}}} \qquad /17/$$

lub:

$$D_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_i \, G^2_{max} \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \, P_{o\,min}}} \qquad /17a/$$

gdzie: D_{max} - maksymalna odległość wykrycia obiektu powietrznego wyrażona w metrach;

P_i - moc impulsowa w watach;

σ - efektywna powierzchnia odbicia celu w metrach kwadratowych;

λ - długość fali stacji radiolokacyjnej w metrach;

A - efektywna powierzchnia promieniowania anteny wyrażona w metrach kwadratowych.

$P_{o\,min}$ - czułość odbiornika w watach.

Z równań /14/ i /17/ wynika, że odległość wykrycia obiektów powietrznych przez stację radiolokacyjną jest tym większa im większa jest moc impulsowa stacji, im większy jest zysk antenowy, im większa efektywna powierzchnia promieniowania anteny RLS /wyrażana w metrach kwadratowych/ i im większa skuteczna powierzchnia odbicia wykrywanego celu. Zależna jest również od minimalnej mocy przychodzącej na wejście odbiornika $P_{o\,min}$, przy której sygnał odbity od celu będzie jeszcze wystarczająco duży /w stosunku do szumów własnych odbiornika/, aby otrzymać zobrazowanie na ekranie wskaźnika RLS. Należy podkreślić, że maksymalny zasięg wykrycia obiektu powietrznego proporcjonalny jest pierwiastkowi czwartego stopnia z wielkości parametrów wchodzących do wyrażenia podpierwiastkowego /równanie /14/.

Zwiększenie zasięgu wykrywania obiektów przez stację radiolokacyjną jest możliwe poprzez zwiększenie promieniowanej mocy i uzyskania dużej kierunkowości anteny. Zwiększając moc promieniowaną w impulsie podwójnie /przy niezmiennych pozostałych parametrach/ maksymalny zasięg zwiększy się o 1,19 razy, co stanowi 19 %. Chcąc zwiększyć zasięg wykrycia podwójnie, należałoby moc w impulsie zwiększyć 16-krotnie /pierwiastek czwartego stopnia z 16/.

Ze zwiększeniem efektywnej powierzchni odbicia celu zwiększa się również zasięg wykrycia stacji. Zależność ta także wyraża się pierwiastkiem czwartego stopnia.

Jeżeli na przykład cel grupowy będzie posiadał efektywną powierzchnię odbicia o 3-4 razy większą od celu pojedynczego, to odległość wykrycia zwiększy się nie o 3-4 razy, a jedynie o 30-40 %.

Między odległością wykrycia i zyskiem energetycznym anteny G_{max}, istnieje zależność kwadratowa. Zwiększając zysk antenowy czterokrotnie, zasięg stacji zwiększy się dwukrotnie, ponieważ G wchodzi pod pierwiastek w kwadracie /wzór 17a/.

Należy mieć na uwadze, że przy niezmiennej długości fali λ, zwiększenie zysku energetycznego anteny związane jest ze znacznym zwiększeniem jej rozmiarów, co nie zawsze jest możliwe i ekonomiczne.

Znaczenie efektywnej powierzchni promieniowania anteny A_{max}, związane jest z geometrycznymi rozmiarami powierzchni anteny S następującą zależnością:

$$A = k^S$$

gdzie: k - współczynnik zależny od konstrukcji anteny, uwzględniający nierównomierność rozkładu pola elektrycznego na powierzchni anteny. Współczynnik ten mieści się w granicach 0,3-0,8 zależnie od typu anteny.

Rozpatrzmy pokrótce wpływ długości fali radiowej na zasięg radiolokacyjny stacji. Porównując równania /17/ i 17a/ można wyciągnąć następujące wnioski:

- przede wszystkim oba te równania są równoważne w swej treści;
- w wypadku równania /17a/ zasięg stacji będzie się zwiększał przy zwiększeniu długości fali, przy niezmiennej wielkości G_{max}. Ażeby G_{max} pozostało niezmienne, ze zwiększeniem długości fali, należy zwiększyć rozmiary anteny, co jest nie zawsze wskazane i możliwe;
- w wypadku równania /17a/, jeżeli przyjąć, że skuteczna powierzchnia promieniowania anteny A_{max} jest stała, to przy zwiększeniu długości fali zasięg wykrywania zmniejszy się. Dlatego też zwiększenie długości fali przy stałych rozmiarach anteny powoduje zmniejszenie zysku energetycznego anteny G_{max}. Zmniejszenie to prowadzi z kolei do zmniejszenia gęstości strumienia mocy odbieranej po odbiciu od obiektu w punkcie odbioru.

Jak wynika z równania /17/ przy jednakowych rozmiarach anteny RLS, zwiększenie zasięgu wykrywania może być osiągnięte następującymi metodami:

- skróceniem długości fali radiowej;
- polepszeniem czułości odbiornika $P_{o\ min}$;
- zwiększeniem mocy impulsowej nadajnika P_i;
- zwiększeniem skutecznej powierzchni odbicia celów /co od konstruktorów stacji radiolokacyjnych nie jest zależne/.

Analizując zasadnicze równanie radiolokacji /14/ i /17/ widzimy, że maksymalny zasięg wykrywania jest odwrotnie proporcjonalny do czułości odbiornika $P_{o\ min}$. Ze zmniejszeniem $P_{o\ min}$ /przy niezmiennych pozostałych parametrach/, zasięg stacji radiolokacyjnej zwiększa się. Zmniejszenie $P_{o\ min}$ oznacza poprawienie czułości odbiornika. Przy braku zakłóceń celowych /stosowanych celowo/, $P_{o\ min}$ zależna jest od szumów własnych odbiornika oraz szumów naturalnych przychodzących z przestrzeni otaczającej stację radiolokacyjną. Z teoretycznych rozważań nad zależnością czułości odbiornika od szumów własnych wynika, że:

$$P_{o\ min} = mNkT\Delta f$$

lub

$$P_{o\ min} = \frac{2\ mNkT}{\tau} \qquad /18/$$

gdzie: $\Delta f = \frac{2}{\tau}$ - pasmo przepuszczania odbiornika w hercach;

$m = \frac{P_{o\ min}}{P_{sz}}$ - współczynnik widoczności zależny od typu wskaźnika i warunków obserwacji. Wybiera się go w granicach 1,5-10;

N - współczynnik wskazujący ile razy moc szu szumów anteny i odbiornika jest większa od mocy szumów przychodzących na wejście odbiornika.

k - stała Boltzmana równa $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/sto

T - absolutna temperatura w stopniach K^o;

τ - czas trwania impulsu sondującego.

Podstawiając do równania /14/ wartość $P_{o\ min}$ z wyrażenia /18/ otrzymamy następującą zależność dla maksymalnego zasięgu wykrywania:

$$D_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_i \cdot \tau \cdot G_{max} \cdot A_{max} \cdot \sigma}{(4\pi)^2\ 2\ NkTm}} \qquad /19/$$

gdzie: $P_i \cdot \tau$ - przedstawia sobą energię w impulsie.

Odległość wykrycia obiektów powietrznych przez stację radiolokacyjną proporcjonalna jest pierwiastkowi czwartego stopnia ze znaczenia średniej energii w impulsie.

Ponieważ $P_{śr} = \frac{P_i \cdot \tau}{T_i}$, to przy niezmiennym okresie powtarzania T_i maksymalną odległość wykrywania określa się średnią mocą promieniowania, to znaczy:

$$D_{max} \equiv \sqrt[4]{P_{śr}}$$

Im większa jest średnia moc promieniowania, tym większa jest odległość wykrycia obiektu, przy niezmiennych wartościach pozostałych parametrów wchodzących pod wyrażenie podpierwiastkowe.

Przykład stosowania wzoru /17a/

Określić odległość wykrycia obiektu powietrznego przy następujących danych:

$\sigma = 60\ m^2$

$P_{o\ min} = 8\ 10^{-12}$ Wata

$P_i = 1000$ kW

$\lambda = 10$ cm

$G = 5000$

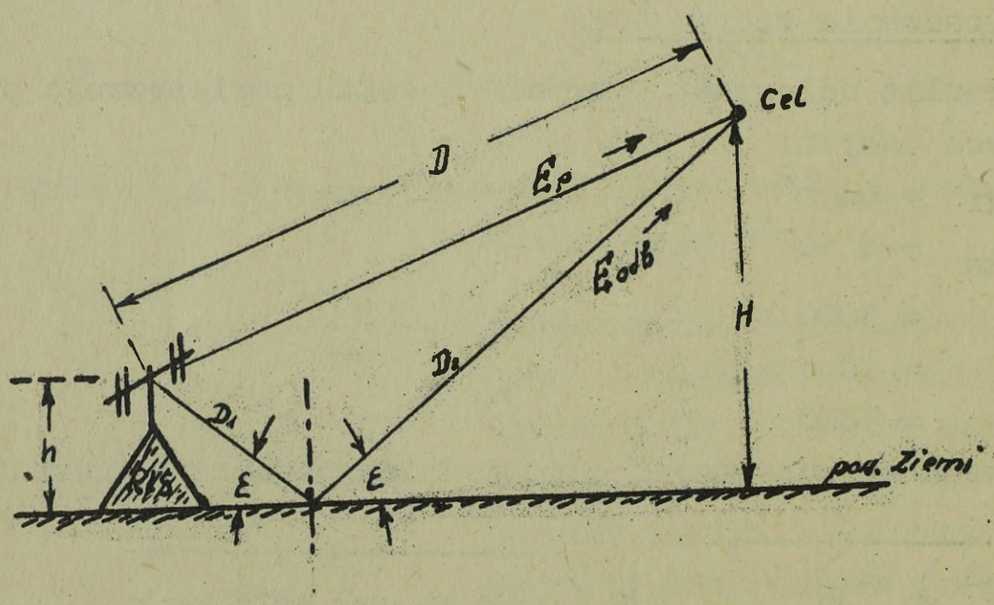
Stosujemy wzór z zachowaniem odpowiednich jednostek pomiarowych

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{o\ min}}} = \sqrt[4]{\frac{10^6 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 10^{-2} \cdot 60}{2 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-12}}} = 175\ km$$

WPŁYW ZIEMI NA ZASIĘG RADIOLOKACYJNY

W zasadniczym równaniu radiolokacji /14/ nie uwzględnialiśmy wpływu powierzchni ziemi na zasięg radiolokacyjny. Dlatego też równanie to jest słuszne przy założeniu, że nie bierze się pod uwagę wpływu odbicia fali radiowej od powierzchni ziemi. Założenie takie można przyjmować dla stacji radiolokacyjnych pracujących w zakresie fal centymetrowych i krótszych. Dla zakresu fal metrowych nie uwzględniając odbicia fali radiowej od ziemi popełniamy duży błąd.

Im szersza jest charakterystyka kierunkowego promieniowania anteny, tym więcej promieniowanej energii będzie padać na powierzchnię ziemi. Część energii zostanie odbita od ziemi w kierunku na obiekt, część rozproszona zostaje bezpowrotnie i część osiągnie obiekt drogą bezpośrednią. Fale radiowe dochodzić będą do obiektu dwoma drogami: bezpośrednio i po odbiciu od ziemi. Tymi samymi drogami będzie również odebrany przez RLS sygnał odbity od celu /patrz rys.6/



Rys.6

Natężenie pola elektrycznego przy celu /rys.6/ będzie sumą sygnału bezpośredniego i odbitego od ziemi, to jest:

$$e = e_p + e_{odb} = E_p \sin \omega t + E_{odb} \sin / \omega t - \varphi /.$$

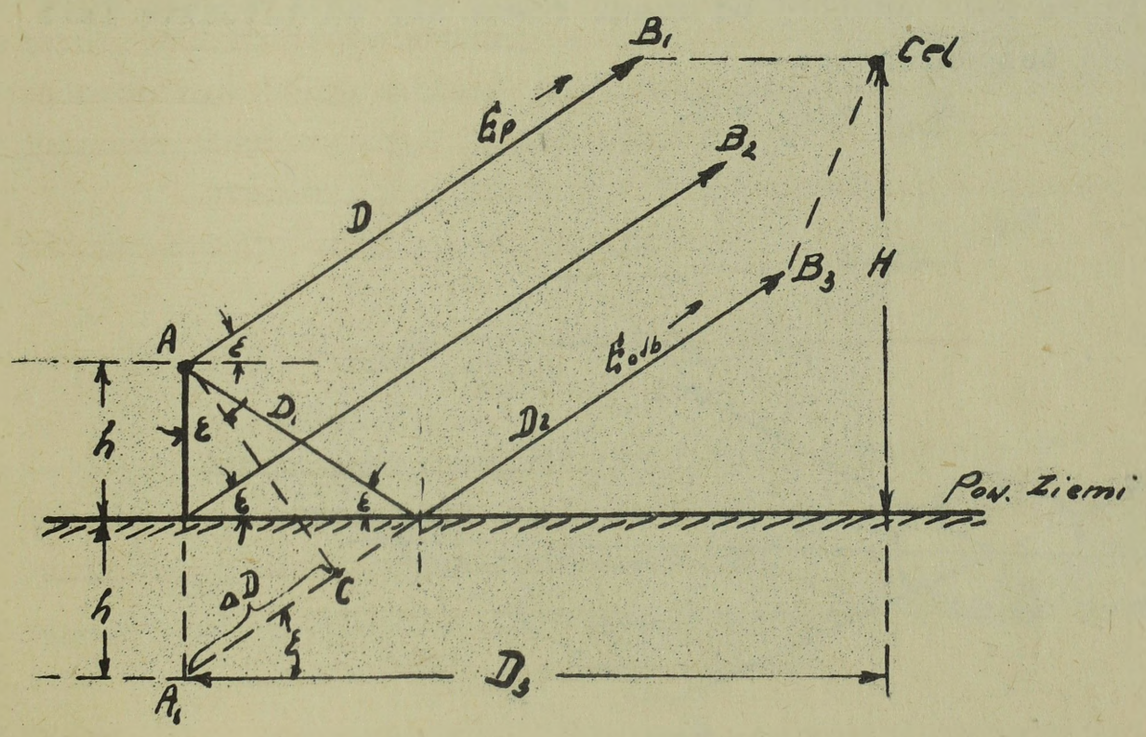
Natężenia pól elektrycznych strumienia bezpośredniego e_p i odbitego od ziemi e_{odb}, różnią się między sobą w amplitudzie i w fazie. Przesunięcie fazowe jest wynikiem różnicy dróg jaką przebył strumień energii odbitej od ziemi do obiektu. Przesunięcie to może być wyliczone z zależności:

$$\frac{360^\circ}{\varphi} = \frac{\lambda}{\Delta D} \quad \text{skąd} \quad \varphi = \frac{360^\circ \cdot \Delta D}{\lambda}$$

lub

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta D}{\lambda} \qquad /20/$$

gdzie: ΔD różnica dróg /patrz rys.7/.



Rys.7

Z rysunku 7 widzimy, że:

$$\Delta D = 2 h \sin \varepsilon$$

Podstawiając znaczenie ΔD do wyrażenia /20/ otrzymamy:

$$\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin \varepsilon \qquad /21/$$

wzor /21/ słuszny jest przy $H \gg h$ i $\Delta D \gg h$.

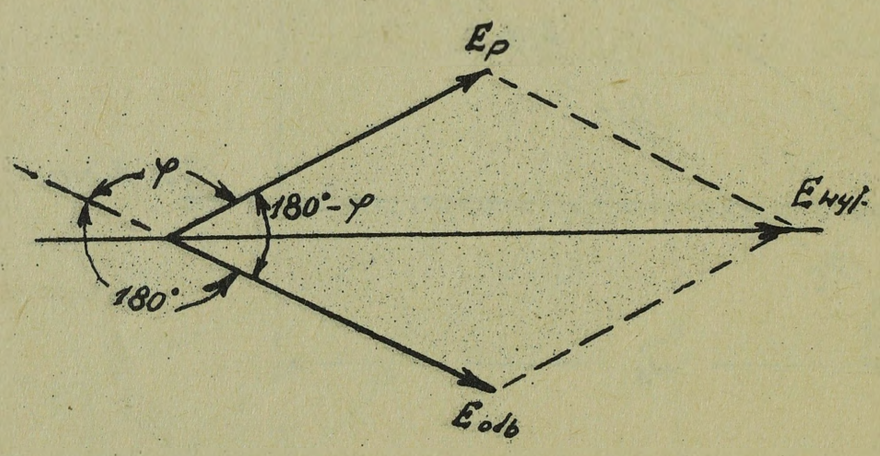
W celu scharakteryzowania właściwości odbijającej ziemi wprowadzamy pojęcie współczynnika odbicia ρ, wielkość którego określa się ze wzoru:

$$\rho = \frac{E_{odb}}{E_p}$$

Wartość współczynnika odbicia ziemi zależna jest od rodzaju polaryzacji fali elektromagnetycznej, parametrów elektrycznych gleby, długości fali radiowej i kąta padania fali na powierzchnię ziemi.

Można przyjąć, że powierzchnia ziemi, z punktu widzenia właściwości odbijających, posiada właściwości przewodnictwa z modułem współczynnika odbicia $/\rho/ = 1$. Oznacza to, że przy odbiciu fal radiowych od ziemi nie ma strat energii, a amplituda fali odbitej od ziemi równa się amplitudzie fali padającej bezpośrednio:

$$E_{odb} = E_p = E.$$



Rys.8

Poziomo spolaryzowana fala elektromagnetyczna przy odbiciu od ziemi zmienia swoją fazę o kąt 180°. Z wykresu wektorowego /rys.8/ lekko znajdujemy wypadkowe natężenia pola elektrycznego:

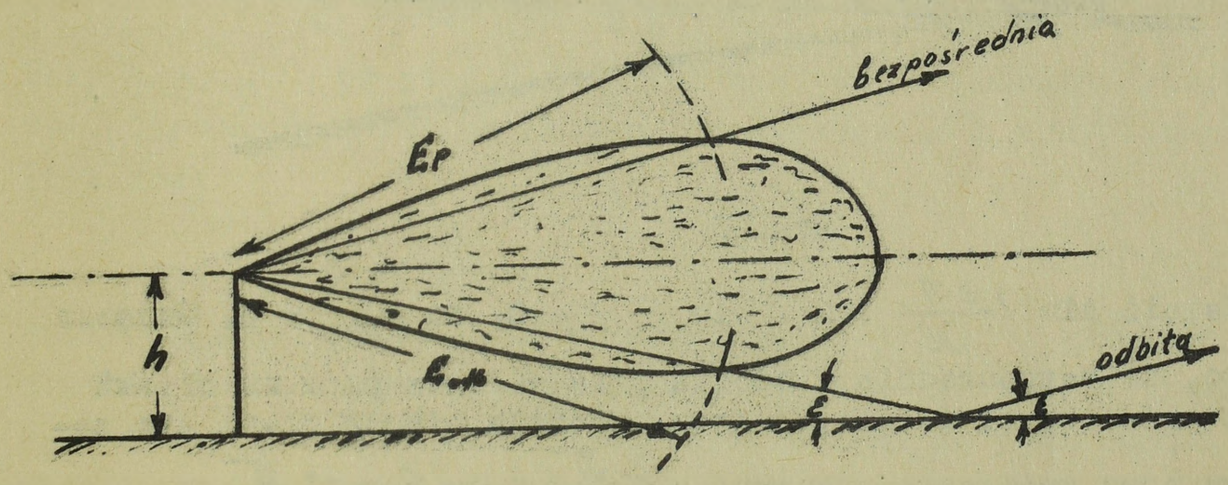
$$E_{wyp} = 2\,E \sin \frac{\varphi}{2}$$

gdzie: $\varphi = 4\pi \frac{h}{\lambda} \sin \varepsilon$

Po podstawieniu znaczenia φ pod funkcję sinusa otrzymamy dla wypadkowego natężenia pola elektrycznego następującą zależność

$$E_{wyp} = 2 \,.\, E \sin / 2\pi \frac{h}{\lambda} \sin \varepsilon / \qquad /22/$$

Wyrażenie /22/ słuszne jest w wypadku kiedy charakterystyka kierunkowa anteny w płaszczyźnie pionowej jest symetryczna w stosunku do osi maksymum promieniowania energii elektromagnetycznej/patrz rys.9/.



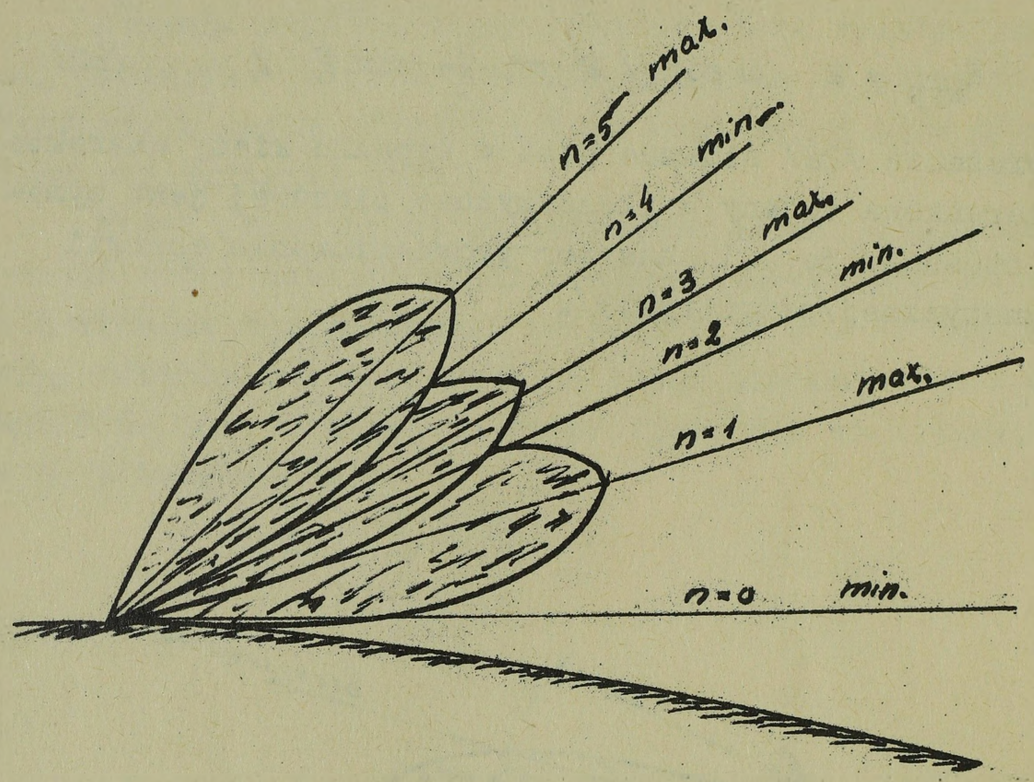
Rys.9

Jeżeli $\sin/2\pi \frac{h}{\lambda} \,.\, \sin \varepsilon / = 1$, to $E_{wyp} = 2\,E$, oznacza to, że fale radiowe bezpośrednie i odbite od ziemi dochodząc do obiektu w zgodnych fazach, sumują się i tworzą natężenie pola elektrycznego o wartości 2 E.Ponieważ funkcja sinusa jest równa jedności przy wartości argumentu $\frac{n\pi}{2}$

to znaczy:

$$\frac{2\pi}{\lambda} h \cdot \sin \varepsilon = n \cdot \frac{\pi}{2}, \text{ gdzie } n = 1,3,5,7,\ldots,$$

to na tych kierunkach będziemy posiadać maksymum listków promieniowania charakterystyki kierunkowej anteny w płaszczyźnie pionowej /patrz rys.10/



Rys.10

Jeżeli $\sin \left/ \frac{2\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \sin \varepsilon \right/ = 0$, to $E_{wyp} = 0$. Oznacza to, że bezpośrednia i odbita fala radiowa pada na obiekt z przeciwnymi fazami. Ponieważ funkcja sinusa równa się zeru przy znaczeniu argumentu: $\frac{2\pi}{\lambda} h \cdot \sin \varepsilon = n' \frac{\pi}{2}$ gdzie $n' = 0,2,4,6,\ldots$, to na tych kierunkach będziemy mieli minimum promieniowania energii elektromagnetycznej /patrz rys.10/. Można zapisać powyższe rozważania ogólnym wzorem:

$$\sin \varepsilon = n \frac{\lambda}{4\pi} \qquad /23/$$

gdzie n może przyjmować dowolne znaczenia liczb całkowitych, z tym, że dla liczb parzystych mamy minimum promieniowania, dla liczb nieparzystych maksymum listków promieniowania.

Na podstawie wzoru /23/ można również określić kierunki maksymum i minimum promieniowania kierunkowej charakterystyki anteny przy polaryzacji pionowej. Ponieważ przy odbiciu od ziemi pionowo spolaryzowanej fali radiowej nie ma zwrotu fazy o 180°, to w tym wypadku dla parzystych wartości n otrzymujemy kierunki maksymum promieniowania, a dla nieparzystych n minimum promieniowania.

Przy promieniowaniu fal radiowych przez dipol poziomy /fala spolaryzowana poziomo/ o nieparzystych znaczeniach n odległość wykrywania stacji radiolokacyjnych wzrasta podwójnie w stosunku do zasięgu dla swobodnej przestrzeni. Przy parzystych wartościach n zasięg działania stacji spada do zera. W związku z tym charakterystyka kierunkowa anteny posiada listkowy charakter /patrz rys.10/.

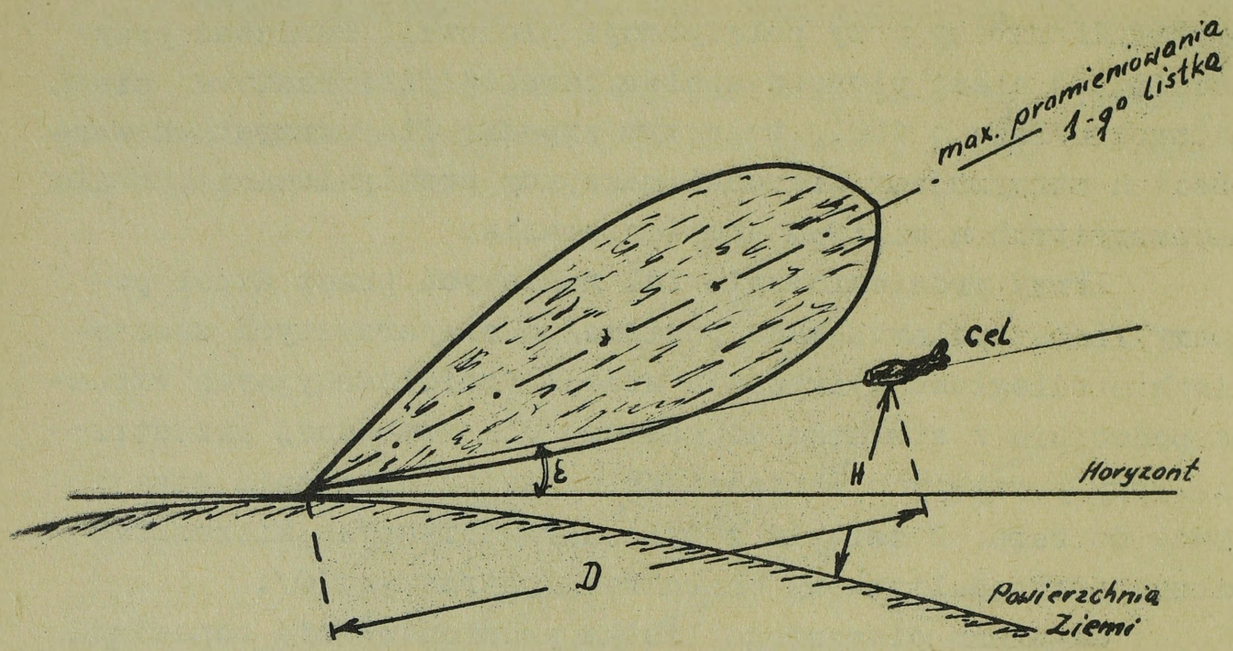
Minimum pierwszego listka promieniowania odpowiada kierunkowi, dla którego $\varepsilon = 0$. Pierwsze maksymum odpowiada kierunkowi, dla którego:

$$\varepsilon = \arcsin \frac{\lambda}{4h}$$

Przy $h \gg \lambda$, to jest dla małych wartości argumentu, kierunek pierwszego maksymum listka można określić z przybliżonego wzoru:

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{4h} \qquad /24/$$

Analizując zależność /24/ widzimy, że zwiększając wysokość zawieszenia anteny pierwszy listek charakterystyki, w płaszczyźnie pionowej, będzie bardziej nachylony do powierzchni ziemi, dzięki czemu zasięg wykrywania niskolecących obiektów wzrośnie. Wynika z tego, że dla lepszego wykrywania obiektów niskolecących, należy antenę stacji radiolokacyjnej zawieszać na większych wysokościach. Niskolecące cele są to te obiekty powietrzne, które przelatują na wysokościach niższych od maksymum pierwszego listka promieniowania /patrz rys.11/.



Rys.11

Równanie dla maksymalnego zasięgu D_{max} /wzór 17 a/ pozwala określić maksymalną odległość dla swobodnej przestrzeni na kierunku maksymum promieniowania energii elektromagnetycznej. Dla innych kierunków w płaszczyźnie pionowej zysk energetyczny anteny wyraża się wzorem:

$$G = G_{max}\, k^2 / \varepsilon /$$

gdzie: $k / \varepsilon / = \frac{E}{E_{max}}$ - jest to stosunek natężenia pola elektrycznego pod kątem wzniesienia ε do natężenia pola elektrycznego na kierunku maksymum promieniowania.

Uwzględniając powyższe otrzymamy równanie zasięgu dla kierunku pod kątem wzniesienia ε wyrażenie:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_i \cdot \sigma \cdot G^2_{max}\, k^4 / \varepsilon /}{/4\pi/^3\, P_{o\,min}}} = D_{max}\, k / \varepsilon / \qquad /25/$$

Rozpatrując wpływ ziemi na kształt kierunkowej charakterystyki promieniowania z wykresu wektorowego /rys.8/ otrzymaliśmy wzór /22/:

$$E_{wyp} = 2\,E \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \sin\varepsilon\right), \quad E = E_{max}\, k\,(\varepsilon).$$

Ażeby wykreślić wypadkową charakterystykę kierunkową anteny, z uwzględnieniem wpływu ziemi, należy $k\,(\varepsilon)$, dla każdego znaczenia ε, pomnożyć przez wielkość:

$$2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\, h \cdot \sin\varepsilon\right)$$

W tym wypadku dla zysku energetycznego anteny otrzymamy zależność:

$$G = G_{max}\left[k\,(\varepsilon) \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \sin\varepsilon\right)\right]^2$$

Podstawiając znaczenie G do wzoru na zasięg radiolokacyjny /wzór 17a/ otrzymamy wyrażenie zasięgu D dla dowolnego kierunku:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_i\, G^2_{max} \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3\, P_{o\,min}}} \cdot k\,(\varepsilon)\; 2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\, h \cdot \sin\varepsilon\right) =$$

$$= D_{max}\; 2\, k\,(\varepsilon) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \sin\varepsilon\right) \qquad /26/$$

Z wyprowadzonego wzoru /26/ wynika, że odległość wykrycia, dla określonych kątów wzniesienia, przy odbiciu od powierzchni ziemi, zwiększa się, podczas gdy dla niektórych kątów wzniesienia zmniejsza się.

Dla małych kątów wzniesienia można przyjąć, że:

$$2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \sin\varepsilon\right) = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \sin\varepsilon$$

oraz $\sin\varepsilon = \frac{H}{D}$. Podstawiając powyższe do wzoru /26/ otrzymamy:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_i\, G^2_{max} \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3\, P_{o\,min}}} \cdot k\,(\varepsilon)\, \frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \frac{H}{D},$$

po przekształceniu otrzymujemy końcowe wyrażenie zasięgu dla celów niskolecących, znajdujących się pod dowolnym

kątem wzniesienia z uwzględnieniem wpływu ziemi:

$$D_{\varepsilon} = \sqrt{h H k / \varepsilon /} \cdot \sqrt[8]{\frac{4 \pi P_i G^2_{max} \cdot \sigma}{P_{o\,min} \cdot \lambda^2}} \qquad /27/$$

gdzie: D_{ε} - odległość wykrycia celu dla dowolnych kątów wzniesienia;

h - wysokość zawieszenia anteny RLS;

H - wysokość lotu obiektu powietrznego.

WPŁYW WARUNKOW ATMOSFERYCZNYCH NA ZASIEG RADIOLOKACYJNY

Przy analizie zasięgu radiolokacyjnego nie braliśmy pod uwagę tłumienia energii elektromagnetycznej w atmosferze. W rzeczywistości fale radiowe zakresów poniżej 30 cm są stosunkowo silnie tłumione pod wpływem istnienia w atmosferze pary wodnej, jonów tlenu, azotu, wodoru i innych cząstek.

Atmosfera nasycona parą wodną, dla fal radiowych, staje się dialektrykiem, w której następują duże straty cieplne energii i to tym większe im krótsza jest fala radiowa. Prócz tego na skutek odbicia energii elektromagnetycznej od cząstek znajdujących się w atmosferze zmniejsza się gęstość strumienia energii promieniowanej na obiekty radiolokacyjne. Wszystkie te czynniki wpływają na to, że faktyczny zasięg wykrywania stacji radiolokacyjnych jest mniejszy aniżeli to wynika ze wzorów omawianych powyżej.

Maksymalny zasięg wykrycia obiektów powietrznych z uwzględnieniem tłumienia fal radiowych przez atmosferę można określić ze wzoru:

$$D_{max} = D_{o\,max} e^{-0,015 \alpha D_{o\,max}} \qquad /28/$$

gdzie: $D_{o\,max}$ - maksymalny zasięg wykrycia dla swobodnej przestrzeni;

α - współczynnik tłumienia fal radiowych w atmosferze.

Należy zwrócić uwagę na to, że omawiane czynniki atmosferyczne, wpływające na zasięg radiolokacyjny, są zmienne w czasie i przestrzeni, co stwarza trudności dokładnego określenia maksymalnego zasięgu. Prowadzi to do tego, że przyjmuje się optymalne warunki zachodzące w atmosferze i na podstawie danych statystycznych i teorii prawdopodobieństwa opracowuje się dokładne zależności jednych parametrów od drugich.

Wykonano 30 egz.
Egz.nr 1-30 bibl.jawna
wyk. kpt.Siwicki
druk.BI.dn.27.06.1967 r.
nr ks.masz.1832/WW
O-XV-3333
Kor.H.S.