

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

12 (163)

1977

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 17

WARSZAWA 1977

NR 12/163/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędzierski
Z-ca Redaktora Naczelnego - dr inż. Krystyn Pławko

Redaktorzy działów:

mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: J. Borłowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 580. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 6.07.1977 r.
Druk ukończono we wrześniu 1977 r.

Arnold Kawecki

POCHŁANIANIE I ROZPRASZANIE MIKROFAL PRZEZ OPADY ATMOSFERYCZNE

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	1
2. Charakterystyka chmur i opadów	2
2.1. Opis ogólny	2
2.2. Rozpraszanie i tłumienie fal elektromagnetycznych przez elementy opadu	3
3. Oddziaływanie chmur i opadów na linie radiowe	6
3.1. Tłumienie fal w liniach radiowych	6
3.2. Zakłócanie linii radiowych	7
4. Problematyka badawcza i wykorzystanie metod radiolokacji	12
Wykaz literatury	14

POCHŁANIANIE I ROZPRASZANIE MIKROFAL PRZEZ OPADY ATMOSFERYCZNE

1. WSTĘP

Rozwój sieci linii radiowych, podyktowany wymaganiami gospodarki narodowej, zmusza już obecnie do wykorzystania fal krótszych od $\lambda \approx 5 \text{ cm}$ / $f \geq 6 \text{ GHz}$ / do budowy zarówno linii naziemnych, jak i satelitarnych. Jednak ze wzrostem częstotliwości fal coraz większego znaczenia nabierają efekty zakłócającej propagację, spowodowane przez opady atmosferyczne /deszcz, śnieg/, a nawet przez chmury. Opad pochłania i rozprasza falę, która go penetruje, co prowadzi do tłumienia fali i do zakłócania pracy innych linii radiowych, odbierających rozproszoną energię fali /rys. 1/^{x/}. Stale rosnące wymagania na niezawodność pracy linii /dopuszczalna przerwa w pracy linii kilka - kilkadziesiąt minut na rok/ zmuszają do oceny czasu występowania opadów na trasie linii radiowej i do oszacowania efektów tłumienia oraz rozpraszania fali przez nie spowodowanych. Wzrasta też stale liczba urządzeń pracujących w zakresach fal centymetrowych, przy czym wiele z nich jest wyposażone w nadajniki o mocy znacznie przewyższającej moc nadajników linii radiowych. I tak naziemne stacje satelitarne mają moce rzędu setek watów lub kilowatów, radary samolotowe - moce szczytowe rzędu $10^3 + 10^4$ watów, zaś radary naziemne - moce szczytowe rzędu $10^5 + 10^7$ watów. Radiolokatory mogą więc zakłócać linie radiowe nawet promieniowaniem poprzez listki boczne charakterystyk anten i ze znacznych odległości.

Efekty tłumienia fal radiowych w opadach o różnych natężeniach zostały obliczone już dawno /lata 1944-47/ i potwierdzone przez liczne pomiary. Wykresy zależności współczynnika tłumienia fali α_t /w dB/km/ od natężenia opadów przy różnych długościach fal przedstawia rys. 2 [14]. Współczynnik ten odpowiada pewnemu opadowi o uśrednionej charakterystyce, bowiem w rzeczywistości temu samemu natężeniu opadu i odpowiadają różne wartości α_t ze względu na różnorodność struktury opadów. Z rys. 2 widać, że jeśli wzdłuż odcinka linii radiowej o długości $L = 20 \text{ km}$ występuje opad ciągły o natężeniu 5 mm/godz. oraz jeśli $\lambda = 3 \text{ cm}$, to tłumienie $A = \alpha_t \cdot L = 2 \text{ dB}$, natomiast jeśli $\lambda = 1 \text{ cm}$, to $A = 20 \text{ dB}$. W przypadku chmur burzowych, z których opad w centrum kolumny może mieć natężenie I_m dochodzące /w klimacie Polski/ do 300 mm/godz. , tłumienie fali

^{x/} Rysunki są zamieszczone na końcu artykułu

o długości $\lambda = 1 \text{ cm}$ /30 GHz/ może dochodzić do 50 ÷ 60 dB na odcinku o długości kilku km.

Wzajemne zakłócanie się linii radiowych za pośrednictwem opadu powstaje w sytuacji, gdy opad występuje na skrzyżowaniu tras linii /rys. 3/. Zakłócenie jest również możliwe przy promieniowaniu poprzez listki boczne anteny odbiorczej, jeśli są one skierowane na opad oświetlony przez inną antenę. W przeniesieniu energii fali z anteny nadawczej jednej linii do anteny odbiorczej drugiej linii udział biorą elementy opadu znajdujące się w obszarze "0", wspólnym dla promieniowania obydwu głównych wiązek antenowych promieniowań poprzez listki boczne lub poprzez promieniowania wiązki głównej i listków bocznych. Wyniki obliczeń poziomu mocy zakłóceń przenoszonych przez opady o różnych natężeniach i przy różnych długościach fal zostaną przedstawione w p. 3.2.

Opady prowadzą również do zakłóceń linii radiowych na falach wzajemnie prostopadle spolaryzowanych. Elementy opadu mają kształt odbiegający od sferycznego i w związku z tym rozpraszają, oprócz fali o polaryzacji równoległej do polaryzacji fali padającej, również falę o polaryzacji prostopadłej. Zagadnienia deformacji kropeł opadu, orientacji zdeformowanych kropeł w przestrzeni i efektów depolaryzacyjnych są obecnie przedmiotem badań.

2. CHARAKTERYSTYKA CHMUR I OPADÓW

2.1. Opis ogólny

Istnieje obszerna klasyfikacja chmur, która jest przydatna do ich wizualnego rozpoznawania przez obserwatora ziemskiego. Z punktu widzenia problematyki zakłócanie linii radiowych bardziej celowe jest scharakteryzowanie chmur przez ich rozmiary geometryczne, "czas życia", obejmujący ich cykl rozwojowy i przez związane z nimi zjawiska opadowe. Wszystkie te cechy zależą od pór roku. Szczególna uwaga zostanie zwrócona na letnią porę roku, która sprzyja rozwojowi chmur i powstawaniu zakłóceń w pracy linii radiowych.

Najogólniej i w uproszczeniu można wyróżnić chmury konwekcyjne, powstające w wyniku lokalnego przemieszczania się masy powietrza ciepłego ku górze i chłodnego ku dołowi, oraz chmury warstwowe, tworzące się w wyniku powolnego wznoszenia się masy ciepłego powietrza na wielkim obszarze. Do chmur konwekcyjnych zalicza się chmury /Cu/ /chmury bezopadowe pięknej pogody/, kumulonimbusy /Cb/ /chmury z opadem ulewnym/ i chmury burzowe /Cb_R/ /kumulonimbusy rozwinięte do fazy burzowej/. Rozmiary tych chmur mieszczą się w sześciokąt 10x10x10 km, zaś czas ich życia jest równy średnio 30 min /rys. 4/. Zdjęcie na rys. 4 przedstawia cykl rozwojowy chmury burzowej Cb /dwóch chmur/. W górniej części chmury sięgającej wysokości 10 km, gdzie temperatury dochodzą do -30°C, elementy chmury występują w postaci

kryształków lodu i kawałków lodu, natomiast w dolnej - w postaci deszczu i ewentualnie gradu, jeśli opadające kawałki lodu nie zdążyły się stopić. Spośród chmur warstwowych należy wyróżnić chmury niskie stratus /St/, średnie /As, Ac/, tworzące warstwę chmur na wysokości 3 ÷ 4 km, i wysokie /Ci/, tworzące warstwę chmur na wysokości 7 ÷ 9 km, oraz chmury deszczowe /Ns/ z opadem ciągłym, których grubość /wysokość / sięga nieraz do 6 ÷ 8 km.

Natężenia opadów ciągłych rzadko przekraczają poziom 5 mm/godz. Chmury warstwowe mają grubość od setek metrów do kilku km i rozciągają się na setki i tysiące km. Czas ich życia jest rzędu godzin i dziesiątków godzin. Pionowy przekrój chmury deszczowej /Ns/, uzyskany metodą radiolokacyjną, przedstawia zdjęcie na rys. 5 [3]. Przekrój uwidacznia pasma śniegu w górnej warstwie chmury sięgającej wysokości 18000 stóp /6 km/ oraz warstwę topniejącego śniegu na wysokości 8000 stóp /2,5 km/ w okolicy izotermy 0°C i pod nią warstwę deszczu w temperaturach dodatnich. Często występują chmury różnych typów jednocześnie, np. Ns + Cb.

Na zakończenie tego krótkiego opisu warto dodać, że opad powstaje wtedy, gdy elementy chmury wzrosną do takich rozmiarów, że nie są w stanie utrzymać się w prądzie wznoszącego się powietrza i zaczynają opadać pod wpływem grawitacji lub gdy znajdują się poza obszarem wznoszenia. Krople chmury, które nie opadają mają średnicę zazwyczaj mniejszą od 0,1 mm.

Na zdjęciu /rys. 6/ jest przedstawione zobrazowanie radarowe chmur Cb /z opadami ulewnymi i z burzami/, z którego można odczytać odległości między kolumnami opadowymi. Średnice kolumn opadowych w Polsce zawierają się w granicach od 1 do 10 km /rys. 10/.

2.2. Rozpraszanie i tłumienie fal elektromagnetycznych przez elementy opadu

Wysokość słupa wody h , który tworzy się podczas trwania opadu o natężeniu I w czasie t , określa wzór

$$h/t = \int_0^t I/t/dt$$

Przebieg h/t mierzą i rejestrują przyrządy meteorologiczne przeznaczone do pomiaru opadów. Nas interesuje jednak natężenie opadu, a ściślej jego rozkład w przestrzeni i w czasie, gdyż wielkość ta wiąże się z istotnym dla nas oddziaływaniem na fale elektromagnetyczne. Natężenie I opadu w postaci deszczu zależy od liczby kropeł w jednostce objętości /tzw. koncentracji/ i od średnic kropeł, a także od prędkości ich opadania. Typowe rozkłady średnic D przedstawia rys.7.

W związku z tym, temu samemu natężeniu I mogą odpowiadać różne koncentracje i różne rozkłady średnic w opadzie, co w efekcie prowadzi do tego, że przy tym

samym natężeniu opadu zarówno efekty tłumienia jak i rozpraszania mogą się w pewnych granicach różnić od przypadku do przypadku.

Powierzchnię skuteczną σ prostopadłego odbicia fali od sferycznego elementu opadu o średnicy D określa wzór Rayleigha ważny, gdy $D \ll \lambda$

$$\sigma_R = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2, \quad [\text{cm}^2] \quad /1/$$

gdzie ϵ - stała dielektryczna.

Z kolei powierzchnię skuteczną η jednostki objętości wypełnionej elementami opadu w liczbie N przedstawia wzór

$$\eta = \sum_{i=1}^N \sigma_{Ri} = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \sum_{i=1}^N D_i^6, \quad \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \right] \quad /2/$$

ważny przy założeniu, że odległości pomiędzy kroplami są większe od λ i wielokrotne odbicia fali są pominięte.

Zakłada się przy tym, że krople rozpraszają energię izotropowo, można więc przyjąć, że η charakteryzuje energię fali odbitą w dowolnym kierunku.

Zależność między natężeniem opadu I i powierzchnią skuteczną η tego opadu dla różnych długości fal przedstawia rys. 8 [14]. Znajomość tego związku pozwala określać natężenie opadu na podstawie pomiaru η , na przykład metodą radiolokacyjną, albo określić η na podstawie znajomości I , na przykład dla oceny efektu rozpraszania fali. Związki te mają oczywiście charakter korelacyjny ze względu na wspomnianą przypadkowość rozkładu średnic kropeł.

Tłumienie fali w opadzie wynika z rozpraszania i pochłaniania energii fali przez krople. Całkowita powierzchnia skuteczna tłumienia kropli

$$\sigma_t = \sigma_p + \sigma_r$$

gdzie: σ_p i σ_r - odpowiednie powierzchnie skuteczne wynikające z pochłaniania i rozpraszania, przy czym $\sigma_r = 2/3 \sigma_R$, zaś

$$\sigma_p = \frac{8\pi D^3}{\lambda} I_m \left/ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right/ , \quad [\text{cm}^2] \quad /3/$$

gdzie m - zespolony współczynnik załamania fali.

Współczynnik tłumienia fali

$$\alpha_t = 10 \log \frac{P_{\text{str}}}{P_{\text{wej}}} = 4,343 \cdot 10^5 \sum N_i \sigma_{ti}, \quad [\text{dB/km}] \quad /4/$$

gdzie:

P_{str} - moc strat na odcinku trasy z opadem,

P_{wej} - moc na wejściu tego odcinka,

N_i - liczba kropli o powierzchni skutecznej σ_{ti} w 1 cm^3 objętości.

Jeśli N_i określa się w 1 m^3 , to

$$\alpha_t = 0,4343 \sum N_i \sigma_{ti}.$$

Warto zaznaczyć, że powierzchnia skuteczna rozpraszania kropli σ_r ściśle zależy od średnicy kropli i długości fali $\sigma_r \sim D^6 / \lambda^4$, podczas gdy powierzchnia skuteczna tłumienia jest znacznie słabiej uzależniona od tych wielkości [3].

Zależność α_t od natężenia opadu I w mm/godz, przy założeniu typowego rozkładu średnic kropli, określa znany wzór

$$\alpha_t = aI^b, \quad [\text{dB/km}] \quad /5/$$

gdzie a , b - współczynniki uzależnione od długości fali λ w mniejszym stopniu od temperatury.

Zależność ta uzyskana analitycznie została potwierdzona przez pomiary. Wykresy na rys. 2 przedstawiają ten związek dla różnych długości fal. Tłumienia fal w suchym śniegu są znacznie mniejsze niż w deszczu, w mokym zaś śniegu tłumienia mają wartości zbliżone lub większe, z tym że natężenia opadów śniegowych na ogół nie przekraczają wartości kilku mm/godz.

Na zakończenie warto stwierdzić, że opady ciągłe mają natężenie z grubsza równomiernie rozłożone na znacznym obszarze, podczas gdy opady przelotne charakteryzują się znacznie zmieniającym się rozkładem natężenia w płaszczyźnie poziomej. Przyjmuje się, że w poziomym przekroju kolumny opadu, który można uznać za kołowy, natężenie spada wykładniczo od wartości I_m w centrum do $I_g = 1 \text{ mm/godz}$. na skraju przekroju według wzoru

$$I = I_m \exp \{-\beta r\}, \text{ przy czym } 0 \leq r \leq r_g \quad \text{ i } \quad r_g = \log I_m / \beta$$

gdzie r - odległość od środka kolumny, zaś β - współczynnik, lub według funkcji Gaussa,

$$I = I_m \exp \{-\beta^2 r^2\}$$

jak to przedstawia rys. 9 [2,13]. Wiadomo przy tym, że zdarzają się w Polsce przypadki, gdy wartość I_m przekracza 300 mm/godz . [10]. Ponadto z pomiarów rada-

rowych uzyskano histogramy dla średnic kolumn opadowych /rys. 10/ oraz dla czasów życia /rys. 11/, a także w kilku przypadkach określono liczebność chmur C_b na obszarze 30.000 km², w zależności od czasu w godzinach dziennych, latem /rys. 12/ [8].

W przypadku gdy natężenie opadu I/r zmienia się wzdłuż trasy fali, obliczenie tłumienia fali na tej trasie wymaga uwzględnienia zmiany współczynnika tłumienia wzdłuż trasy. Przypadek taki będzie przedyskutowany w następnym rozdziale [9].

3. ODDZIAŁYWANIE CHMUR I OPADÓW NA LINIE RADIOWE

Najogólniej można stwierdzić, że oddziaływanie zjawiska opadu atmosferycznego na linie radiowe ma charakter przypadkowy tak w czasie, jak i w przestrzeni, a także pod względem natężenia oddziaływania. Opady ciągłe mogą tłumić falę i powodować zakłócenia przez szereg godzin bez przerwy, ale nie tak skutecznie jak opady przelotne, charakteryzujące się wysokimi, lecz krótkotrwałymi natężeniami. Można stwierdzić, że latem czas trwania opadów przelotnych stanowi około 40% czasu trwania wszystkich opadów występujących nad punktem pomiaru. Blisko 60% czasu zajmują opady ciągłe. Jesienią i wiosną opady ciągłe wypełniają około 80% czasu trwania opadów [10].

Zmienność zjawisk wynika również z przemieszczania się stref opadowych wraz z wielkoskalowym ruchem mas powietrza. Średnia prędkość tego ruchu w Polsce jest równa około 30 km/godz.

Należy zwrócić uwagę na efekt tłumienia fal przez opady występujące na trasie fali oraz na rozpraszanie fali, które prowadzą do zakłóceń linii radiowych naziemnych i satelitarnych.

3.1. Tłumienie fali w liniach radiowych

Jeśli fala płaska o gęstości mocy P'_{we} penetruje opad, to jej gęstość P'_{wy} po przejściu strefy opadu określa wzór

$$P'_{wy}/x/ = P'_{we} \cdot 10^{-0,1 \int_0^x \alpha_t /x/ dx} \quad /6/$$

gdzie $\alpha_t /x/$ - przebieg współczynnika tłumienia wzdłuż trasy.

Korzystając ze wzoru /5/ można określić tłumienie wzdłuż trasy objętej przez opad o dowolnym rozkładzie natężenia, postępując się wyrażeniem

$$A/x/ = 10 \log \frac{P'_{wy}}{P'_{we}} = -0,1 \int_0^x a I^b /x/dx, \quad [dB] \quad //$$

Przebieg tłumienia $A/x/$ wzdłuż trasy pokrytej przez wyjątkowo silne opady ciągłe przedstawia rys. 13, na którym opady ciągłe imitują modele dla natężeń 5 mm/godz. i 10 mm/godz. Z kolei na rys. 14 został pokazany przebieg tłumienia fali w silnym opadzie przelotnym, imitowanym przez uproszczone modele rozkładu natężenia w kolumnie opadu. Przyjęto, że średnica kolumny opadu $x_d = 5$ km, zaś rdzeń kolumny, w którym natężenie jest stałe i równe 50 mm/godz. lub 100 mm/godz., ma średnicę $x_d = 2$ km. Poza rdzeniem natężenia opadów są równe odpowiednio 5 mm/godz. i 10 mm/godz.

W przypadku linii satelitarnych i opadów ciągłych fala penetruje warstwę deszczu, cienką warstwę /ok. 0,5 km/ mokrego śniegu i warstwę suchego śniegu /w której występuje też niewielka ilość przechłodzonej wody/. W związku z tym uwarstwieniem obliczanie tłumienia jest bardziej skomplikowane, gdyż zachodzi tu konieczność uwzględnienia zmiany stałej dielektrycznej ϵ /lub zespolonego współczynnika refrakcji m , patrz wzór 3/. Ponadto, należy uwzględnić w obliczeniach zmianę współczynnika tłumienia α_t w zależności od temperatury ośrodka propagacji, która ulega obniżeniu wraz ze wzrostem wysokości [14].

Jeśli chodzi o chmury burzowe, to wobec silnych prądów pionowych powietrza w chmurze występuje znaczne przemieszanie elementów opadu w różnych postaciach. W górnej części /ponad izotermą $0^{\circ}C$ / występują kawałki lodu o rozmiarach centymetrowych i kryształki śniegu, jak również krople przechłodzonej wody, natomiast pod izotermą $0^{\circ}C$ zdarzają się oprócz kropli deszczu mokre gradziny. W tej sytuacji ocena tłumienia fali przy założeniu jednorodności opadu może być obciążona znacznym błędem, szczególnie przy ocenie tłumienia w górnych warstwach chmury [9]. Lepiej są znane charakterystyki rozpraszania chmur burzowych zbadane metodą radiolokacyjną. Będą one przedstawione w następnym podrozdziale.

3.2. Zakłócanie linii radiowych

Na możliwości zakłócania pracy linii radiowych przez opady atmosferyczne zwrócono uwagę już w latach pięćdziesiątych. Spośród publikacji, które ukazały się w ostatnich latach należy wyróżnić pracę [5] szczegółowo omawiającą to zagadnienie oraz pracę [4], w której zastosowano pewne uproszczenia. W przejrzystej formie zagadnienie to można przedstawić jak niżej.

Weźmy pod uwagę krzyżujące się w jednej płaszczyźnie promieniowania dwu linii radiowych /rys. 3/, które pracują na tej samej częstotliwości. Energia fali z nadajnika o mocy P_{1T} z linii 1 rozprasza się na elementach opadu i trafia do od-

biornika linii 2. Jej moc P_{1r2} , na wejściu anteny odbiorczej linii 2, może być określona, jeśli znane są parametry techniczne anten, objętość V przestrzeni wspólnej dla obydwu wiązek fal i rodzaj oraz natężenie opadu w tej przestrzeni.

Przyjmijmy na razie, że w obszarze "0" znajduje się kropka sferyczna o średnicy D i powierzchni skutecznej rozpraszania σ_r . Wtedy moc fali odebranej przez antenę linii 2 /zakłada się izotropowość rozpraszania/ wyraża wzór

$$P_{1r2} = \frac{P_{1T} G_1}{4\pi R_1^2} \cdot \frac{\sigma_r}{4\pi R_2^2} A_2 \quad /8/$$

gdzie

$P_{1T} G_1 / 4\pi R_1^2$ - gęstość mocy fali padającej na kropkę,

$P_{1T} G_1 \sigma_r / (4\pi)^2 R_1^2 R_2^2$ - gęstość mocy fali padającej na antenę odbiorczą o powierzchni skutecznej A_2 .

Jeśli zamiast $\sigma_r = 2/3 \sigma_R$ podstawić $2/3 \eta V$, to moc zakłóceń odebrana od wszystkich kropek w obszarze "0", jeśli opad jest jednorodny, będzie równa

$$P_{1r2} = \frac{2P_{1T} G_1 A_2}{3/4\pi^2 R_1^2 R_2^2} \eta V \quad /9/$$

Ponieważ $A = G \lambda^2 / 4\pi$, więc

$$P_{1r2} = \frac{2P_{1T} G_1 G_2 \lambda^2}{3/4\pi^3 R_1^2 R_2^2} \eta V. \quad /10/$$

Objętość V obszaru "0" można określić zakładając, że osie symetrii charakterystyk promieniowania anten przecinają się w punkcie 0, że natężenie promieniowania anten ma wartość stałą w przedziałach kątów θ_1 i θ_2 , a poza nimi ma wartość zerową, oraz że charakterystyki promieniowania anten są symetryczne względem osi.

Założmy, że szerokości wiązek θ_1 , θ_2 i odległości R_1 , R_2 spełniają następujące warunki:

$$R_1 \ll R_2, \quad \theta < 3^\circ, \quad R_1 + R_2 < 30 \text{ km}$$

wtedy, rozmiary obszaru "0" nie przekraczają 2 km, co mniej więcej zapewnia jednorodność opadu w tym obszarze. Przy tych założeniach objętość V można wyznaczyć zakładając, że obszar "0" jest wynikiem przenikania dwóch cylindrów, jak to ilustruje rys.15 odpowiadający sytuacji, gdy $\varphi = \pi/2$; /por. rys. 3/.

Jak widać z rys. 15, obszar "0" ma kształt cylindra o średnicy $\Delta R_1 = R_1 \theta_1$, którego długość jest ograniczona przez średnicę większego cylindra, równą $\Delta R_2 = R_2 \theta_2$.

Wobec tego

$$V \approx \frac{\pi R_1^2 \theta_1^2 R_2 \theta_2}{4}, \quad \varphi = \pi/2 \quad /11/$$

natomiast przy $\varphi \neq \pi/2$

$$V \approx \frac{\pi R_1^2 \theta_1^2 R_2 \theta_2}{4 \sin \varphi} \quad /12/$$

jak to pokazano na rys. 16.

Z kolei określimy związek powierzchni skutecznej η jednostki objętości opadu z natężeniem opadu I . Wzór /2/ można przedstawić w postaci

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2 z \quad /13/$$

gdzie

$$z = \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad /14/$$

jest współczynnikiem określającym własności odbiciowe opadu, związanym z rozkładem średnic kropeł. Znana jest korelacyjna zależność, że

$$z = A I^\alpha \quad /15/$$

gdzie A, α - współczynniki zależne od nieznanych a priori rozkładów średnic kropeł, przyjmuje się przy tym, że dla większości opadów $A = 200$, zaś $\alpha = 1,6$. Jednak dla silniejszych natężeń, które nas bardziej interesują, odpowiednie są wartości $A = 300$, $\alpha = 1,5$ [1,14].

Wobec tego

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2 300 I^{1,5} \quad /16/$$

Jeśli teraz do wzoru /10/ podstawimy wyrażenie /12/ i /15/ i uwzględnimy, że $\theta = \pi (s/G)^{1/2}$, to otrzymamy

$$\frac{P_{1r2}}{P_{1T}} \approx \frac{\pi^7}{3 \cdot 4^3 \sin \varphi} \cdot \frac{s_1 s_2}{R_2 \theta_2 \lambda^2} \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2 A I^\alpha \quad /17a/$$

lub

$$\frac{P_{1r2}}{P_{1T}} \approx \frac{\pi^6}{3.4^3 \sin \varphi} \cdot \frac{\sqrt{G_2 s_1} \sqrt{s_2}}{R_2} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right|^2 A l^{\alpha} \quad /17b/$$

przy czym $0 < s_1 < 1$ i $0 < s_2 < 1$ są współczynnikami związanymi z konstrukcją anteny nadawczej i odbiorczej.

We wzorach /17/ nie występuje odległość R_1 . Wynika to z tego, że w obszarze "0" spadek gęstości mocy fall wraz z kwadratem odległości jest kompensowany wzrostem liczby elementów opadu, a więc mocą zakłóceń proporcjonalną do kwadratu odległości. Moc zakłóceń w antenie odbiorczej zależy więc od odległości $R_2 \gg R_1$. Jeśli we wzorze /17/ przyjmą jednostki miar [mm/godz], [m], to iloraz P_{1r2}/P_{1T} można obliczyć ze wzoru

$$\frac{P_{1r2}}{P_{1T}} \approx \frac{\pi^7 10^{-18}}{3.4^3 \sin \varphi} \cdot \frac{s_1 s_2}{\lambda^2 R_2 \theta_2} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right|^2 300 I^{\alpha} \quad /18a/$$

lub

$$\frac{P_{1r2}}{P_{1T}} \approx \frac{\pi^6 10^{-18}}{3.4^3 \sin \varphi} \cdot \frac{\sqrt{G_2 s_1} s_1}{R_2 \lambda^2} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right|^2 300 I^{1,5} \quad /18b/$$

Zależności P_{1r2}/P_{1T} od natężenia opadu w postaci deszczu przy $\lambda = 1$ cm i $\theta_2 = 1/4^\circ, 1/2^\circ, 1^\circ$ i 2° oraz $\lambda = 3$ cm i $\theta_2 = 1/2^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ dla $R_2 = 10$ km i 20 km oraz $s_1 = s_2 = 0,5$ przedstawiają wykresy na rys. 17.

Wiadomo, że moc zakłóceń w antenie odbiorczej linii radiowej nie powinna przekraczać wartości około 10^{-11} W. Poziom ten jest zresztą uzależniony od mocy szumów na wejściu odbiornika, od rodzaju modulacji, od kryteriów wymaganej jakości i innych czynników. Jeśli przyjąć, że moc nadajników linii radiowych jest rzędu 10 watów, to z rys. 17 wynika, że w zakresie fal rzędu 1 cm nawet opady o natężeniu 10 mm/godz. prowadzą do zakłóceń w pracy linii radiowych, wówczas gdy ich wiązki promieniowania krzyżują się w jednej płaszczyźnie i pracują na tej samej częstotliwości. W przypadku gdy krzyżuje się wiązka główna linii 1 z listkiem bocznym nie skrzyżowanej linii 2, zakłócanie jest oczywiście słabsze. Trzeba jednak uwzględnić możliwość jednoczesnego krzyżowania się głównej wiązki promieniowania z promieniami kilku listków bocznych anten w obszarze występowania opadu. Należy również wziąć pod uwagę, że szerokość kątowa promieniowania listków bocznych jest 2-krotnie większa niż listka głównego, co prowadzi do 4-krotnego lub 2-krotnego zwiększenia objętości obszaru "0" w zależności od tego, czy listek boczny promieniowania jest związany z anteną bliższą czy dalszą od opadu.

Istotne niebezpieczeństwo zakłóceń pracy linii radiowych stwarzają urządzenia dużej mocy, pracujące w pasmie fal centymetrowych, takie jak radiolokatory, których moce w impulsie sięgają $10^6 \div 10^7$ wata oraz naziemne stacje satelitarne o mocy średniej rzędu setek watów i kilowatów. W przypadku radiolokatorów zakłócenie jest możliwe nawet poprzez promieniowanie listków bocznych anteny nadajnika i odbiornika. Ze względu na szerokie widmo częstotliwości impulsów radiolokatora ochrona linii radiowych przed tym zakłóceniem wymaga znacznej różnicy pomiędzy częstotliwością pracy linii radiowej i częstotliwością pracy radiolokatora, a także od jego częstotliwości harmonicznych.

W dotychczasowych analizach były brane pod uwagę opady w postaci deszczu o sferycznych kropkach. W rzeczywistości większe krople, których udział w rozpraszaniu jest decydujący, ulegają spłaszczeniu podczas spadku, co prowadzi do komplikacji zjawiska rozpraszania. Krople sferyczne reemitują izotropowo falę o tej samej polaryzacji jak fala, która wywołała w niej oscylacje. Kropla odkształcona reemituje natomiast dodatkowo falę zdepolaryzowaną. W przypadku gdy kropla ma kształt elipsoidy i fala jest spolaryzowana w taki sposób, że wektor pola jest równoległy do jednej lub drugiej osi elipsoidy, to i w tym przypadku nie powstanie składowa zdepolaryzowana. W rzeczywistości opadające krople są zorientowane w przestrzeni mniej lub więcej chaotycznie. Zawsze więc reemitują falę spolaryzowaną równoległą, jak i prostopadłą do fali padającej. Iloraz P_{\perp}/P_{\parallel} gęstości fali spolaryzowanej prostopadłe do gęstości mocy fali spolaryzowanej równoległe zależy od stopnia deformacji kropli i od kąta padania fali na kroplę. Z analizy wynika, że w zależności od współczynnika kształtu elipsoidy $\phi = l_1/l_2$ / l_1 - długość osi pionowej, l_2 - długość osi poziomej/ w przypadku fali 3 cm, gdy krople są chaotycznie zorientowane, iloraz ten zmienia się tak jak przedstawia wykres na rys. 18. W rzeczywistości duże krople stosunkowo często deformują się i przyjmują kształt zbliżony do elipsoidy o współczynniku $\phi = 0,5$. Należy sądzić, że wobec decydującego wkładu dużych kropeł w rozpraszanie iloraz P_{\perp}/P_{\parallel} może w realnych warunkach osiągać wartość około 1%.

Jeśli w powletrzu nie występują turbulencje, to wtedy krople opadają w taki sposób, że oś obrotu elipsoidy jest skierowana w przybliżeniu pionowo, a przy tym długość osi poziomej jest większa od długości osi pionowej. W tych warunkach fala spolaryzowana poziomo jest silniej rozpraszana niż fala spolaryzowana pionowo. Zagadnienie to jest rozwiązywane różnymi metodami, wymaga jednak specjalnego aparatu matematycznego i skomplikowanej aparatury badawczej. W dziedzinie eksperymentalnego rozwiązywania tych zagadnień pewne możliwości stwarzają metody radiolokacyjne, w których wykorzystuje się radary wyposażone w anteny emitujące falę o dowolnie nastawianej polaryzacji [11].

4. PROBLEMATYKA BADAWCZA I WYKORZYSTANIE METOD RADIOLOKACJI

Opisane wyżej zjawiska atmosferyczne zakłócają pracę linii radiowych bądź przez tłumienie fali promieniowanej, bądź przez wprowadzanie zakłóceń, przy tym intensywność tych efektów i czas ich trwania zależy od intensywności i czasu trwania opadów na trasach linii. Efekty te w mniejszym stopniu zależą od charakterystyki samego opadu /kształt kropel, rozkład średnic, stała dielektryczna/. Zjawiska zakłócania mogą też wystąpić w przypadkach, gdy opady występują poza trasą linii radiowej, lecz na skrzyżowaniu promieniowania listków bocznych anten linii i silnych źródeł energii w zakresie długości fali $\lambda < 5$ cm, jak np. radar-y i stacje satelitarne. Istotnym przejawem zakłócania pracy linii radiowych pracujących na falach ortogonalnie spolaryzowanych jest wzajemne ich zakłócanie uzależnione również od kształtu elementów opadu i ich orientacji przestrzennej na trasie tej linii. Wobec tego, że opady są zjawiskiem przypadkowym, staje się oczywista konieczność oszacowania prawdopodobieństwa wystąpienia opadu o określonym natężeniu na trasie linii. Jest przy tym niezbędne określenie prawdopodobieństwa odniesionego np. do okresu roku, że na danym odcinku linii radiowej wystąpi tłumienie $A \geq A_0$ lub, że w antenie odbiorczej wystąpi zakłócenie o mocy $P_r \geq P_{ro}$. A_0 i P_{ro} oznaczają przy tym wybrane wartości tłumienia i mocy. Badania te są niezbędne wobec ostrych wymagań stawianych na niezawodność linii radiowych, dopuszczających w sumie zaledwie kilka minut przerw w pracy linii w ciągu roku / 10^{-4} - 10^{-5} roku/.

Wiadomo, że tłumienie jak i moc zakłóceń zależą nie tylko od natężenia opadu I , lecz także od rozmiarów geometrycznych strefy opadu /kolumny opadu/ i wielu innych czynników /patrz wzory 3, 5, 7 i 17/. Dlatego najbardziej wiarygodne wyniki badań można by uzyskać poprzez przeprowadzenie pomiarów na istniejących liniach radiowych. Jednak prawdopodobieństwo wystąpienia zjawisk na trasach linii wyposażonych w aparaturę pomiarową jest niewielkie i dane trzeba byłoby zbierać przez wiele lat, aby uzyskać wiarygodne wyniki. Badania na trasach linii satelitarnych są jeszcze bardziej utrudnione. Dlatego dąży się do uzyskania wyników metodami pośrednimi. Jedną z nich jest wykorzystanie wyników wieloletnich pomiarów opadu, zbieranych przez służbę meteorologiczną na terenie kraju, drugą zaś - zastosowanie radaru do szybkiego zbierania informacji o opadach na dużym terenie.

Wykorzystanie danych meteorologicznych jest utrudnione, bowiem w większości są to wysokości h opadów, w długich przedziałach czasu, rzędu godzin i dni. Jedynie w nielicznych punktach zainstalowano pluwiografy, rejestrujące na taśmie przebiegi wysokości opadu h/t , z których można odczytać przebieg natężenia I/t z rozróżnialnością czasową nie lepszą od jednej minuty. Dane te pozwalają ocenić przedziały czasu, w których natężenie I przekracza określone wartości w punk-

cie pomiaru opadów. Wartości te ocenia się analitycznie dla odcinka linii radiowej o określonej długości, przyjmując pewne modele opadów. Z analiz przeprowadzonych tą metodą we Francji wynika, że na odcinku linii pracującej na częstotliwości 15 GHz i o długości 20 km wystąpią tłumienia A wywołane przez opady, których wysokość przekracza ok. 30 dB w przedziale czasu 3×10^{-5} roku /ok. 16 minut/. W zależności od warunków klimatycznych tłumienia te są większe lub mniejsze od tej wartości. Tak na przykład w rejonie Rennes $A \geq 19$ dB, w rejonie Marsylii $A \geq 37$ dB, na Korsyce zaś $A \geq 44$ dB w wymienionym przedziale czasu [12].

Na podstawie danych o opadach można by również oszacować przedziały czasu, w których zakłócenia wywołane za pośrednictwem opadów przekraczają określoną wartość, przy ustalonej konfiguracji linii radiowych i określonych parametrach urządzeń nadawczych oraz odbiorczych.

Druga ze wspomnianych /pośrednich/ metod oceny tłumienia i zakłóceń w liniach radiowych, tzn. metoda radiolokacyjna, pozwala na zebranie w krótkim czasie wielkiej ilości informacji o przestrzenno-czasowym rozkładzie natężeń opadu w otoczeniu radaru w promieniu do 100 km do wysokości tropopauzy, jak to pokazuje rys. 19. Wykonywanie dookólnego obrotu anteny przy skokowo zmienianych kątach elewacji np. co $0,5^\circ$ i rejestrowanie w pamięci przebiegu mocy sygnału P_r , odebranego od opadu na kierunkach w odstępach np. co 1° pozwala obliczyć przebieg natężenia opadu na wszystkich tych kierunkach. Obliczenia te opierają się na zależności

$$P_r = \frac{C \cdot z}{R^2}$$

gdzie

C - stała,

R - odległość pomiędzy radarem i opadem,

z - współczynnik własności odbiciowych opadu, występujący we wzorze /13/.

Znajomość przebiegu z/R pozwala określić rozkład natężenia opadu I/R wzdłuż trasy na wybranym kierunku /wzór 15/. Uzyskane w ten sposób dane są podstawą do przeprowadzenia różnorodnych oszacowań, takich jak np. ocena tłumień na odcinku o dowolnej długości, skierowanym pod dowolnym kątem /łączość ziemska i satelitarna/, ocena zmniejszenia tłumienia przez zastosowanie równoległych linii radiowych o różnych odstępach, ocena zmniejszenia tłumienia przez zastosowanie systemu odbioru zbiorczego przy różnych odległościach odbiorników itp. Wszystkie te oceny mogą być przeprowadzone dla różnych częstotliwości pracy linii, korzystając z korelacyjnego związku /5/.

Tą metodą przeprowadzono już wiele badań i uzyskano interesujące wyniki /7/. Można przytoczyć na przykład wyniki badań przeprowadzonych w radarze uniwersyte-

tu McGill w Montrealu, pracującym na nietłumionej fali o długości 11 cm, z których wynika, że na odcinku o długości 12,5 mili /ok. 20 km/ wystąpi tłumienie $A \geq 30$ dB w ciągu 6 minut na rok, przy częstotliwości pracy linii 11,2 GHz lub $A \geq 60$ dB przy częstotliwości 18,7 GHz [6]. Trzeba tu zaznaczyć, że pomiary radarowe były wykonywane w okresie letnim podczas intensywnych opadów, w związku z czym uśrednianie wyników na okres roku nie jest uzasadnione.

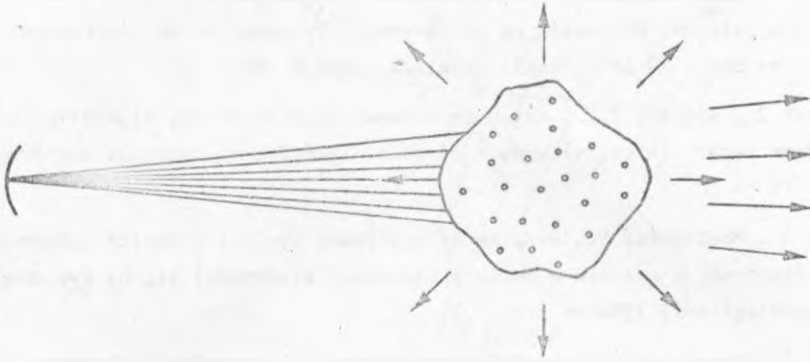
Należy stwierdzić, że wykorzystanie danych meteorologicznych, opartych na zgrubsza równomiernie rozstawionych w całym kraju źródłach raczej ubogiej informacji punktowej, działających jednak w długim okresie czasu, pozwala na uchwycenie zróżnicowania regionów kraju pod względem wpływu opadów na linie radiowe. Jest to pozytywna cecha tej metodyki. Zaletą metody radarowej jest łatwość uzyskania bogatego zbioru danych o opadach, reprezentatywnego dla krótkiego okresu czasu, który z kolei może nie być reprezentatywny w długim przedziale czasu. Istotną zaletą tej metody jest możliwość oszacowania działania linii satelitarnych w różnych rozwiązaniach i na różnych częstotliwościach.

Na zakończenie trzeba zwrócić uwagę na prace badawcze związane z depolaryzującym działaniem niesferycznych elementów opadu w zjawisku rozpraszania fal. Badania te opierają się na urządzeniach radarowych, zapewniających emitowanie fal o dowolnej polaryzacji i pomiarze polaryzacji oraz mocy fali odebranej, odbitej od opadu. Ze względu na zrozumiałe trudności badań wynikające z braku dostępu do elementów opadu i niepewności zjawisk opadowych szuka się rozwiązań między innymi drogą tworzenia matematycznych modeli opadów, uwzględniających fizyczne własności elementów opadu i obliczania mocy rozproszonej w zależności od polaryzacji i usytuowania przestrzennego tych elementów względem frontu fali. Spośród metod doświadczalnych stosuje się ostatnio wytwarzanie sztucznego opadu /z helikoptera/, co pozwala powtarzać wielokrotnie pomiary radarowe przy różnych polaryzacjach fali i różnych kątach opromieniowania opadu. Problematyka ta jest złożona i niełatwa do uchwycenia, mimo różnorodności podejść i skali zastosowanego wysiłku. Częściowo tym można wytłumaczyć opóźnienie w opanowaniu wyżej omawianych zagadnień.

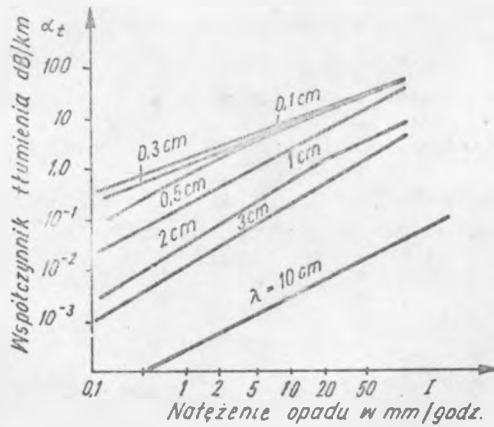
WYKAZ LITERATURY

1. Atlas D.: Advances of radar meteorology, tłumaczenie w jęz. rosyjskim, Gidromet 1967.
2. Altman F.J.: Storm cell models from digital radar data, Materiały na konferencję "Propagation of radio waves at frequencies above 10 GHz", 10-13 kwietnia 1973, Londyn.
3. Battan L.J.: Radar meteorology, The University of Chicago Press, 1959.

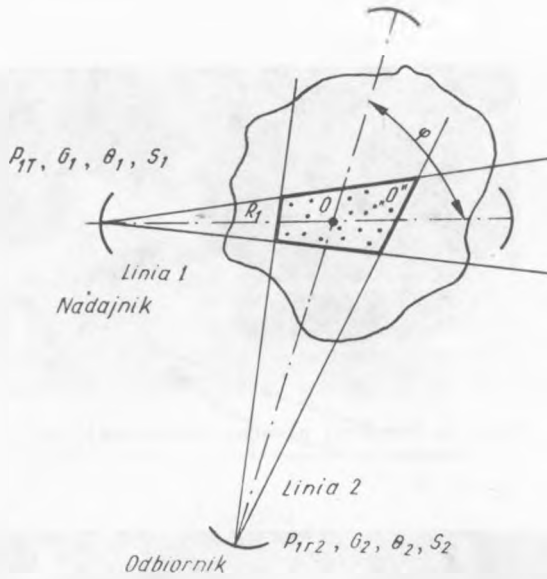
4. Bullington K.: Rain scatter interference in terrestrial microwave systems, Bell Syst.Tech.J.1975 t. 54, nr 1.
5. Crane R.K.: Bistatic scatter from rain. IEEE Trans. Antennas and Propag. 1974 nr 2.
6. Drufuca C.: Rain attenuation statistics for frequencies above 10 GHz from radar observations. Materiały na konferencję "Propagation of radio waves at frequencies above 10 GHz", 10-13 kwietnia, Londyn 1973.
7. Goldhirsh J., Robison F.L.: Attenuation and space diversity statistics calculated from radar reflectivity data of rain. IEEE Trans. Antennas and Propag. 1975 t. 23 nr 2.
8. Kawecki A., Moszkowicz S., Ordakowski J.: Czasy życia i średnice kolumn opadów przelotnych, w oparciu o pomiary radarowe. Wiadomości Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej 1968 nr 3-4.
9. Kawecki A.: Metody radiolokacyjne w meteorologii i hydrologii. Prace PIT 1974 nr 80.
10. Madany A.: Struktura opadów atmosferycznych ciepłej pory roku w Polsce środkowej i północnej. Zesz. Nauk. Akad. Roln, w Warszawie. Melioracje Rolne 1973 nr 12.
11. McCormick G.C., Hendry A.: Polarisation-related parameters for rain: Measurements obtained by radar. Radio Science 1976 t. 11, nr 8-9.
12. Misme P., Fimbel J., Curbes d'affaiblissement du à la pluie à l'usage des regions administratives 13 GHz : 15 GHz /Note Tech. EST/APH/33 Centre National d'Etudes des Telecom., Issy-les-Moulineaux, 11 grudnia, 1975.
13. Salman E.M.: Radiolokacjonnyje issledowania liwnlej i groz. Trudy GGO 1957 wyp. 72.
14. Stiepanienko W.D.: Radiolokacja w meteorologii. Gidrometeoizdat. Leningrad 1973.



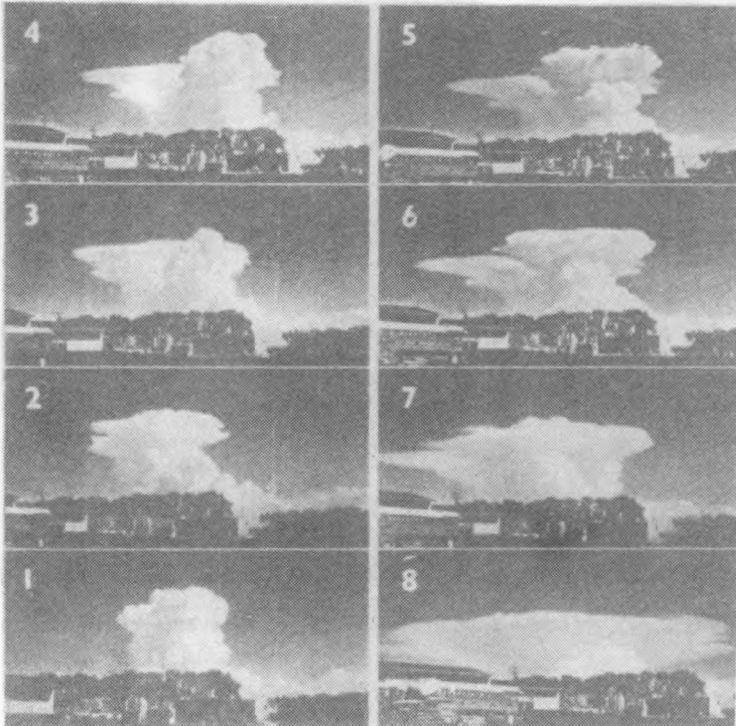
Rys. 1. Schematyczna ilustracja zjawiska rozpraszania i tłumienia fali przez wieloelementowy obiekt przestrzenny



Rys. 2. Zależność współczynnika α_t od natężenia opadu I dla różnych długości fal /częstotliwości 3 GHz, 10 GHz, 15 GHz, 30 GHz, 60 GHz, 100 GHz, 300 GHz/



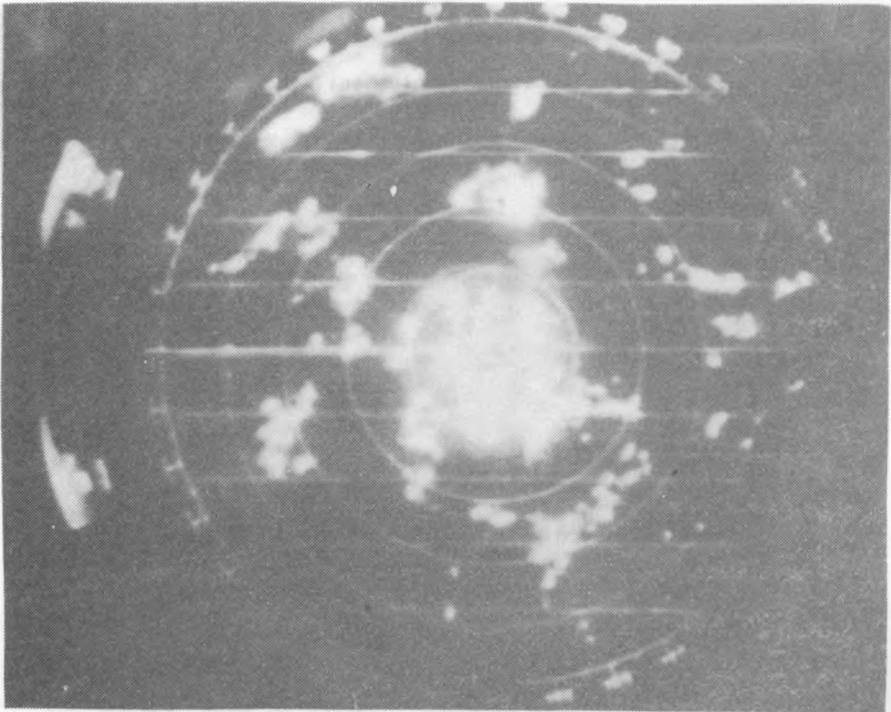
Rys. 3. Ilustracja zjawiska zakłócania linii radiowych za pośrednictwem elementów opadu



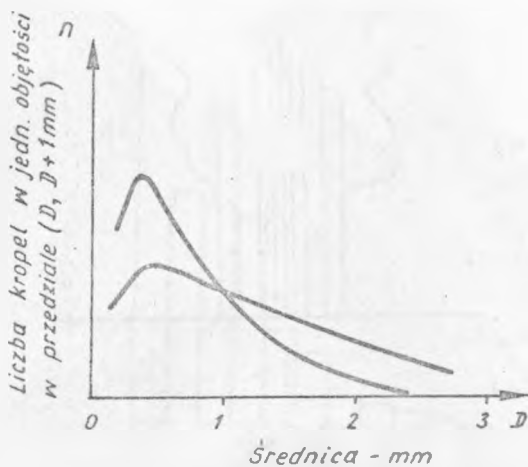
Rys. 4. Ewolucja chmury burzowej



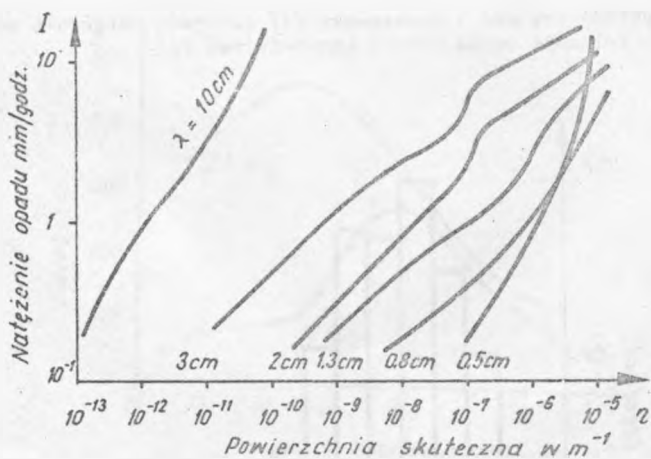
Rys. 5. Przekrój pionowy deszczowej chmury warstwowej



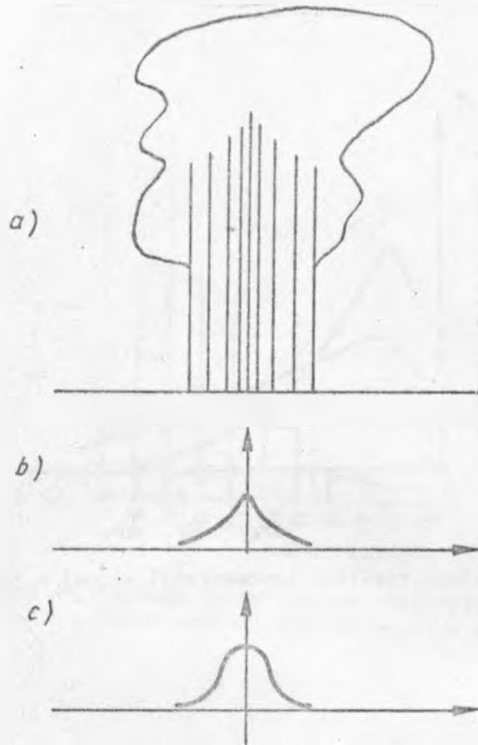
Rys. 6. Panoramowe zobrazowanie radarowe opadów przelotnych



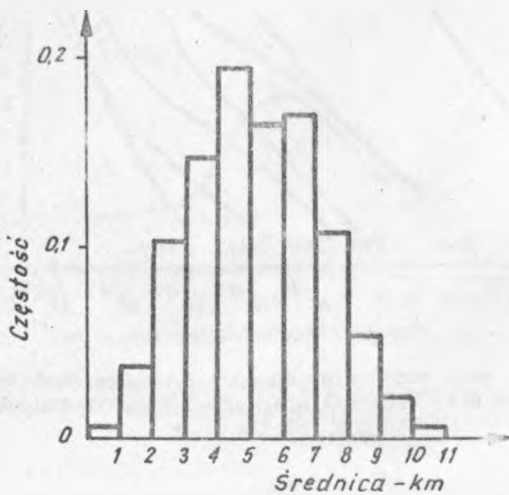
Rys. 7. Przykłady rozkładu koncentracji kropeł w opadach



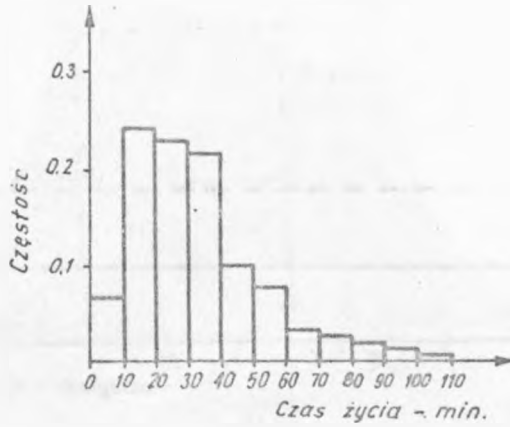
Rys. 8. Związek pomiędzy natężeniem opadu I i powierzchnią skuteczną A tego opadu zmierzoną przy częstotliwościach 3 GHz, 10 GHz, 15 GHz, 30 GHz, 60 GHz



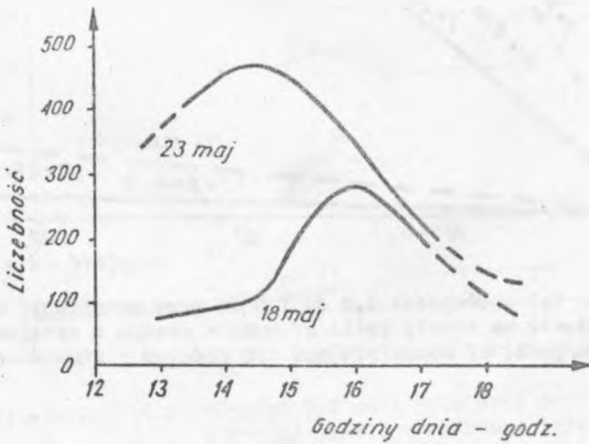
Rys. 9. Model wykładniczy /b/ i gaussowski /c/ rozkładu natężenia opadu w kolumnie opadu chmury konwekcyjnej /a/



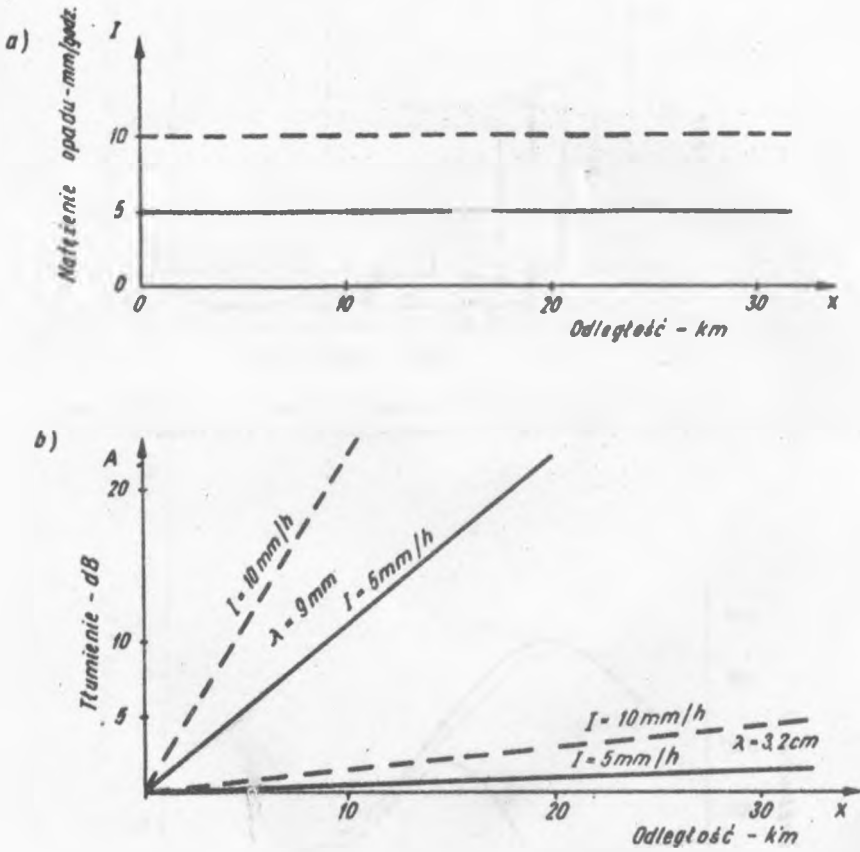
Rys. 10. Histogram dla średnic kolumn opadów przelotnych, określony na podstawie pomiarów radarowych przeprowadzonych w Legionowie



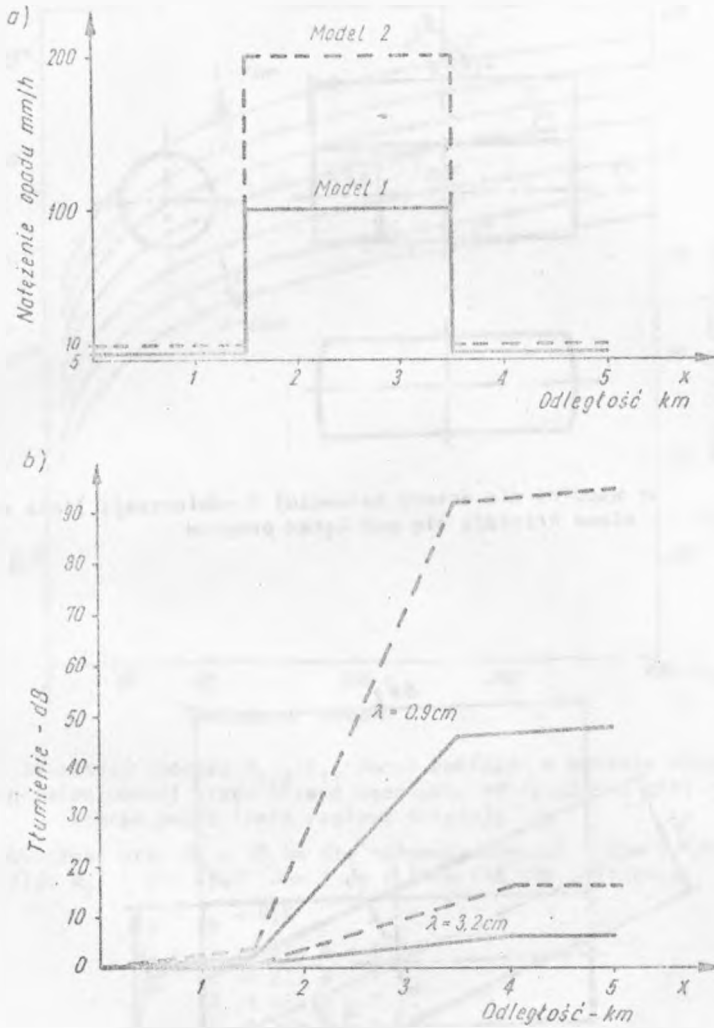
Rys. 11. Histogram dla "czasów życia" kolumn opadowych, określony na podstawie pomiarów radarowych przeprowadzonych w Legionowie



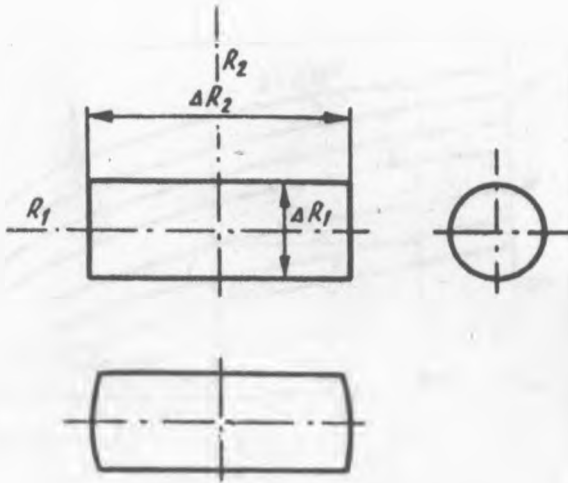
Rys. 12. Liczebność kolumn opadowych w ciągu godzin popołudniowych 23 maja i 18 maja 1967 na podstawie pomiarów radarowych przeprowadzonych w Legionowie



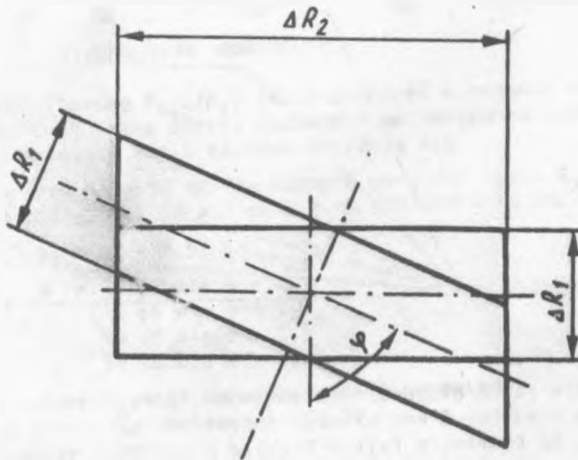
Rys. 13. Tłumienie fal o długości 3,2 cm i 9 mm przy penetracji opadów o stałym natężeniu na trasie fal: a/ modele opadów o natężeniu 5 mm/godz i 10 mm/godz, b/ odpowiadające tym modelom - tłumienia fal



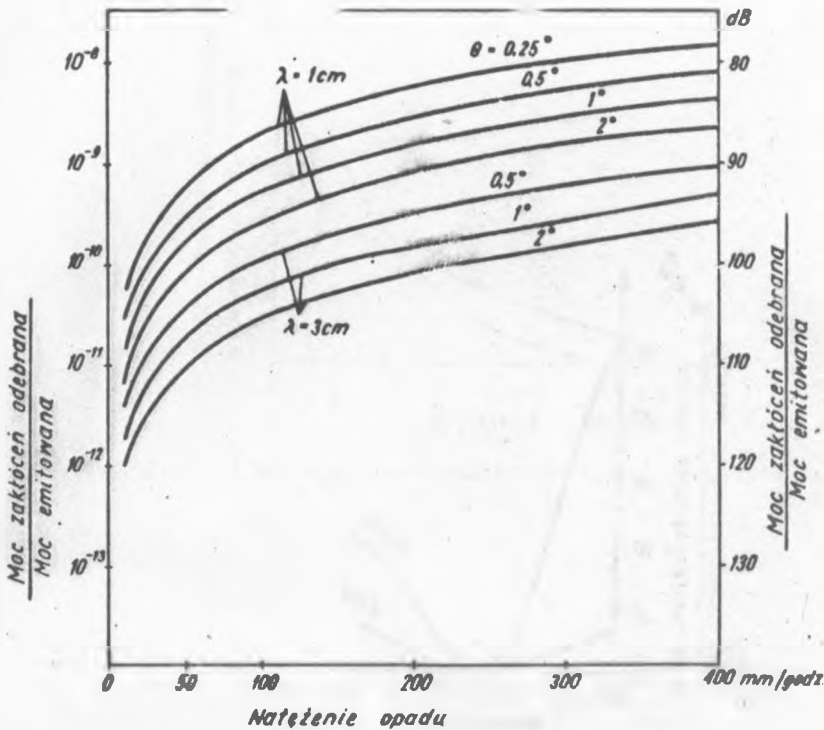
Rys. 14. Tłumienia fal o długości 3,2 cm i 9 mm przy penetracji kolumn opadowych o średnicy 5 km: a/ modele rozkładu natężenia opadu wzdłuż średnicy, b/ tłumienie fali w trakcie penetracji kolumny



Rys. 15. Obszar wspólny dla anteny nadawczej i odbiorczej; linie radiowe krzyżują się pod kątem prostym



Rys. 16. Obszar wspólny dla anteny nadawczej i odbiorczej w przypadku, gdy linie radiowe krzyżują się pod kątem ostrym



Rys. 17. Zależność ilorazu P_{1r2}/P_{1T} /mocy zakłóceń w antenie odbiorczej do mocy promieniowanej przez antenę nadawczą/ od natężenia opadu w obszarze, gdzie linie radiowe krzyżują się

Iloraz obliczono przy $R_2 = 10$ km dla różnych wartości zysku G_2 anteny /lub θ_2 / i dla fal $\lambda = 1$ cm i 3 cm /30 GHz i 10 GHz/

$$S_1 = S_2 = 0,5$$

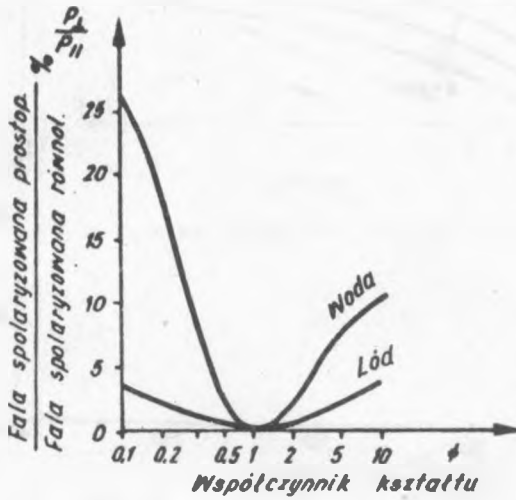
$$G = 36 \text{ dB dla } \theta = 2^\circ$$

$$42 \text{ dB dla } \theta = 1^\circ$$

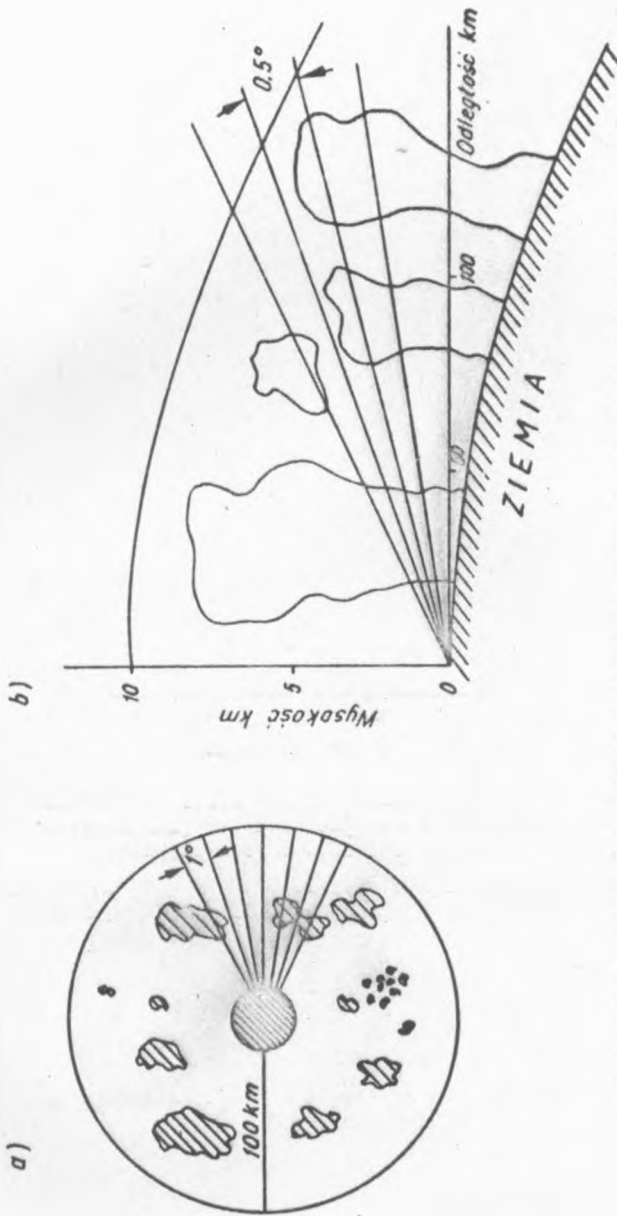
$$48 \text{ dB dla } \theta = 0,5^\circ$$

$$54 \text{ dB dla } \theta = 0,25^\circ$$

Przy $R_2 = 20$ km wykres dla θ odpowiada wykresowi dla 20



Rys. 18. Zależność ilorazu $\frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}}$ /energii fali zdepolaryzowanej i energii fali spolaryzowanej równolegle/ od współczynnika kształtu ϕ elioidalnych kropeł wody i kryształków lodu



Rys. 19. Ilustracja przeglądu przestrzeni przez radar; przekrój poziomy opadów i rejestracja informacji, co 10° kąta azymutu, /a/; przekrój pionowy i rejestracja informacji co $0,5^\circ$ kąta elewacji /b/

