

Meteorologické radary I.

Rozdělení velikosti kapek, historie radaru, technika,
radiolokační rovnice

Milan Šálek

(s pomocí kolegů z Radarového oddělení ČHMÚ)

salek@chmi.cz

Rozdělení velikosti kapek

- Vedle intenzity srážek je to nejužívanější charakteristika kapalných srážek
- Počet kapek podle velikosti v jednotce objemu (m^3)
- U kapek nad 1 mm průměru pozorován rychlý pokles počtu s rostoucím průměrem

Rozdělení velikosti kapek (pokr.)

- Většinou má tvar negativně exponenciální funkce (zejména při ustáleném dešti)

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D},$$

$N(D)dD$ – počet kapek v jednotkovém objemu s průměry mezi D a dD

$$\Lambda(R) = 4,1R^{-0.21} [\text{mm}^{-1}]$$

$$N_0 = 8000 [\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}]$$

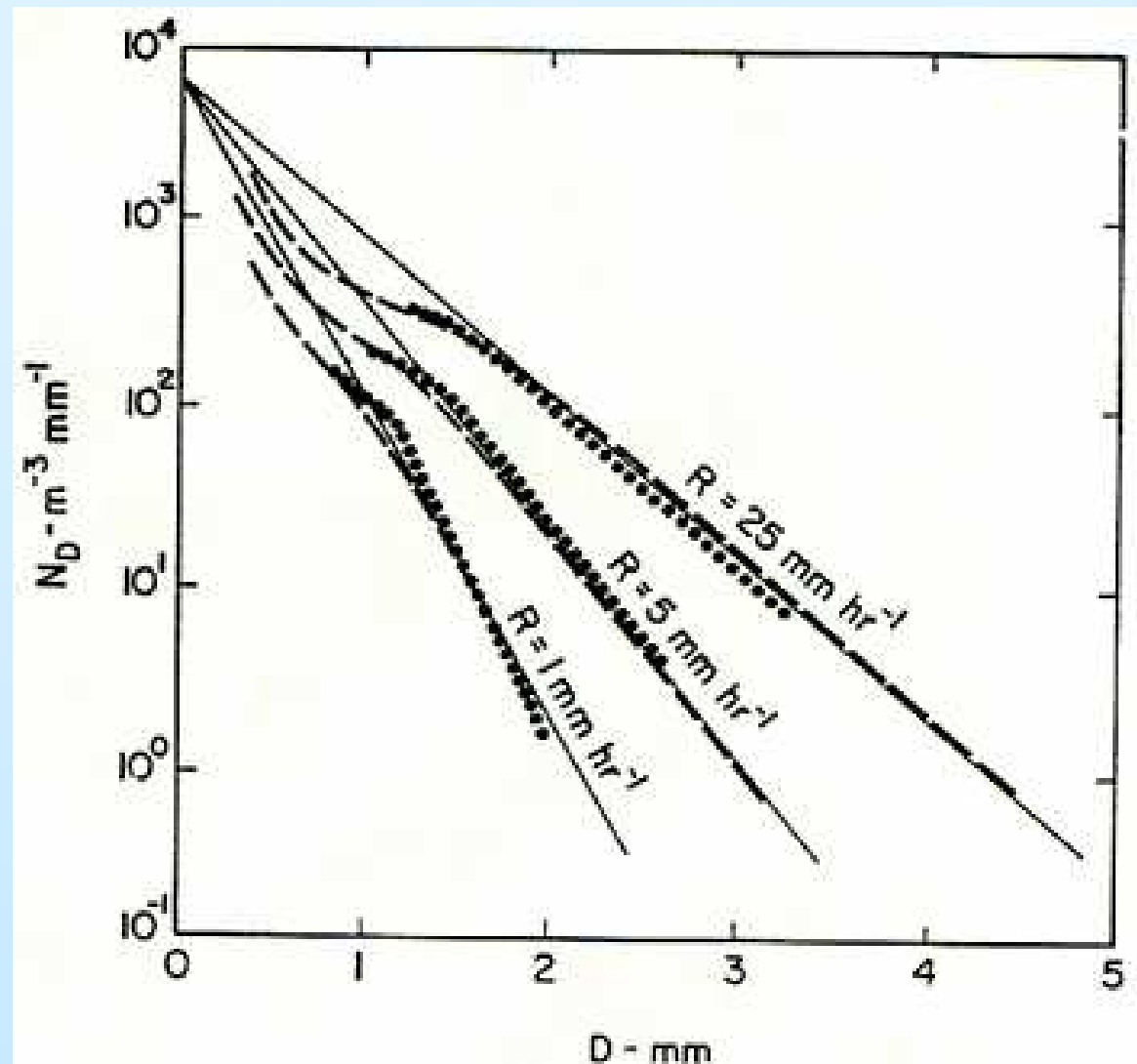
- Marshall a Palmer (1948)

Rozdělení velikosti kapek (pokr.)

- Pozor!!!
- Okamžité rozdělení velikosti kapek se od průměrného může velmi podstatně lišit!
- Nicméně, pro ustálený déšť a pro střední zeměpisné šířky poskytuje Marshall-Palmerovo rozdělení přijatelnou aproximaci

Rozdělení velikosti kapek (pokr.)

- Rozdělení velikosti kapek podle Marshalla a Palmera (1948)



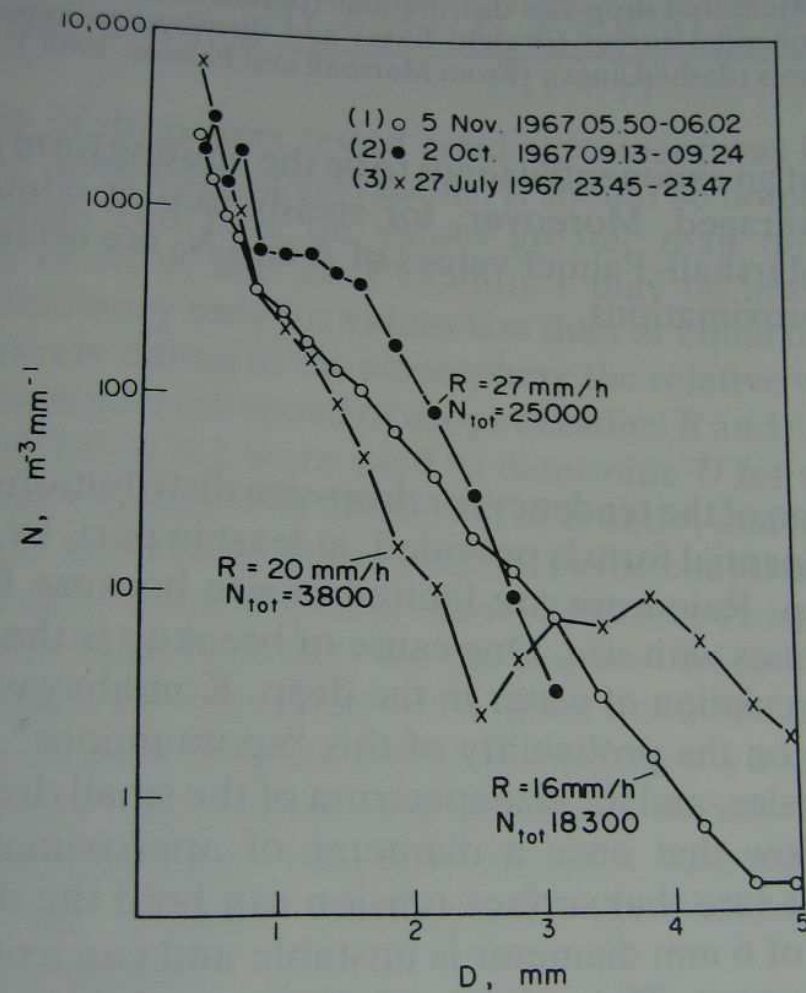


FIG. 10.1. Examples of measured drop-size distributions in rain. Indicated for each curve are the duration of the observation, the total number of drops counted, and the average rainfall rate. Distributions 1 and 2 were recorded during nearly constant rain; distribution 3 was recorded during a thunderstorm. (From Joss *et al.*, 1968.)

Intenzita srážek

- Objemový tok srážek horizontální plochou (nejčastěji idealizovaným zemským povrchem)
- SI soustava: $[m^3m^{-2}s^{-1}] = [m/s]$
- konvence: $[mm/h]$

Intenzita srážek (pokrač.)

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) D^3 u(D) dD$$

$N(D)$ – rozdělení velikosti kapek

$u(D)$ – pádová rychlost srážek

- Konvence: jestliže D je průměr kapky vzniklé táním sněhové vločky a R je ekvivalentní intenzita srážek, pak uvedený vztah platí též pro sněžení

Intenzita srážek (pokrač.)

- Pádová rychlost kapek (Doviak a Zrnice, 1993):

$$w_t(D) = 9,65 - 10,3 \exp(-0,6D)$$

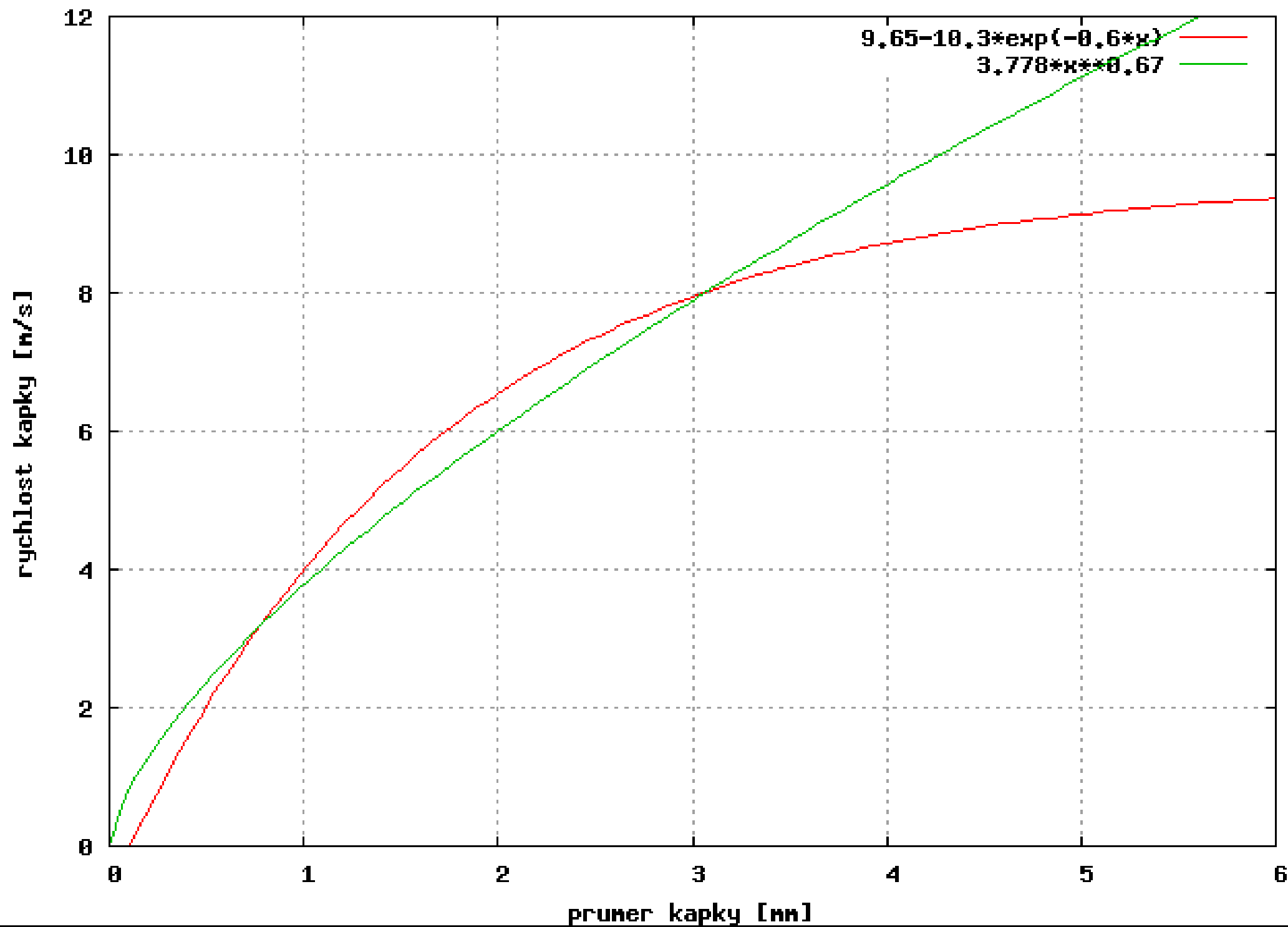
Pro D do 5 mm platí zjednodušený vzorec :

$$w_t(D) = 3,778D^{0.67}$$

D [mm] – průměr kapky

$w_t(D)$ [m/s] – pádová rychlost kapky

Zavislost padove rychlosti kapek na prumeru



Úvod do meteor. radarů

- Radar – RAdio Detection And Ranging
- Historie
 - Zřejmě první zmínka o konceptu radaru: Nikola Tesla (1900)
 - První praktická ukázka detekce objektu (bez odhadu vzdálenosti) pomocí radiových vln (elmg. vln o vln. délce od 1 mm do 20 km): 18.5. 1904, most u Hohenzollern, Německo (zařízení bez pulsů)

Úvod do meteor. radarů (pokr.)

- První pulsní (quasi) radar: v červnu 1925 detekovali Breit a Tuve odrazovou vrstvu 150 km nad zemským povrchem
- **Sir Robert A. Watson-Watt** (UK MetOffice) a **A. F. Wilkins**: v r. 1935 návrh systému pro třírozměrnou lokalizaci létajících objektů
- o 5 měsíců později: první úspěšná ukázka detekce letadla
- po dalších zlepšeních systému výrazné úspěchy při detekci německých letadel během 2. sv. války

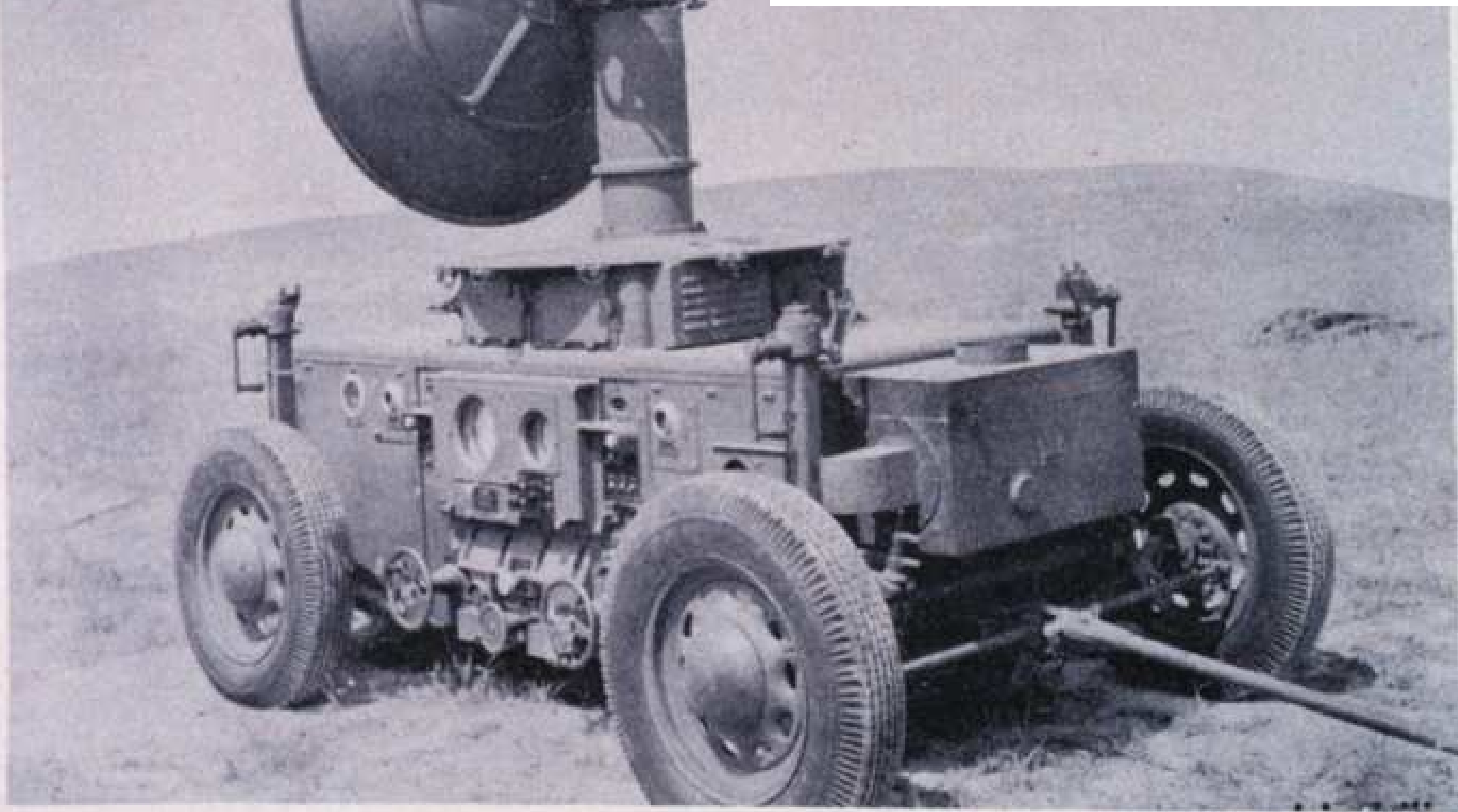
Úvod do meteor. radarů (pokr.)

- v 30. letech podobné snahy i v jiných zemích (USA, Německo, Itálie, Japonsko, Francie, Nizozemí, Maďarsko)
- USA: duben 1936 – úspěšná detekce letadla
- 1940 – vývoj magnetronu (efektivního generátoru silného pulsu na malých vln. délkách) umožnil větší praktické nasazení radaru pro detekci objektů ve větších vzdálenostech (magnetrony jsou používány i v domácích mikrovlnných troubách)

Úvod do meteor. radarů (pokr.)

- Vliv technologie radaru na válečné události během 2. světové války (výhoda Spojenců)
- přes efektivnost a nenahraditelnost často nebyl brán příliš vážně (*konzervativnost*)
- Dopplerovské radary: vývoj též během 2. světové války
- První detekce srážek: zřejmě v r. 1940, dokumentovaná detekce v r. 1943

Radar AN/TPL-1 původně konstruován pro řízení vyhledávacích reflektorů (dosah 55 km), r. 1944; později využit i pro sledování bouřek a výšková balonová měření.



Radar SCR-584
r.1944

Radar zjevně
původně
konstruován pro
řízení
protiletadlové
palby.

Podobnost s
radarem RMS-1
Meteor, výroba
SSSR 60.léta „čistě
náhodná“.

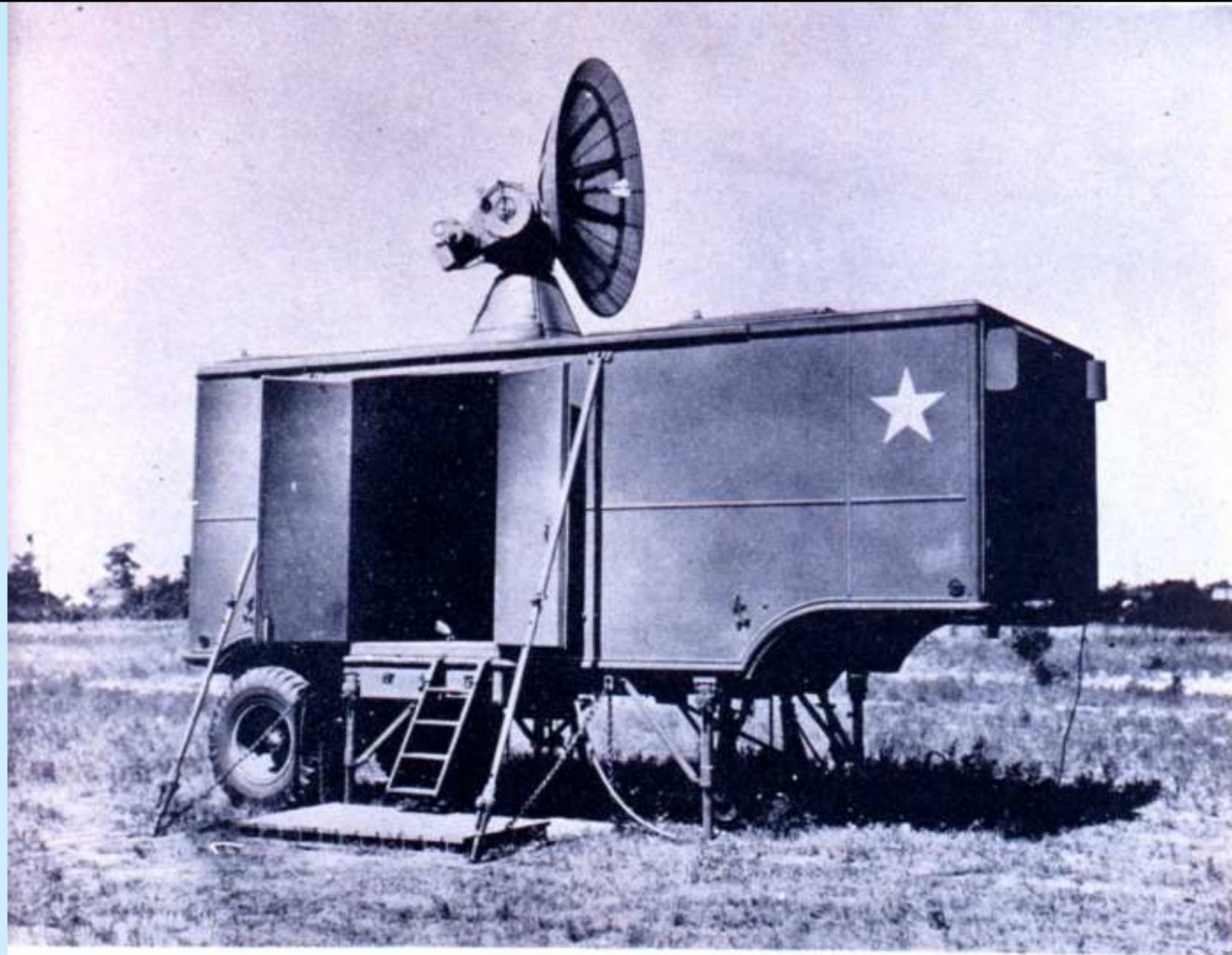
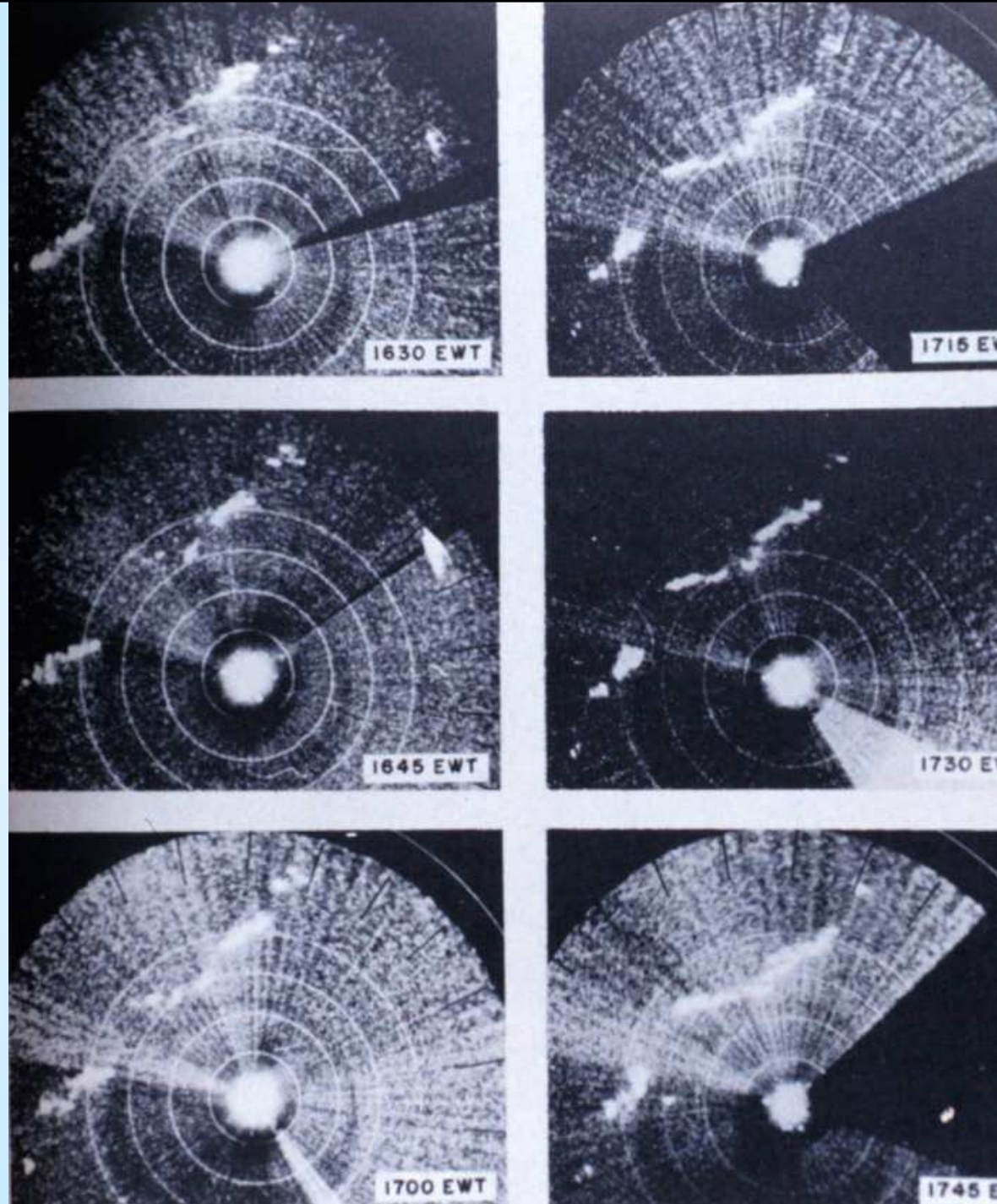


Figure 22. Exterior View of Radio Set SCR-584.

Snad nejstarší dochované snímky meteorologického jevu zachyceného radarem, pásmo X ($\lambda = 3$ cm) u Bostonu dne 22.července 1943.

Původně rychlejší postup fronty se v posledních třech termínech prakticky zastavil.

Proměnný jas snímků snímaných z obrazovky je způsoben nedokonalou synchronizací závěrky fotoaparátu s otáčením antény a nestabilitou videozesilovače radaru.



Snímek frontálních bouřek, zachyceno ze stínítka indikátoru radaru SCR-584 dne 16.7.1944.

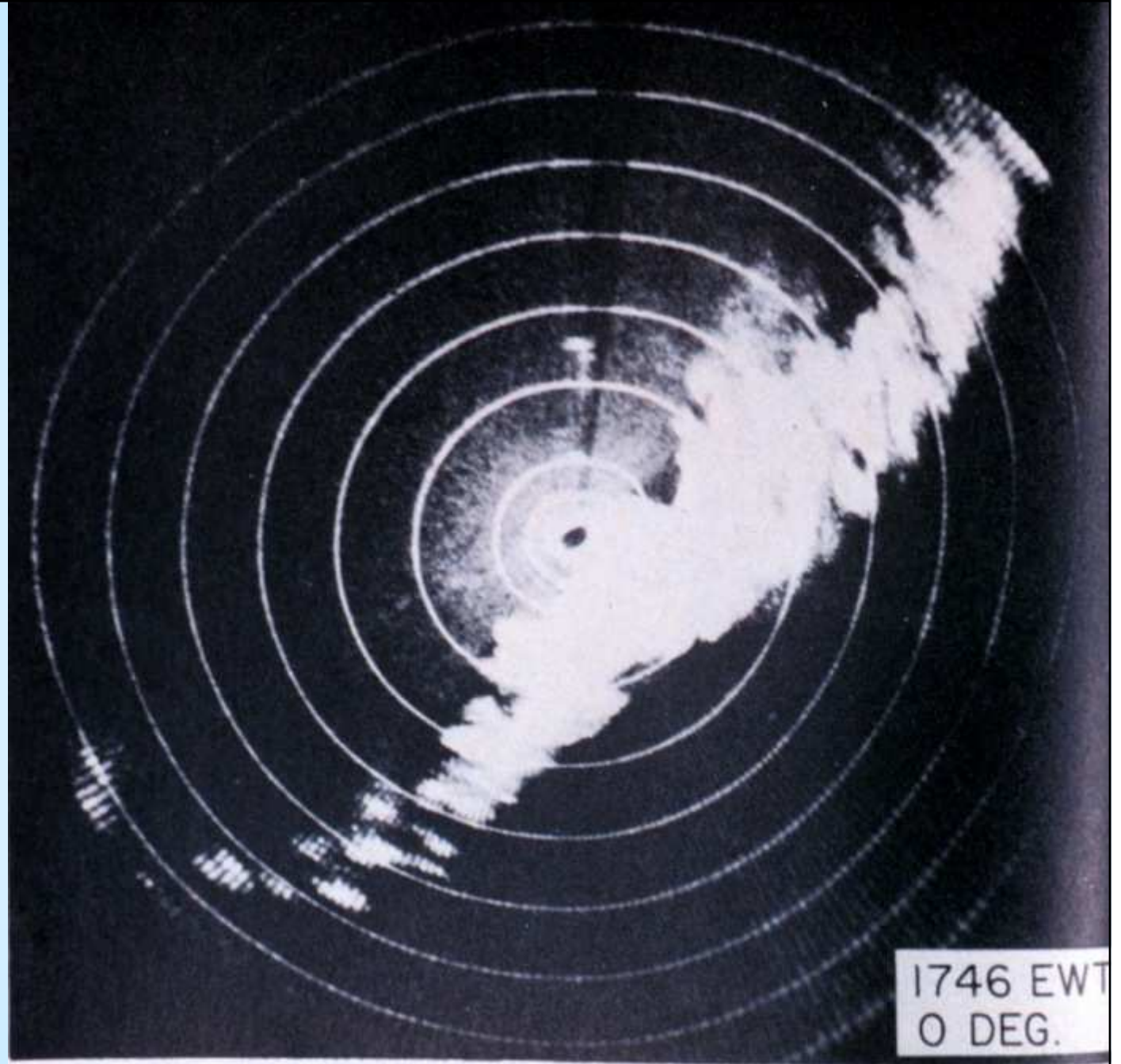


Figure 33. Echoes from frontal thunderstorms, 16 July 1944.

Meteorologické radiolokátory v civilní meteorologické službě na území dnešní ČR

1. RM-1, ČSSR, Tesla Pardubice-Ústav pro výzkum radiotechniky (ÚVR) Opočíněk, ÚFA ČSAV, Milešovka, 1967 - ?, manuální režim;
2. RM-2, ČSSR, Tesla Pardubice-ÚVR Opočíněk, HMÚ-Praha (pozd. ČHMÚ), Libuš, 1970-1978, manuální režim;
3. MRL-2, SSSR – závod v Gorkém, ČHMÚ, Libuš, 1978 – 1989, manuální režim;
4. MRL-5, SSSR – závod v Gorkém, ČHMÚ, Libuš, 1989-2000; manuální režim, digitalizován Köszofa 1992, od 1993 poloautomatický provoz;
5. M-360 AC, Německo, Gematronik GmBh, ČHMÚ, kóta Skalky u Boskovic, 1995-trvá, digitalizován, automatický provoz, dálkové řízení;
6. DWSR-2501C, USA, EEC, ČHMÚ, kóta Praha – Brdy, 1999 – trvá, digitalizován, automatický provoz, dálkové řízení.

Datový tok meteorologického radiolokátoru

- min. 100 vzorků odraženého výkonu na 1 běh radarového impulzu;
- 1 vzorek: min. 4, lépe 8 bitů informace o odrazivosti;
 min. 6 bitů informace o dálce;
 min. 2 x 8 bitů informace o poloze cíle.
- 1 ot. antény cca 10 – 30 s;
- opakovací frekvence radaru cca 1000 Hz (nebo méně);
- 1 úplné měření (scan) 10 – 20 ot. antény

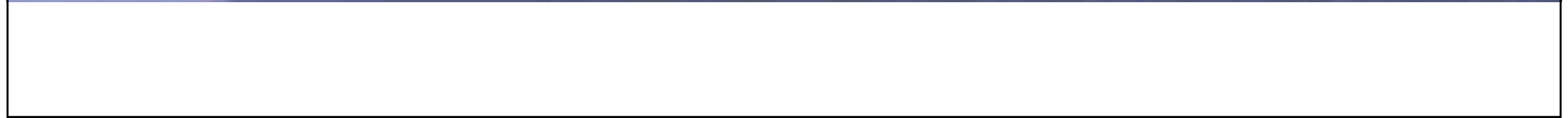
Výsledný informační tok: řádu **100 kB/s !**

V 70. létech v začátcích radiolokačních měření u nás bylo zpracování tohoto toku informací úkolem dosažitelnými technickými prostředky naprosto neřešitelným.

Za cenu maximálních omezení co do přesnosti digitalizace přijatého signálu respektive polohových údajů meteocílů bylo možné reálný vývoj zahájit až začátkem 80. let.

Radars RM - 2





Technické parametry radaru RM-2:

dosah: 200 km

pracovní frekvence: 9340 MHz (pásmo 3 cm)

výkon vysílače: 100 kW max.

délka vysílacího impulzu: 1 μ s

opakovací frekvence vysílače: 500 Hz

šumové číslo přijímače: 8 dB

šířka pásma přijímače: 2 MHz

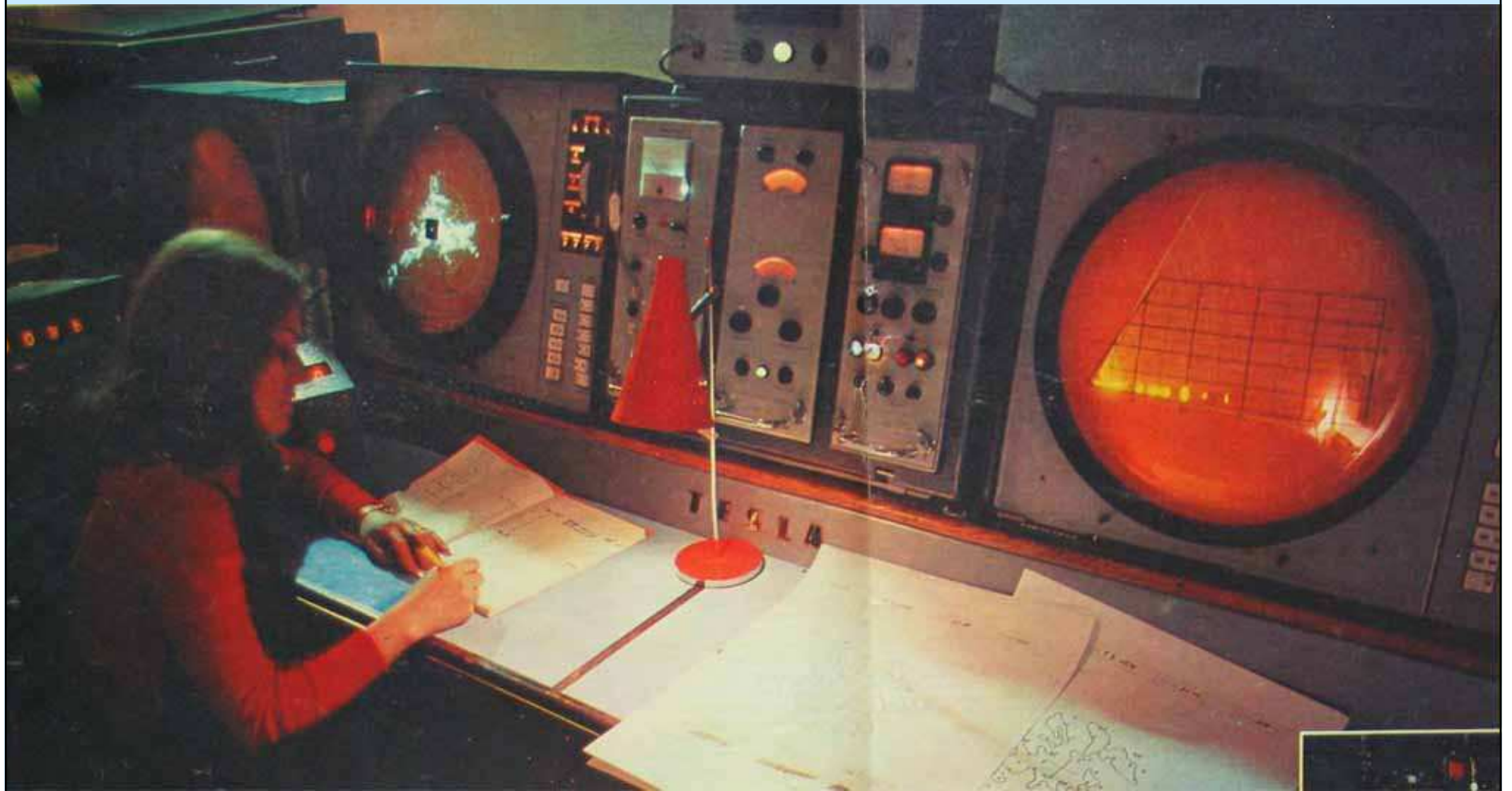
časové řízení zisku: $1/R^2$ 10/200 km

průměr antény: 1,7 m (parabolický refl.)

indikátory: typ UPA-4 Tesla, PPI i RHI

napájení: 3 x 380V, 50 Hz, rot. měnič 50/500 Hz

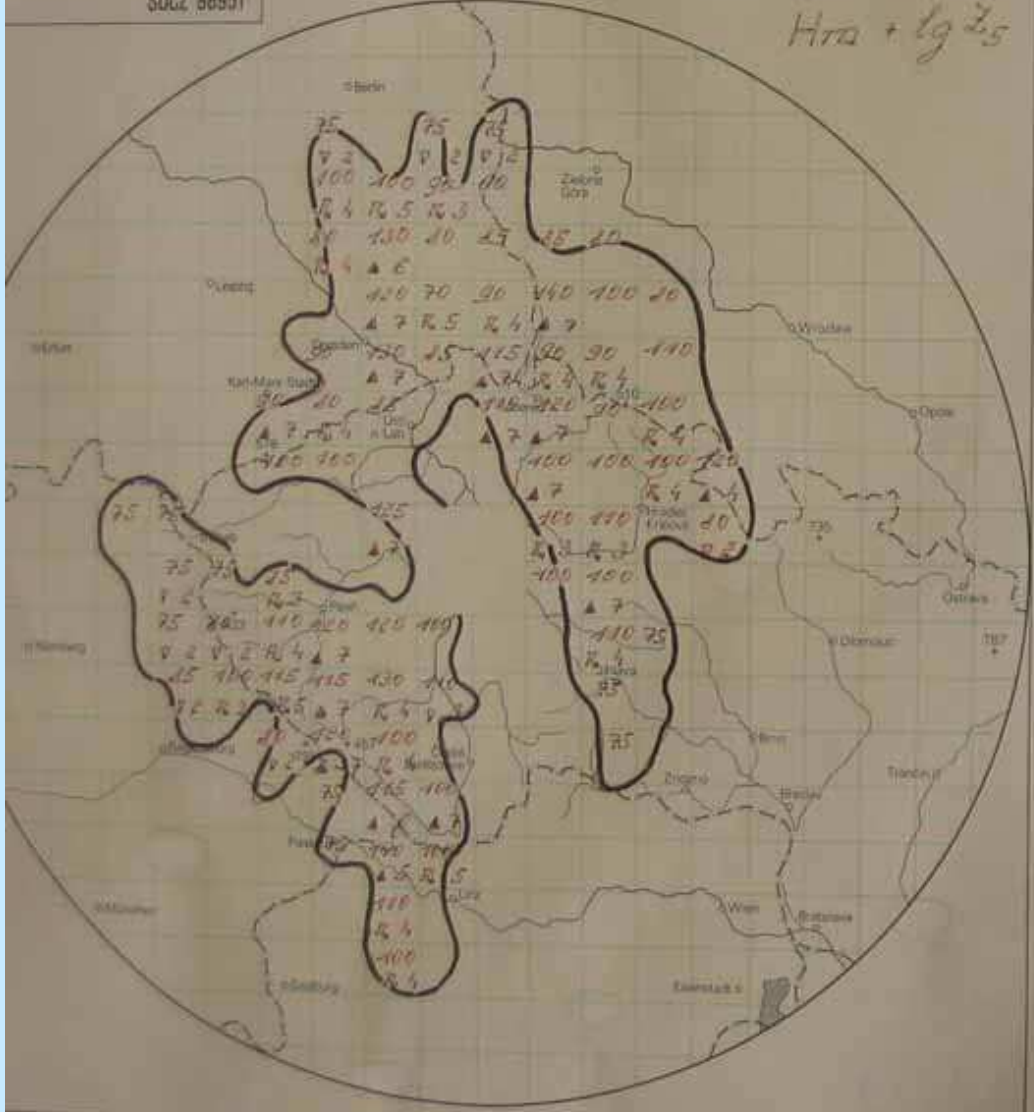




RUČNÍ ZPRACOVÁNÍ

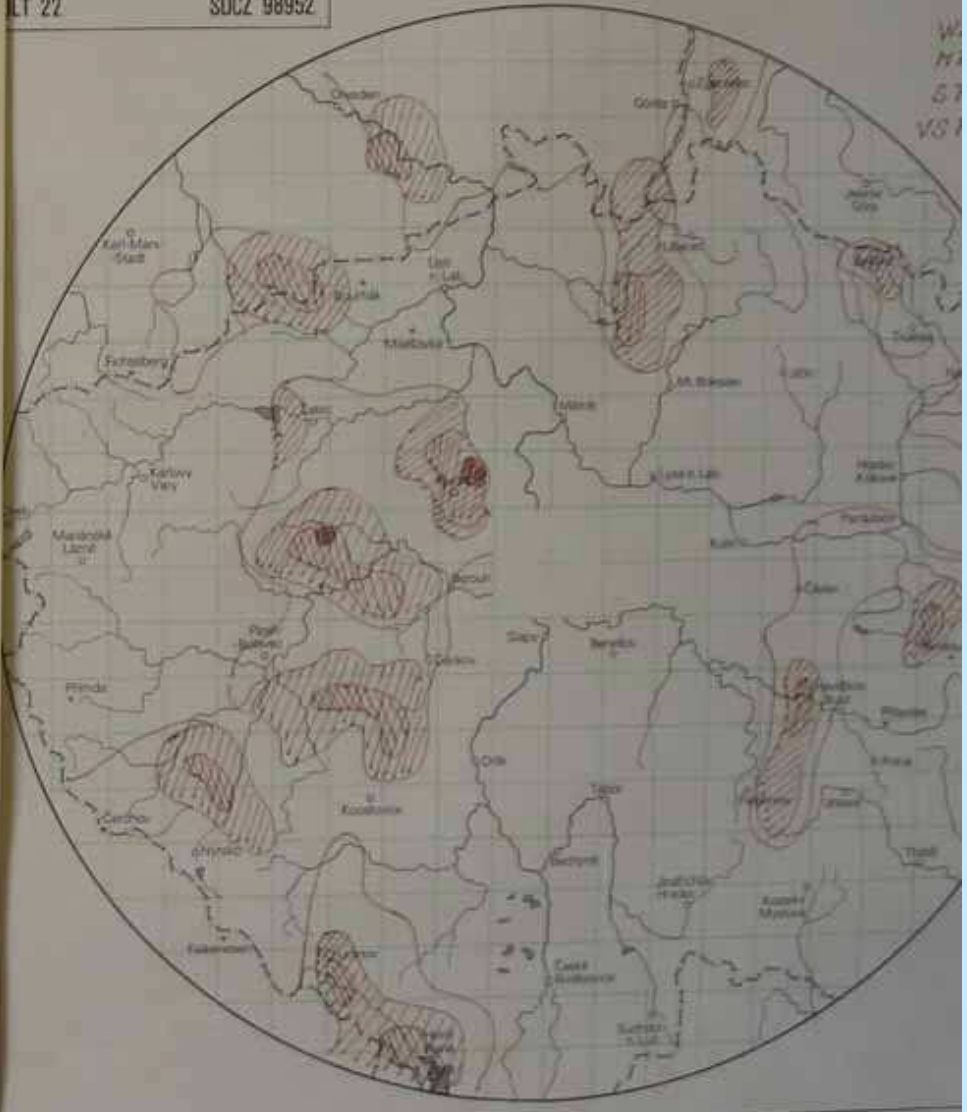
ETRNOSTNÍ SLUŽBA ČSSR DATUM: 24. 7. 1988 ČAS: 15,30 GMT ROZSAH: 300 KM
 11520 RADIOLOKAČNÍ SITUACE (OBLAČNOST A JEVY)
 SOCZ 98951

Hra + lg 25



RUČNÍ ZPRACOVÁNÍ

POVĚTRNOSTNÍ SLUŽBA ČSSR DATUM: 24. 7. 1988 ČAS: 15,30 GMT ROZSAH:
 STANICE: 11520 RADIOLOKAČNÍ ROZLOŽENÍ INTENZITY S
 LT 22 SOCZ 98952



W
 H
 S
 VS

Poslední desetiletí - 1993-2003 - výsledky

Výstavba automatické radiolokační sítě:

1993-95 projekce a výstavba radarové stanice Skalky u Boskovic;

1995 instalace radaru Gematronik M-360 AC na stanici Skalky,
tvorba a distribuce informace sloučené s radarem MRL-5
stanice Libuš;

1996 operativní provoz M-360 AC v 10-ti minutovém režimu;

1998 Spol. s AČR projekce věže a objektu pro rad. stanici Brdy,
vrch Praha;

1999 výstavba věže a instalace radaru EEC DWSR-2501 C;

2000- plné zprovoznění radaru EEC DWSR-2501 C na Brdech;
- zrušení radarové stanice 11520 Libuš MRL-5;

2002 modernizace radaru M-360 AC Skalky, zavedení 5-ti
minutového snímání na obou radarech.

Plně automatický operativní provoz sítě i distribuce dat

Stanice SKALKY



Stanice BRDY-PRAHA

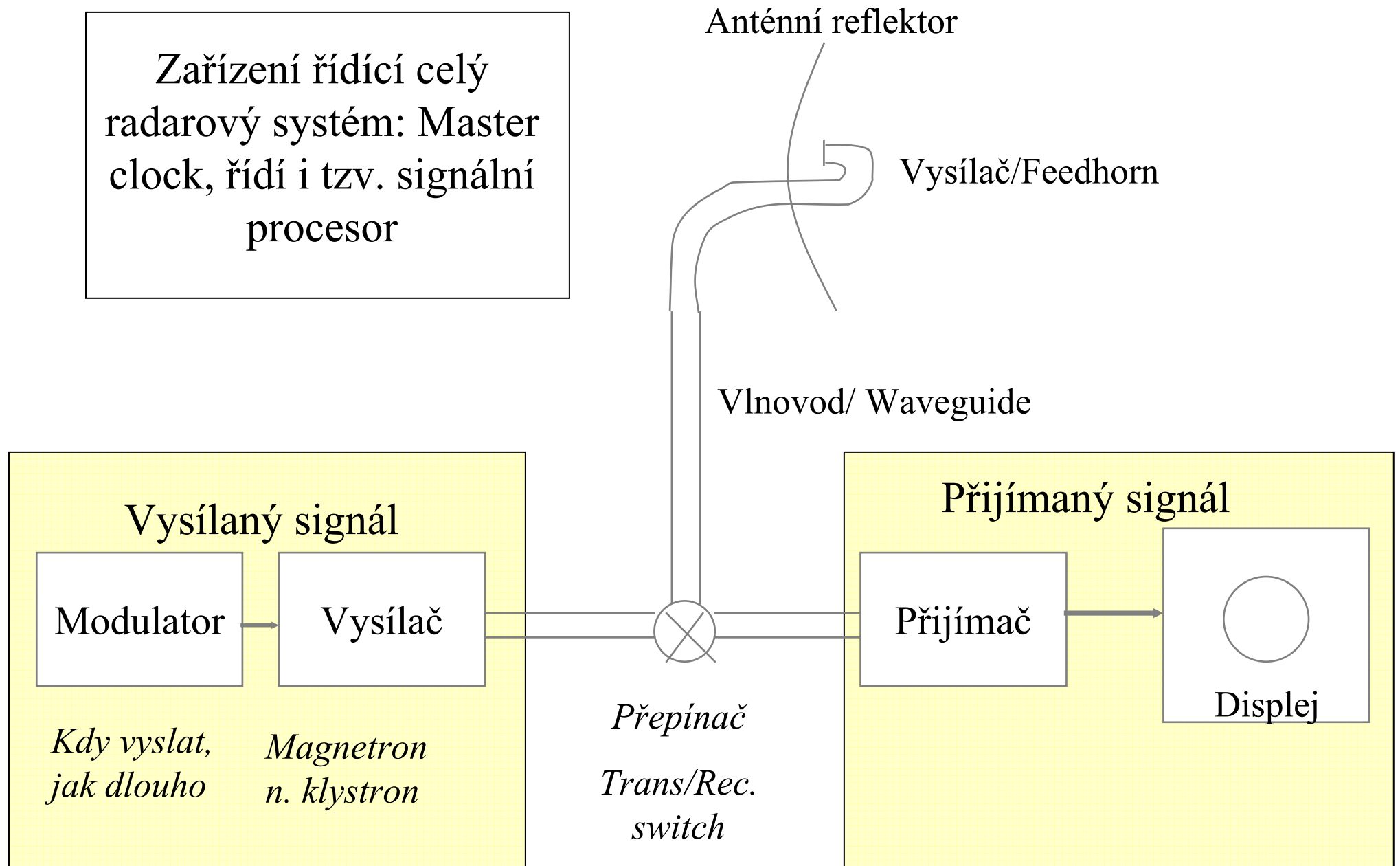


Meteorologické radary

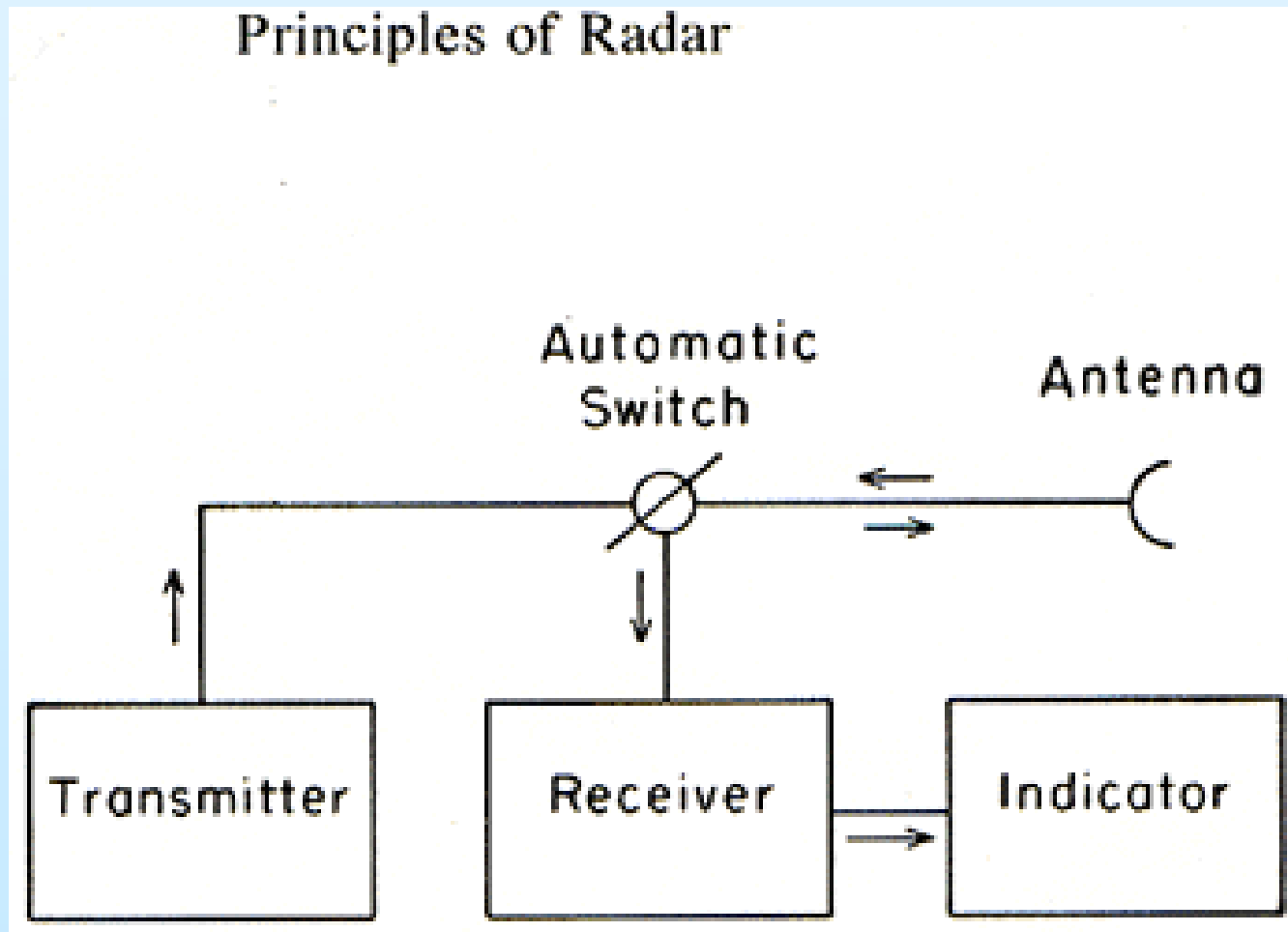
- Princip:
 - Vysílá v pulsech elmg. záření
 - Část emitované energie je odražena meteorologickými i jinými cíly
 - Odražená energie je detekovaná přijímačem.
 - Pozice cíle je určována pomocí znalosti pozice (azimutu a elevace) antény a časem, který uplynul mezi vysláním pulsu a detekcí odraženého záření
 - Intenzita odrazu je úměrná odrazivosti cíle



Zjednodušené blokové schéma radaru



Velmi zjednodušené blokové schéma radaru



Meteorologické radary (pokr.)

- PRF – Pulse Repetition Frequency – počet pulsů za sekundu (500-3000 Hz)
- τ – trvání pulsu (0.1-10 μs , často 2 μs)
- h – délka pulsu (pro 2 μs : 600 m)
- Část energie obsažené v pulsu je odrážena k radaru

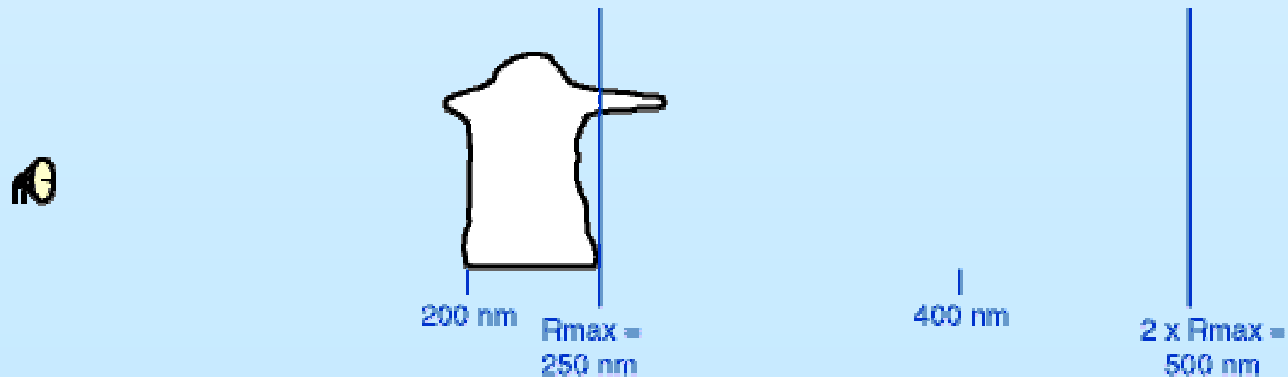
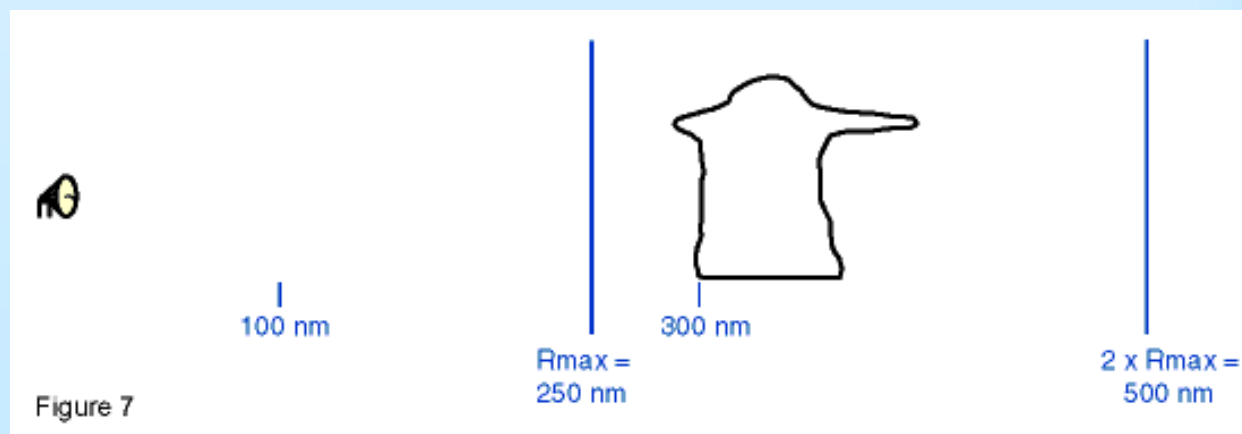


Figure 6

Maximální jednoznačná vzdálenost cílů

- Odraz od cíle musí „stihnout“ doběhnout k cíli a k radaru (tj. $2 \times R_{\max}$) před vysláním dalšího pulsu, tj.
- $2R_{\max} = c \cdot T$, T je doba mezi vysláním pulsu, čili $T = 1/\text{PRF}$
- $R_{\max} = c / (2 \cdot \text{PRF})$



Anténa

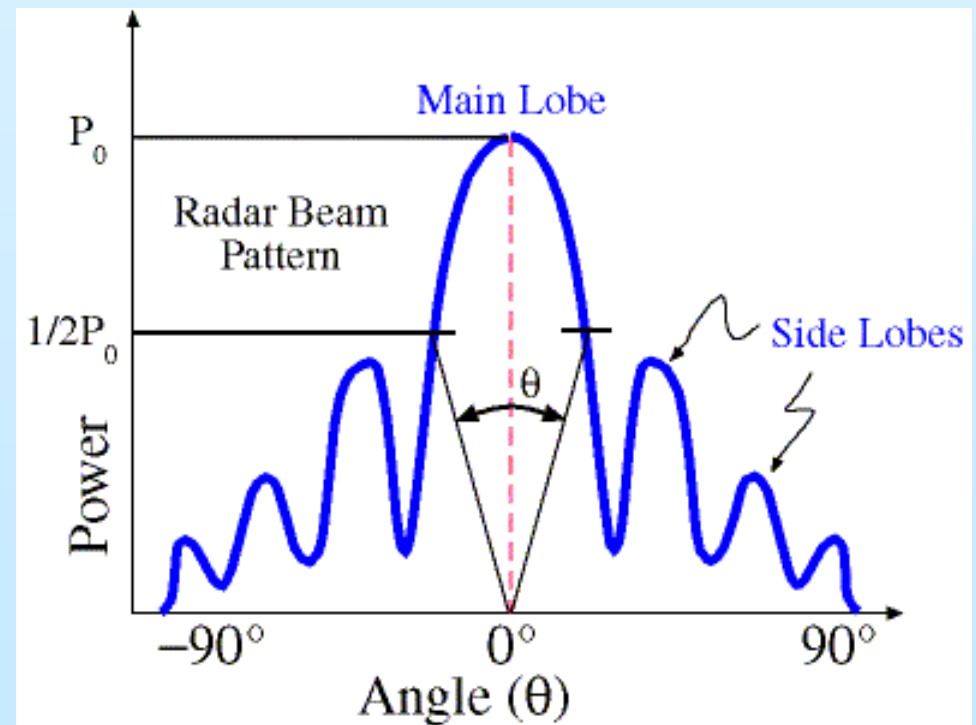
- Antény: izotropní, směrové
- Radar: směrové antény
- Vysílací část (vlastní anténa – feedhorn) a odražeč (reflector)
- Anténní odražeč (rotační paraboloid) směruje radarový signál do prostoru v určeném směru
- Větší anténa => lepší směrování (závislé na vlnové délce; větší vln. délky => horší směrování)
- Tvar radarového paprsku (radar beam) vysílaného z parabolického odražeče: úzký kužel o vrcholovém úhlu 1°

Anténa

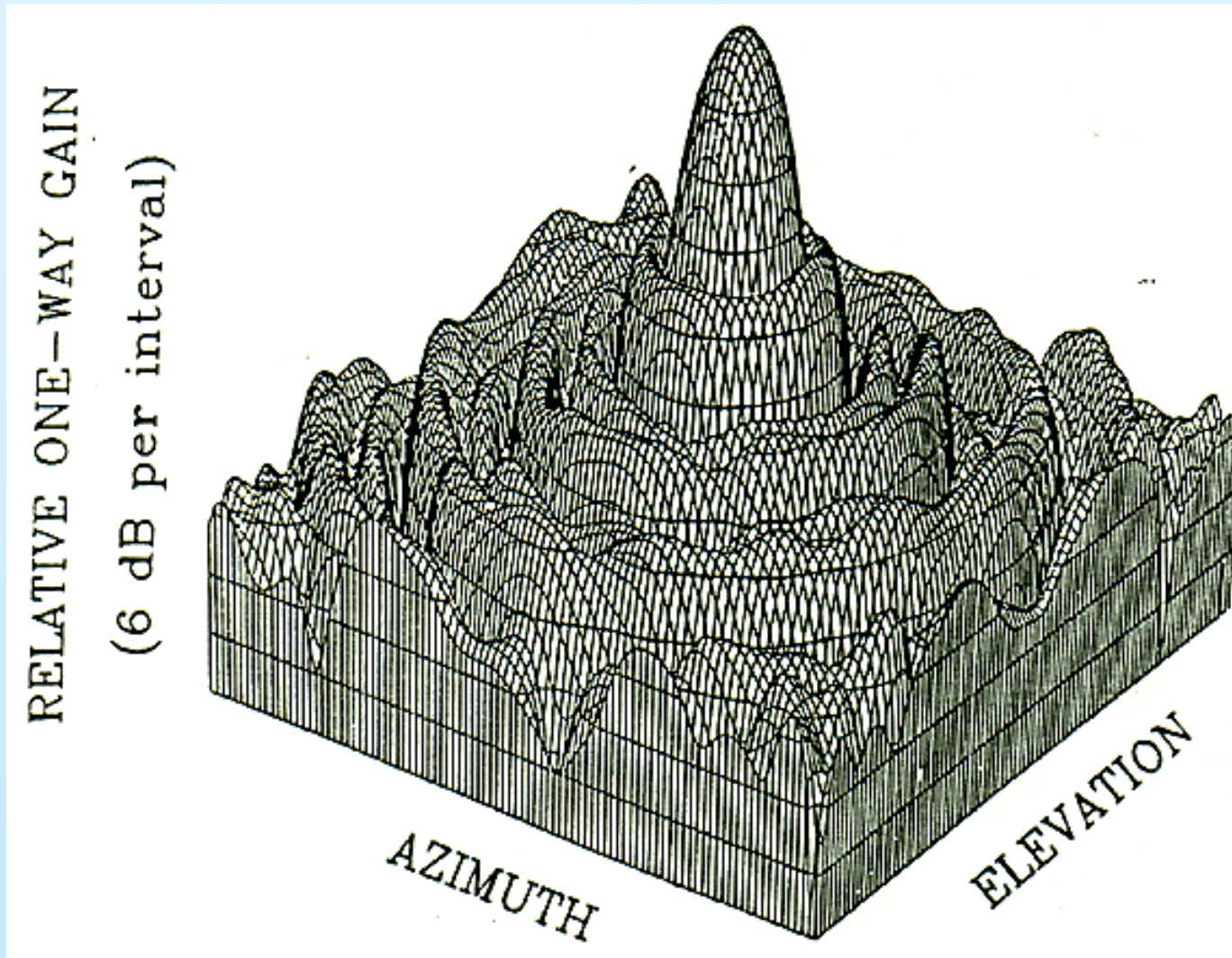
- Velikost antény: průměr – jednotky metrů
- Zisk antény: $G[dB]=10.\log(p_{in_beam}/P_{isotr})$
- G : 20-45 dB ($g=10^G/10$)

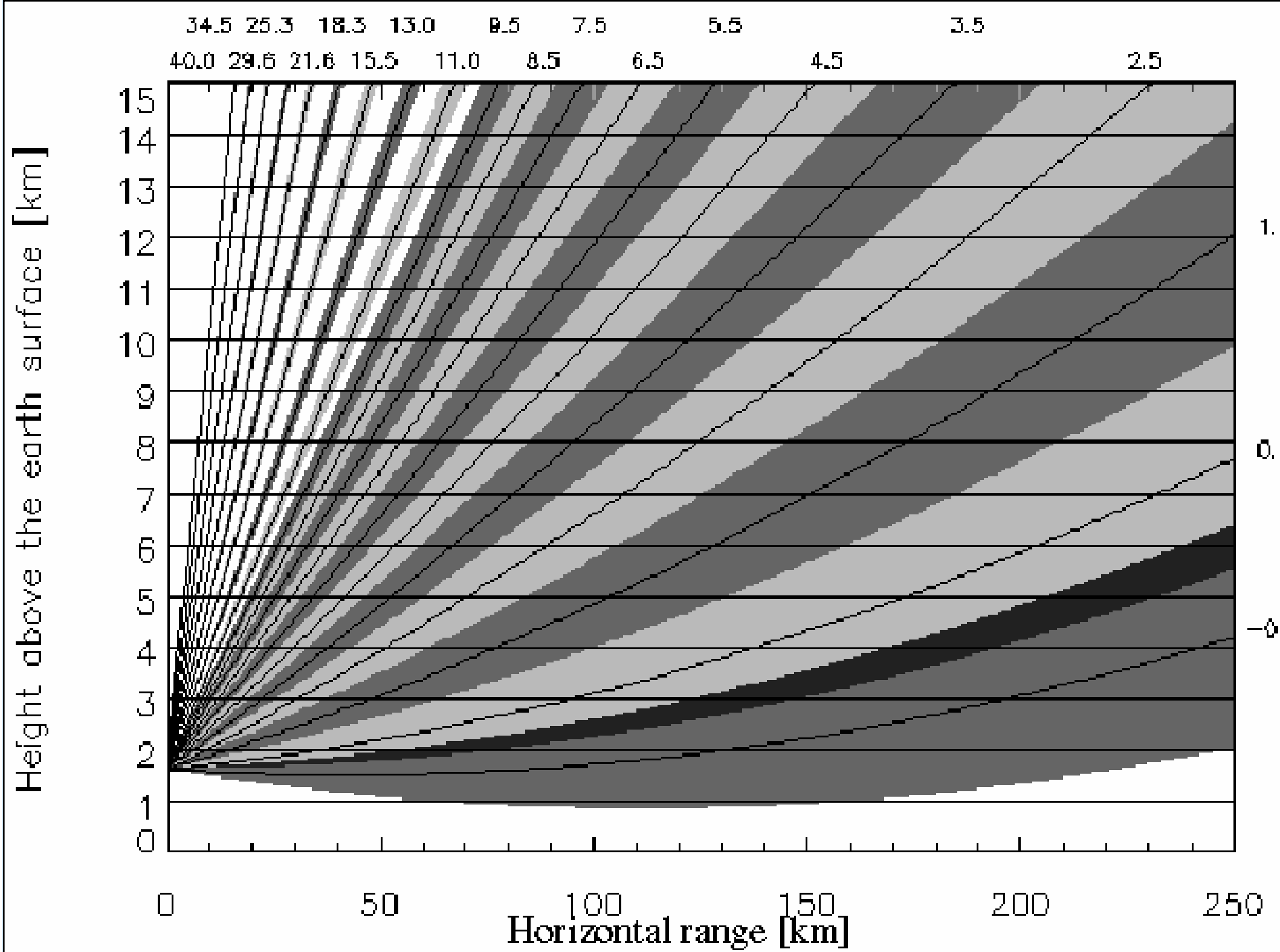
Konvenční šířka radarového svazku („paprsku“, angl. beam): Omezena polovinou max. intenzity (3dB)

Kromě hlavního laloku vysílá anténa i (nepříliš žádoucí) boční laloky (side lobes)



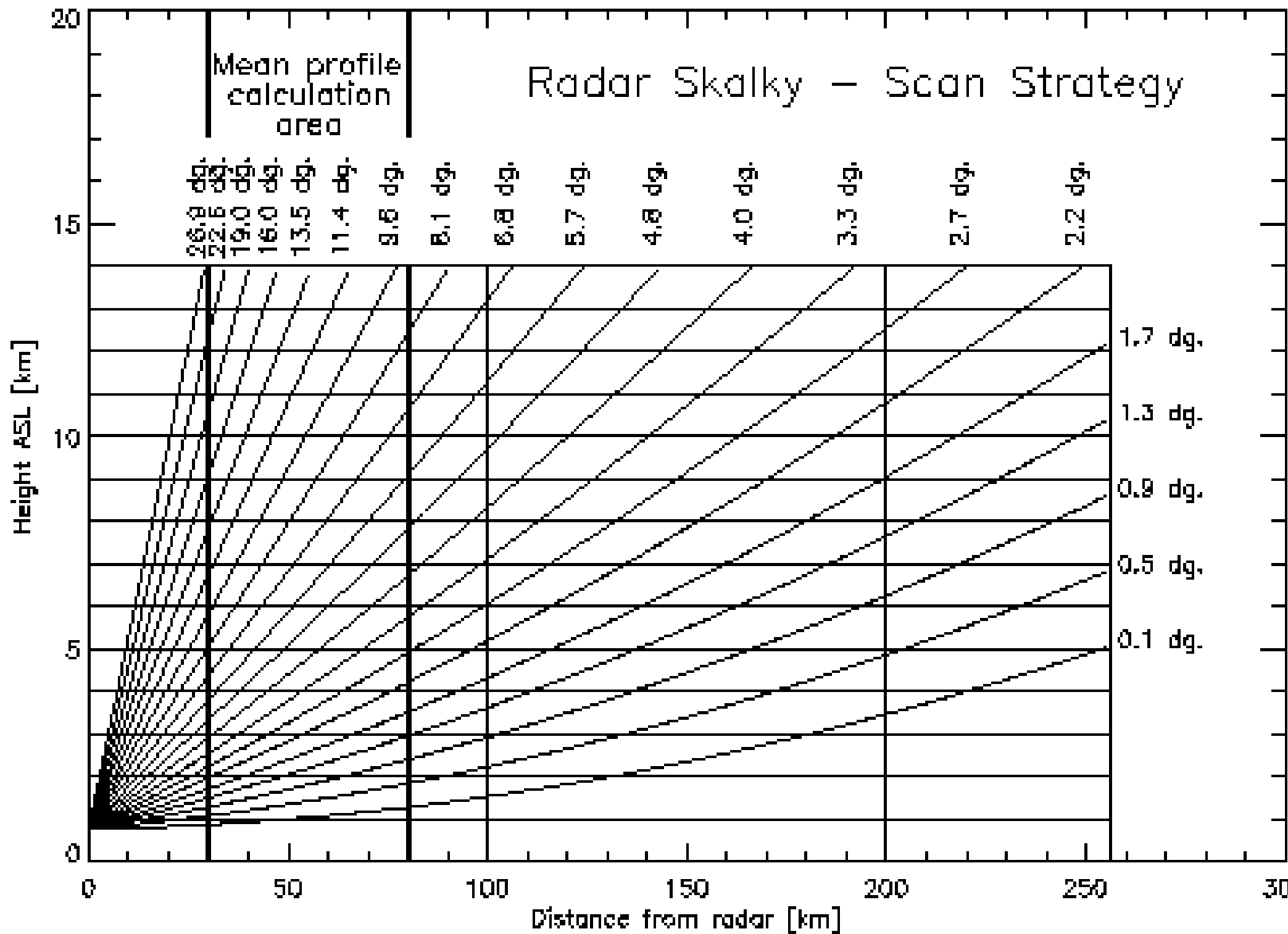
3D pohled na radarový paprsek





Radar Skalky - Scan Strategy

Mean profile
calculation
area



Elmg. vlny

- elektrické a magnetické vlny, navzájem kolmé
- frekvence ($f=c/\lambda$) využívaná radary:
 - 100 MHz-100 GHz
- Met. radary:
- S-band (2-4GHz, 15-8 cm)
- **C-band (4-8GHz, 8-4 cm)**
- X-band (8-12GHz, 4-2.5 cm)

Šíření radarových vln – index lomu N

$$N \equiv (n - 1)10^6 \cong 300$$

$$N = \frac{77.6}{T} \left[P + 4810 \frac{e}{T} \right] - 4.03 \cdot 10^7 \frac{N_e}{f^2}$$

T [K] – teplota vzduchu

e [hPa] – parc. tlak vodní páry

P [hPa] – tlak vzduchu

f – frekvence elmg. vln

N_e – počet volných elektronů v m^3

Nejdůležitější je závislost na teplotě a vlhkosti
vzduchu

Standardní refrakce

$$\frac{\delta N}{\delta H} = -39 \text{ [N jednotek/km]}$$

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{\delta n}{\delta z}$$

$R' = 8272 \approx 4/3R$ - efektivní / ekviv. poloměr Země

$$H = \sqrt{r^2 + R'^2 + 2rR' \sin \Theta} - R' + H_0$$

r - vzdálenost od radaru

Θ - elevační úhel

H_0 - výška antény nad referenční hladinou (moře)

Typy refrakce

A – subrefrakce (záporná refrakce)

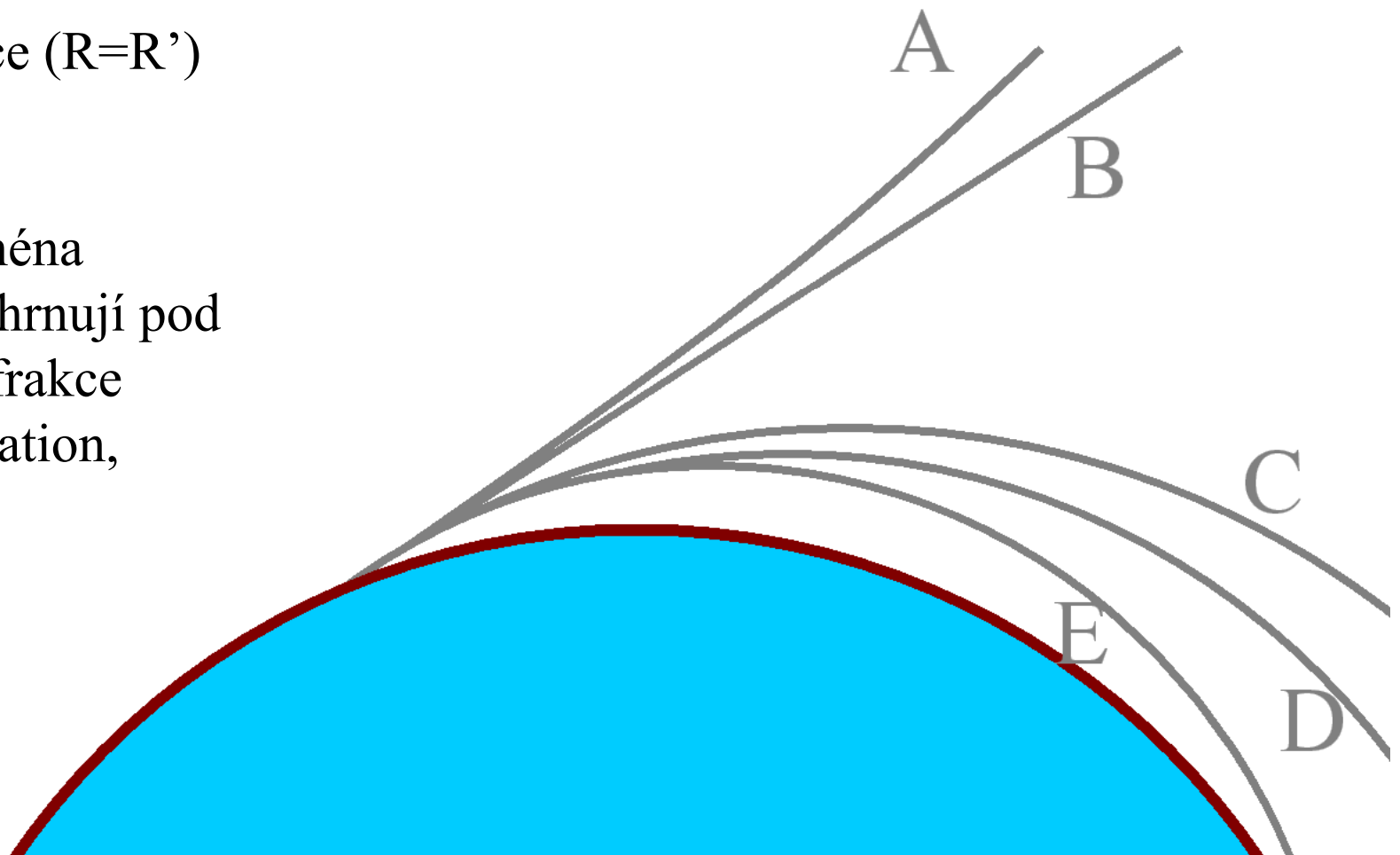
B – nulová refrakce

C – standardní refrakce ($R' \approx 4/3 R$)

D – kritická refrakce ($R = R'$)

E – superrefrakce

(subrefrakce a zejména superrefrakce se zahrnují pod pojem anomální refrakce (anomalous propagation, ANAPROP))



Život v logaritmech

$$x[\text{dB}] = 10 \cdot \log_{10}(x)$$

dB	$10^{(x/10)}$
0	1,0
1	1,3
2	1,6
3	2,0
4	2,5
5	3,2
6	4,0
7	5,0
8	6,3
9	7,9
10	10,0
11	12,6
12	15,8
13	20,0
14	25,1
15	31,6
16	39,8
17	50,1
18	63,1
19	79,4
20	100,0

Odvození radarové rovnice pro bodové cíle

Izotropní vyzařování : plocha $4\pi r^2$

$$\text{intenzita záření } S = \frac{P_t}{4\pi r^2}$$

P_t – množství energie vyzařované anténou

$$G = 10 \log_{10}(g), \quad g = \left[\frac{\text{intenzita záření směrové antény}}{\text{izotropní vyzařování}} \right]$$

$$P_\sigma = \frac{P_t g A_\sigma}{4\pi r^2}$$

P_σ – množství energie zachycené cílem

A_σ – plocha cíle

Odvození radarové rovnice pro bodové cíle (pokr.)

$$P_r = \frac{P_\sigma A_e}{4\pi r^2}$$

P_r – množství energie přijaté anténou

A_e – efektivní plocha antény

$$A_e = \frac{g\lambda^2}{4\pi}$$

$$P_r = \frac{P_t g^2 \lambda^2 A_\sigma}{64\pi^3 r^4} = \frac{P_t g^2 \lambda^2 \sigma}{64\pi^3 r^4}$$

σ – efektivní plocha zp. rozptylu

Efekt. plocha zpětného rozptylu σ rozptylující částice je zdánlivá oblast (plocha) zachycující (původní) záření $p_t (I_0)$, které vytváří ve vzdálenosti r intenzitu záření (izotropním vyzařováním)

$$I(r) = I_0 \frac{\sigma}{4\pi r^2}$$

$$\text{Pro } D/\lambda > 10 : \sigma = \pi r^2$$

Pro $D/\lambda < 0.1$ (Rayleighova oblast):

$$\sigma [m^2] = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} |K_m|^2$$

$|K_m|^2$ - dielektrická konstanta vody (0,93)

m - komplexní index lomu (zahrnující útlum)

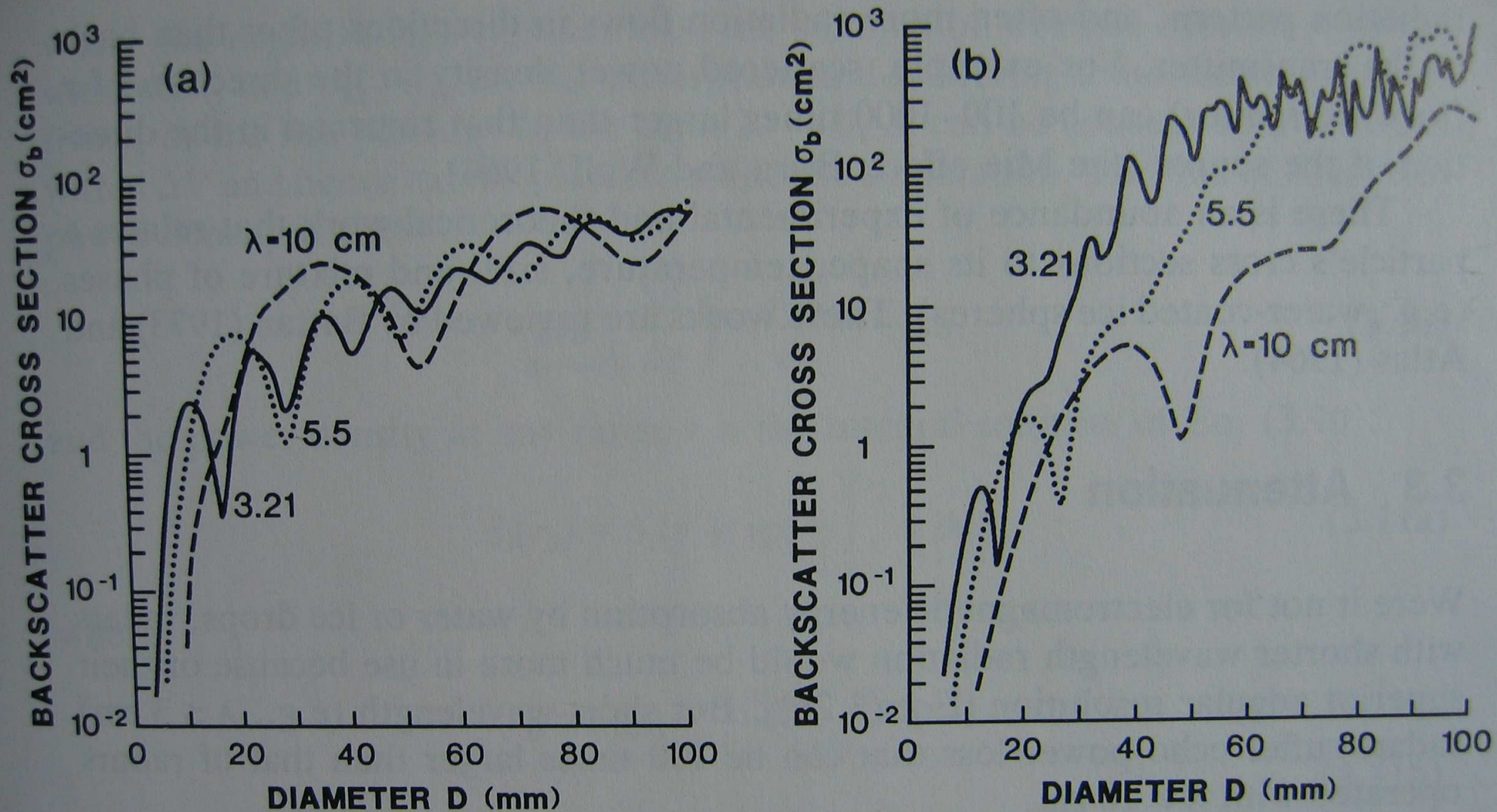


Fig. 3.3 Backscattering cross section σ_b for spheres: (a) Liquid water; the complex relative permittivity m^2 (at 0°C) is $80.255 + j24.313$, $65.476 + j37.026$, and $44.593 + j41.449$ at wavelengths of 10 cm, 5.5 cm and 3.21 cm (Ray, 1972). (b) Ice (m^2 is $3.16835 + j0.02492$, $3.16835 + j0.01068$, and $3.16835 + j0.0089$) at the indicated wavelengths (computed by N. Balakrishnan, Indian Institute of Science, Bangalore, India).

Objemové cíle

- kontinentální oblak: až 2×10^8 kapek v m^3
- 1° paprsek zachytí ve vzdálenosti 57 km v ve snímaném objemu o délce 150 m: **2×10^{16} kapek**
- **Padající srážky:** 10^9 - 10^{12} kapek

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^n \sigma_i$$

Snímaný elementární (rozlišitelný) objem

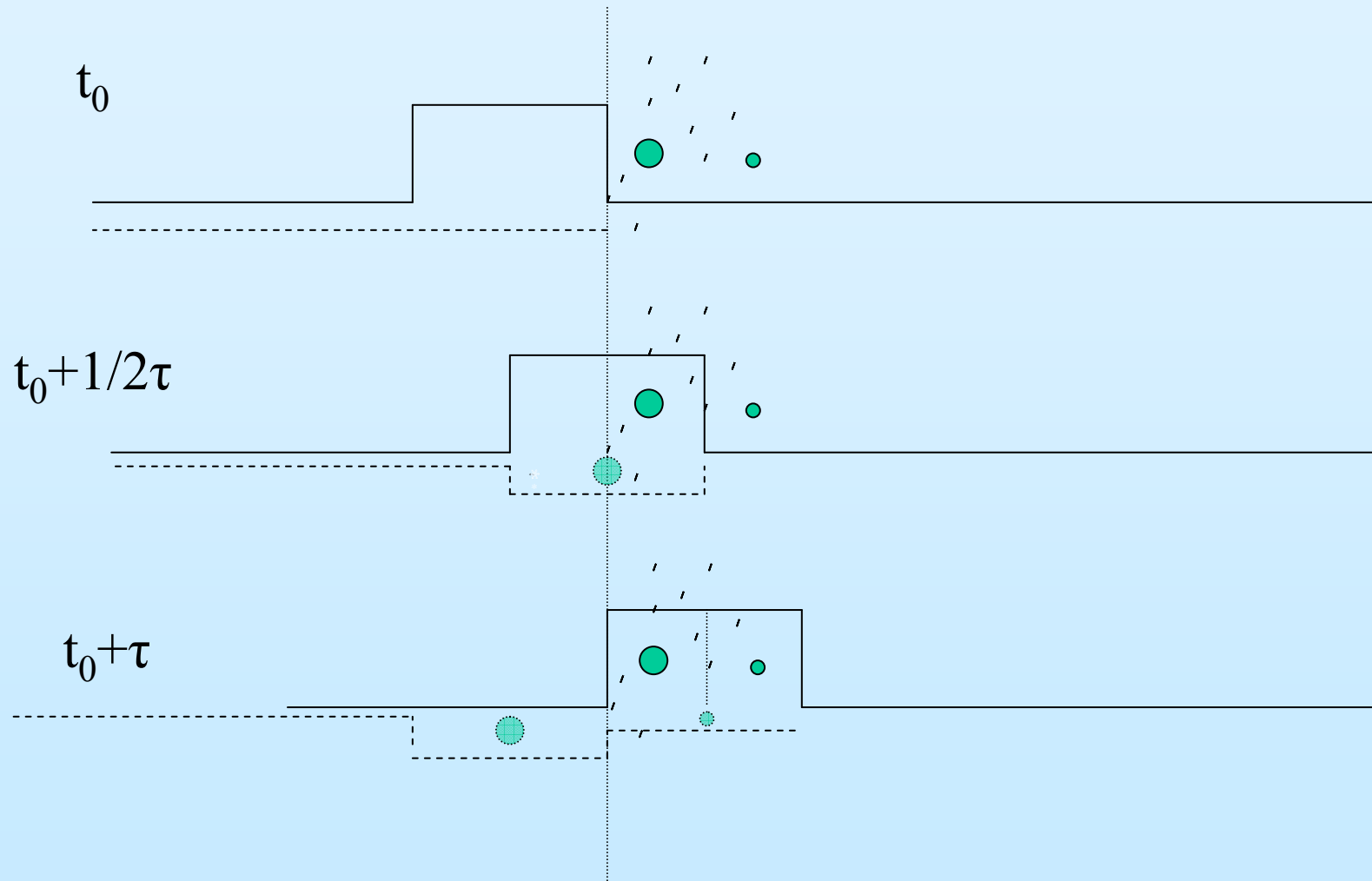
$$V = \pi \frac{r\Phi}{2} \frac{r\Theta}{2} \frac{h}{2}$$

Φ, Θ – horizontální a vertikální šířka
anténního svazku

$$V = \pi \frac{r^2\Phi\Theta}{4} \frac{h}{2}$$

$$V = \pi \frac{r^2\Phi^2}{4} \frac{h}{2} \quad \text{při} \quad \Phi = \Theta$$

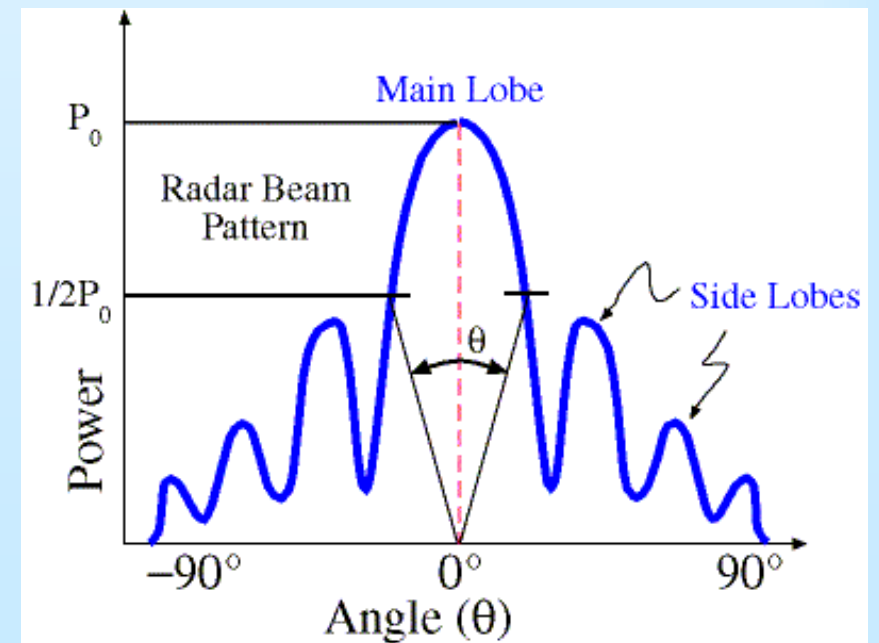
Snímaný elementární (rozlišitelný) objem



Snímaný objem

Protože v paprsku omezeném hranicemi 3dB je pouze část záření antény, musíme dělit faktorem $2\ln(2)$, což dává:

$$V = \pi \frac{r^2 \Phi \Theta h}{16 \ln(2)}$$



Radarová rovnice pro objemové cíle

$$P_r = \frac{p_t g^2 \lambda^2 \Phi \Theta h \sum \sigma_i}{1024 \ln(2) \pi^2 r^2}$$

Efektivní plocha zpětného rozptylu

(virtuální) ekvivalentní plocha rozptylující částice vyžadovaná pro izotropně odražené záření k tomu, aby přijímač dostal skutečně přijaté (odražené) záření

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K_m|^2 D_i^6}{\lambda^4}$$

$$\text{voda} : |K|^2 = 0.93$$

$$\text{led} : |K|^2 = 0.197$$

Předpokládáme, že srážky obsahují pouze dešťové kapky, proto používáme $|K|^2=0.93$

Radarová rovnice pro objemové cíle

$$P_r = \frac{\pi^3 p_t g^2 \Phi \Theta h |K|^2 \sum D_i^6}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2}$$

Radiolokační odrazivost

$$z = \sum D_i^6$$

Radarová rovnice pro objemové cíle

útlum (attenuation) na dráze: l

(útlum způsobený atm. plyny je blízký 1)

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t g^2 \Phi \Theta h |\mathbf{K}|^2 lz}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2}$$

Zjednodušená radiolokační rovnice pro objemové cíle

$$p_r = \Pi_M \frac{Z}{r^2} l \text{ se zahrnutím útlumu}$$

(používá se v současných radarech)

$$p_r = \Pi_M \frac{Z}{r^2} \text{ bez zahrnutí útlumu}$$

Π_M – meteorologický potenciál radaru

(radarová "konstanta")

Předpoklady pro odvození radarové rovnice pro objemové srážkové cíle

- Rozptylující srážkové částice v cílové m objemu jsou homogenní dielektrické koule jejichž průměr je výrazně menší než vlnová délka záření (v C-pásmu aspoň $D < 3,2$ mm pro splnění podmínek Rayleighova rozptylu)
 - D do 6 mm nezpůsobují podstatné chyby
- Snímaný objem je zcela zaplněn náhodně rozmístěnými srážkovými částicemi (může být použit faktor objemového zaplnění, je-li možno jej odhadnout)

Předpoklady pro odvození rad. rovnice pro objemové sráž. cíle (pokr.)

- Odrazivost (reflectivity factor) je stejná v celém snímaném objemu a konstantní během času snímání. Silné gradienty mohou způsobovat chyby
- Částice jsou buď pouze vodní kapky nebo (sférické) ledové částice, tj. faktor $|K|$ je stejný pro všechny částice
- Vícenásobný rozptyl je zanedbatelný

Předpoklady pro odvození rad. rovnice pro objemové sráž. cíle (pokr.)

- Původní a odražené záření je lineárně polarizované (je v jedné rovině)
- Tvar hlavního vyzařovaného laloku (svazku, paprsku) antény má gaussovský tvar (je možné jej modelovat normálním rozdělením)
- Příspěvek postranních laloků je zanedbatelný (platí jestliže postranní laloky mají intenzitu o 20 dB menší než hlavní paprsek)

Předpoklady pro odvození rad. rovnice pro objemové sráž. cíle (pokr.)

- Anténa je parabolický reflektor kruhového průřezu o známém zisku
- Absorpce vysílaného signálu pozemními cíly je zanedbatelná
- Všechny ztráty výkonu/intenzit v systému jsou známé a zahrnuté do výpočtů
- přijaté záření je průměrováno pro dostatečný počet pulsů nebo nezávislých vzorků (snímaných objemů) pro získání dostatečně reprezentativního měření

Efektivní (ekvivalentní) radarová odrazivost

- mimo obor platnosti Rayleighova rozptylu se používá efektivní (ekvivalentní) radiolokační odrazivost Z_e
- Efektivní radr. odrazivost: suma 6. mocnin sférických vodních kapek, které by zpětně rozptýlily (odrazily) skutečně přijaté záření
- při pravděpodobném výskytu nesférických nebo velkých částic či pevných srážek je vhodnější značit odrazivost Z_e

Efektivní (ekvivalentní) radarová odrazivost (pokr.)

$$\text{sférické vodní kapky : } p_r = C \frac{|K|_w^2 z}{r^2} l$$

$$\text{sférické ledové částice : } p_r = C \frac{|K|_i^2 z_e}{r^2} l$$

$$z_e = \frac{|K|_i}{|K|_w} z \approx 0.21z \text{ (-6,7dB)}$$

Efektivní (ekvivalentní) radarová odrazivost (pokr.)

$$\text{sférické vodní kapky : } p_{rw} = C \frac{|K|_w^2 z_e l}{r^2}$$

$$\text{sférické ledové částice : } p_{ri} = C \frac{|K|_i^2 z_e l}{r^2}$$

$$p_{ri} = \frac{|K|_i}{|K|_w} p_{rw} \approx 0.21 p_{rw} \text{ (-6,7dB)}$$

Příklady hodnot odrazivosti a intenzity srážek pro déšť a sníh

	Intenzita srážek	
	1 mm/h	10 mm/h
z_e – déšť	23	39
z_e – sníh	26	48

Radiolokační odrazivost

- Může být nezávisle měřena disdrometry (zařízení pro měření velikosti většího množství kapek)
- Může mít hodnoty od 0.001 [mm⁶/m³] do 50000000 [mm⁶/m³], proto využíváme spíše logaritmus odrazivosti

$$Z[\text{dbz}] = 10 \log_{10} \left[\frac{z}{1 [\text{mm}^6/\text{m}^3]} \right] = 10 \log_{10}(z)$$

Úkol č. 5

- V jednom m^3 je jedna sférická kapka. Znázorněte (tabulkou a grafem) závislost radiolokační odrazivosti na průměru této kapky v mezích 0.1 až 5 mm. V tabulce vypočtete odrazivost jak v původních jednotkách odrazivosti [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$], tak v dBz

Úkol č. 6

- Radarový svazek (paprsek) má úhlovou šířku 1 stupeň. Znázorněte geometrický průměr radarového paprsku v závislosti na vzdálenosti od 0 do 260 km. V jaké vzdálenosti má přibližný průměr 1 km?