

# Meteorologické radary I.

Rozdělení velikosti kapek, historie radaru, technika,  
radiolokační rovnice

Milan Šálek

(s pomocí kolegů z Radarového oddělení ČHMÚ)

[salek@chmi.cz](mailto:salek@chmi.cz)

# Rozdělení velikosti kapek

- Vedle intenzity srážek je to nejužívanější charakteristika kapalných srážek
- Počet kapek podle velikosti v jednotce objemu ( $\text{m}^3$ )
- 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)

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

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

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

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

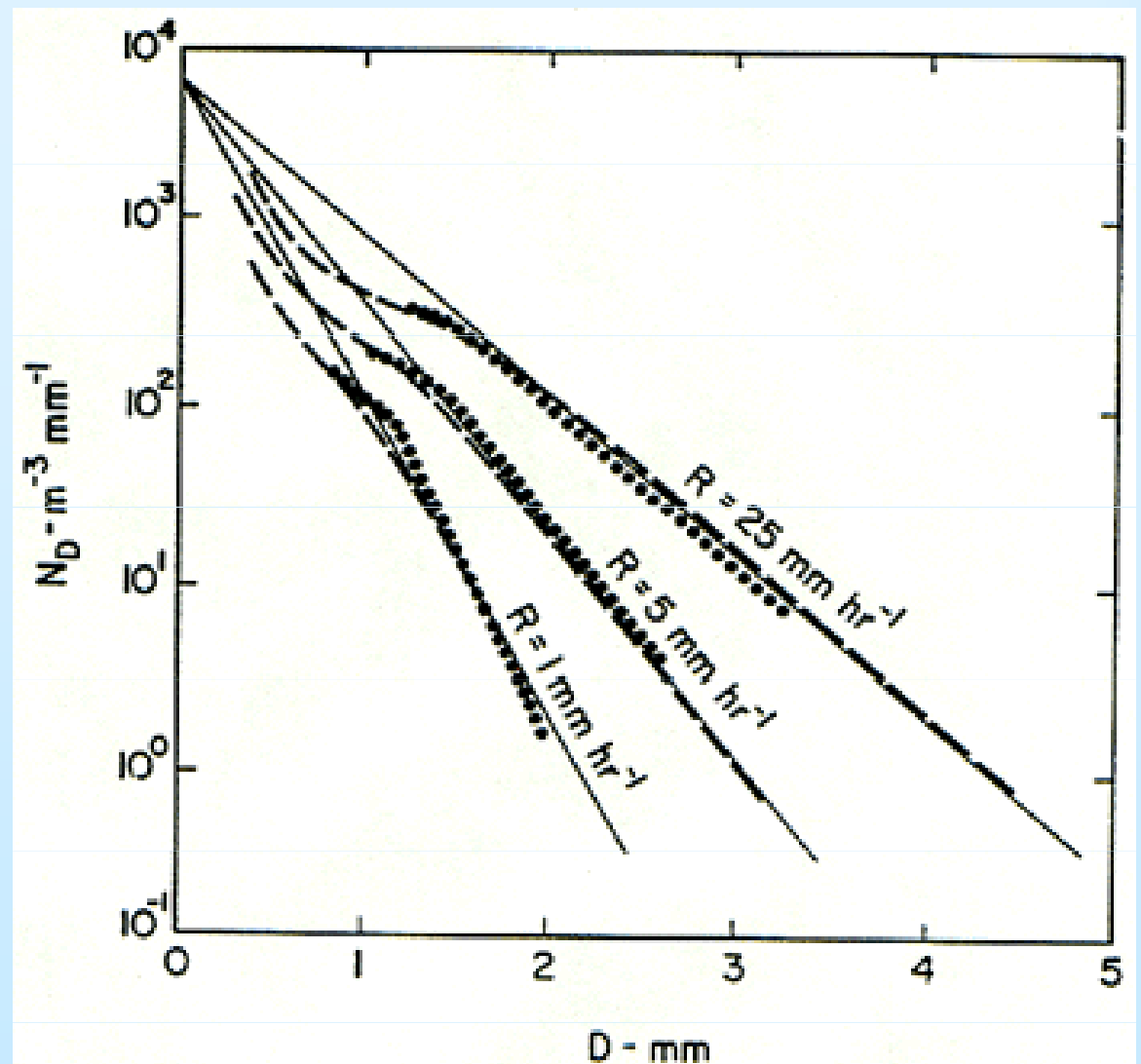
- Marshall a Palmer (1948)

# 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)



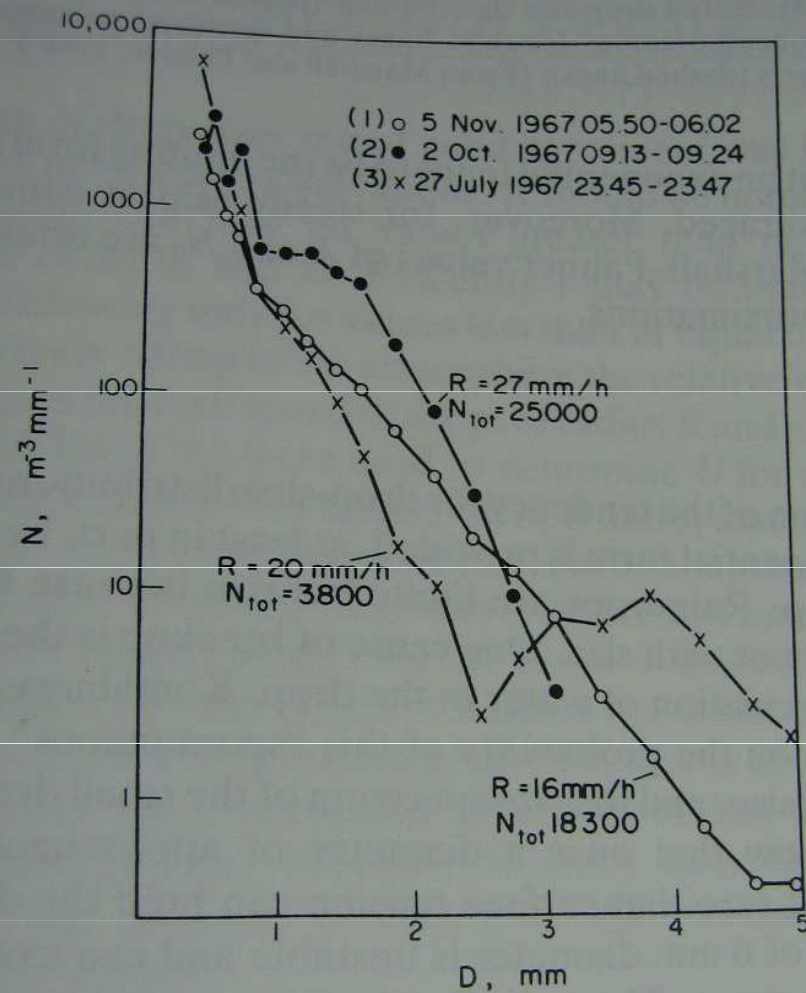


FIG. 10.1. Examples of measured drop-size distributions in rain. Indicated for each curve are the duration of the observation, the total number of drops counted, and the average rainfall rate. Distributions 1 and 2 were recorded during nearly constant rain; distribution 3 was recorded during a thunderstorm.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

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

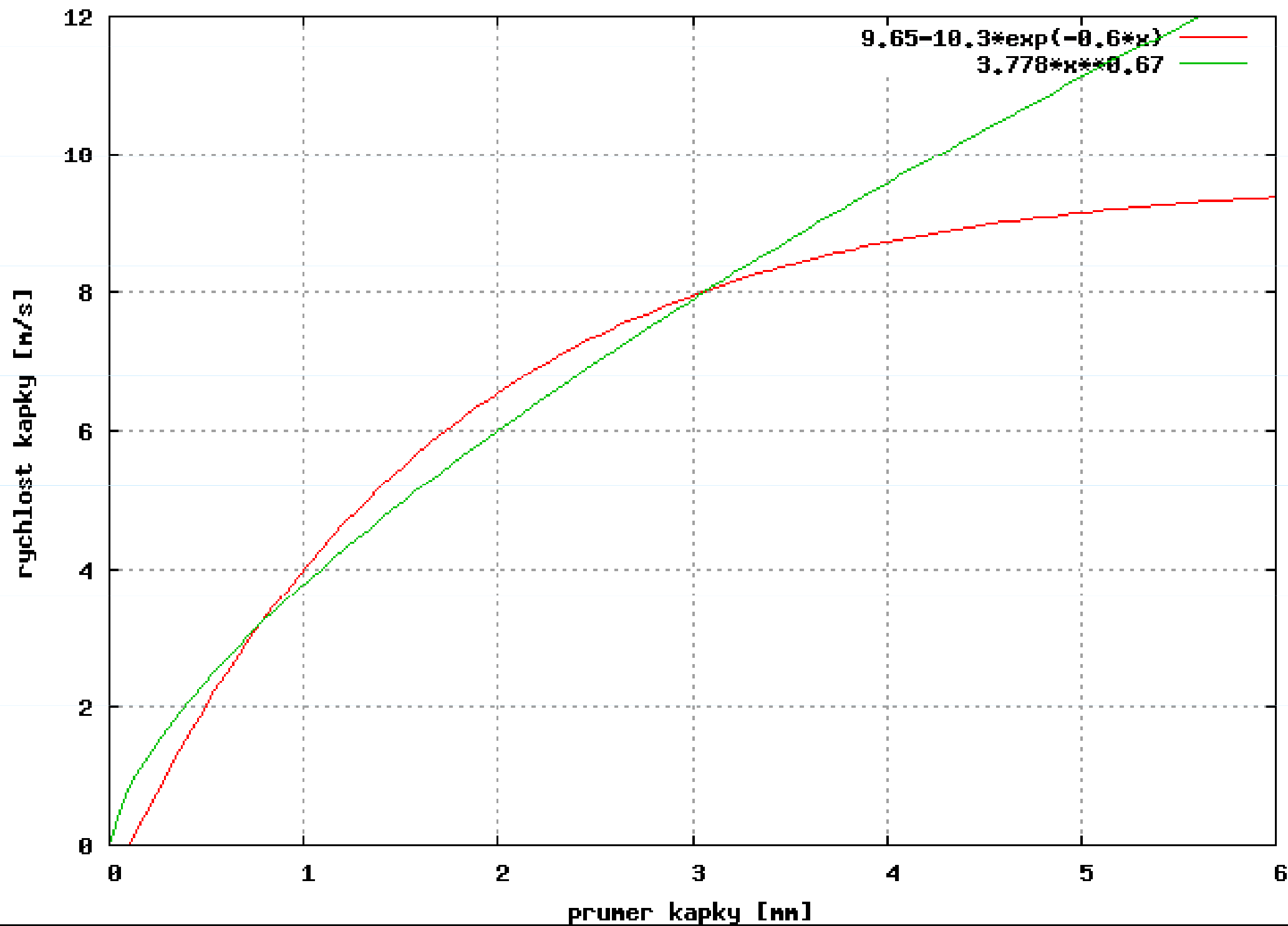
Pro  $D$  do 5 mm platí zjednodušený vzorec :

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

$D$  [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

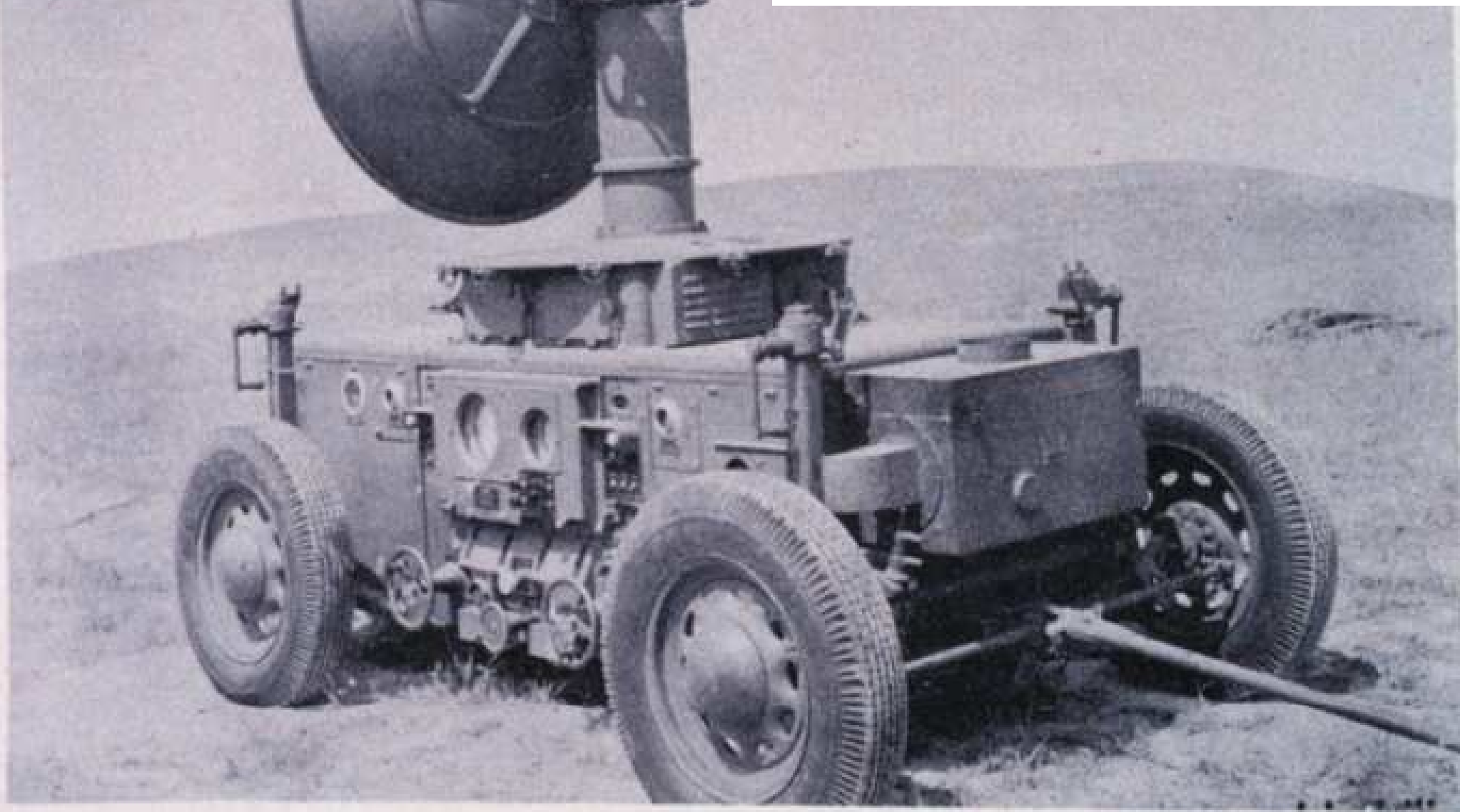
# Úvod do meteor. radarů (pokr.)

- 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“.

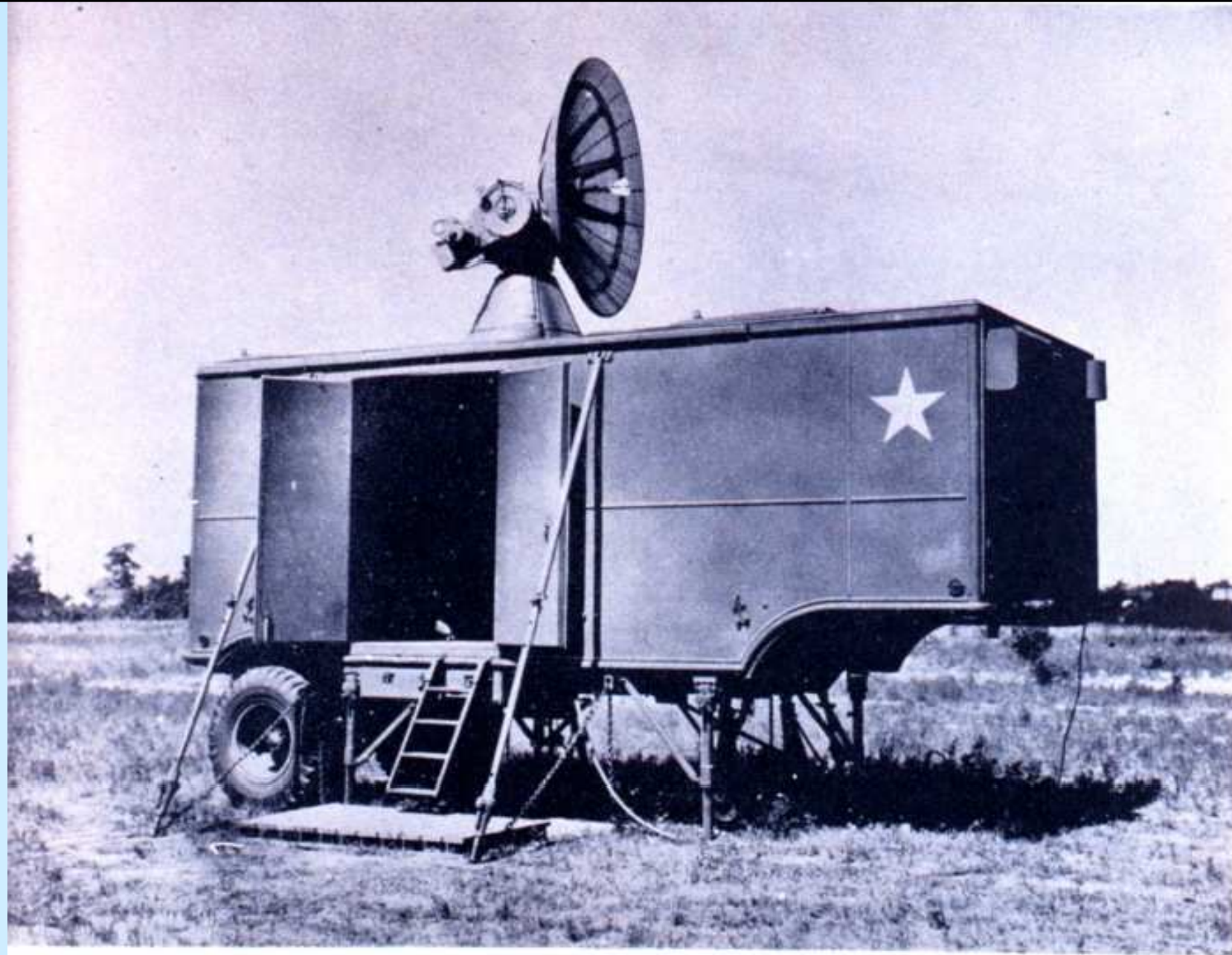


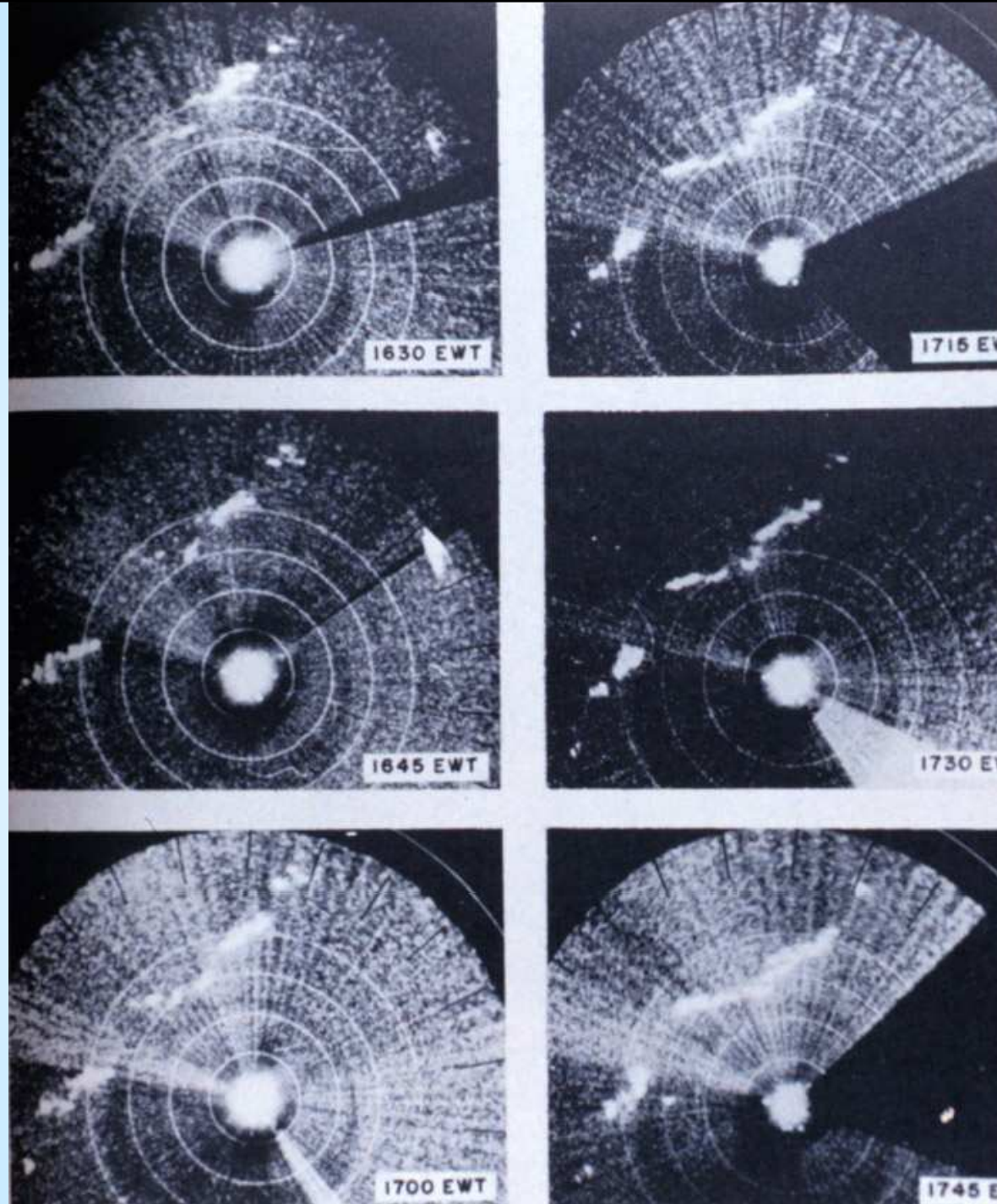
Figure 22. Exterior View of Radio Set SCR-584.



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.

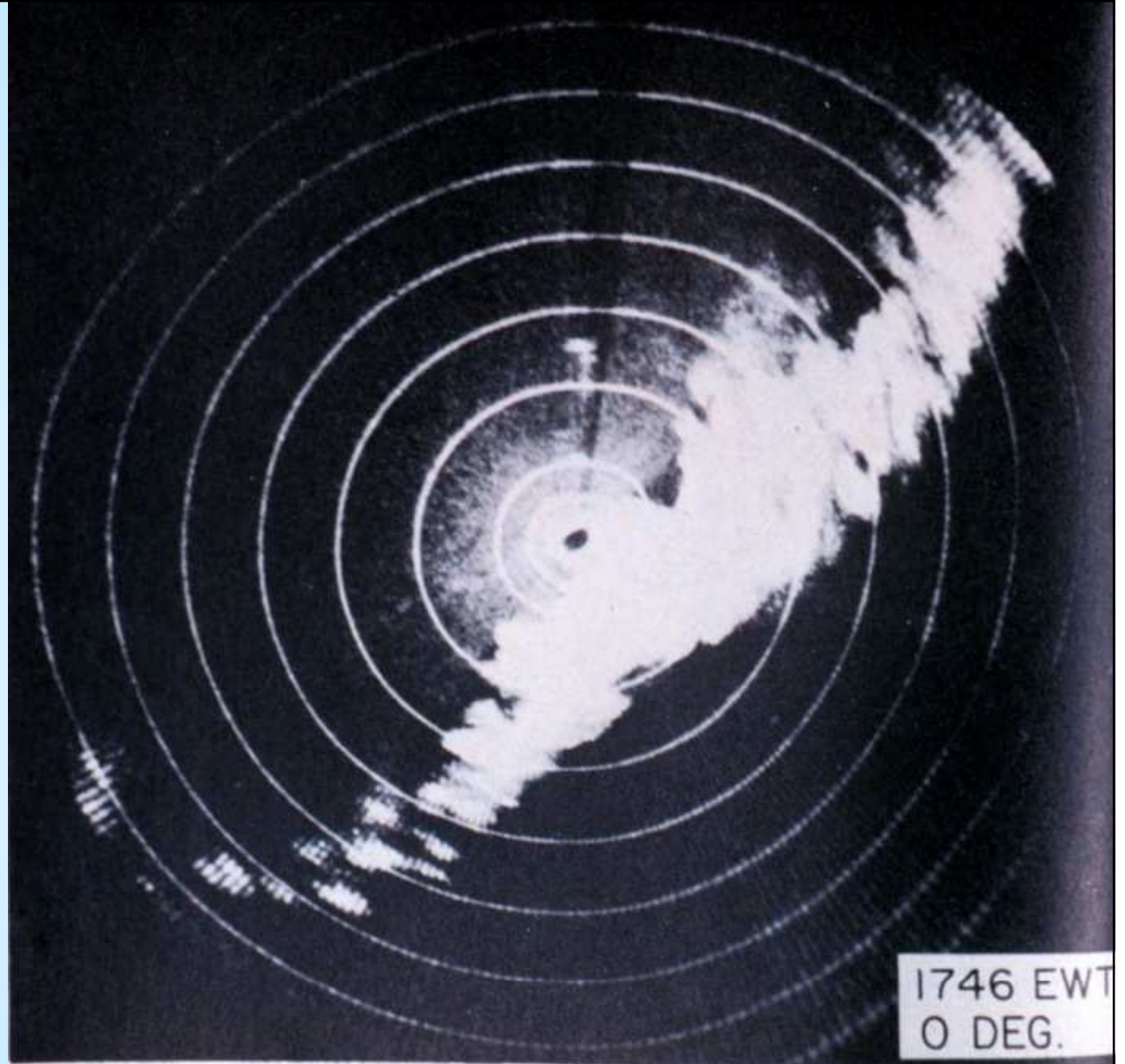


Figure 33. Echoes from frontal thunderstorms, 16 July 1944.

# 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  $\mu$ s

opakovací frekvence vysílače: 500 Hz

šumové číslo přijímače: 8 dB

šířka pásma přijímače: 2 MHz

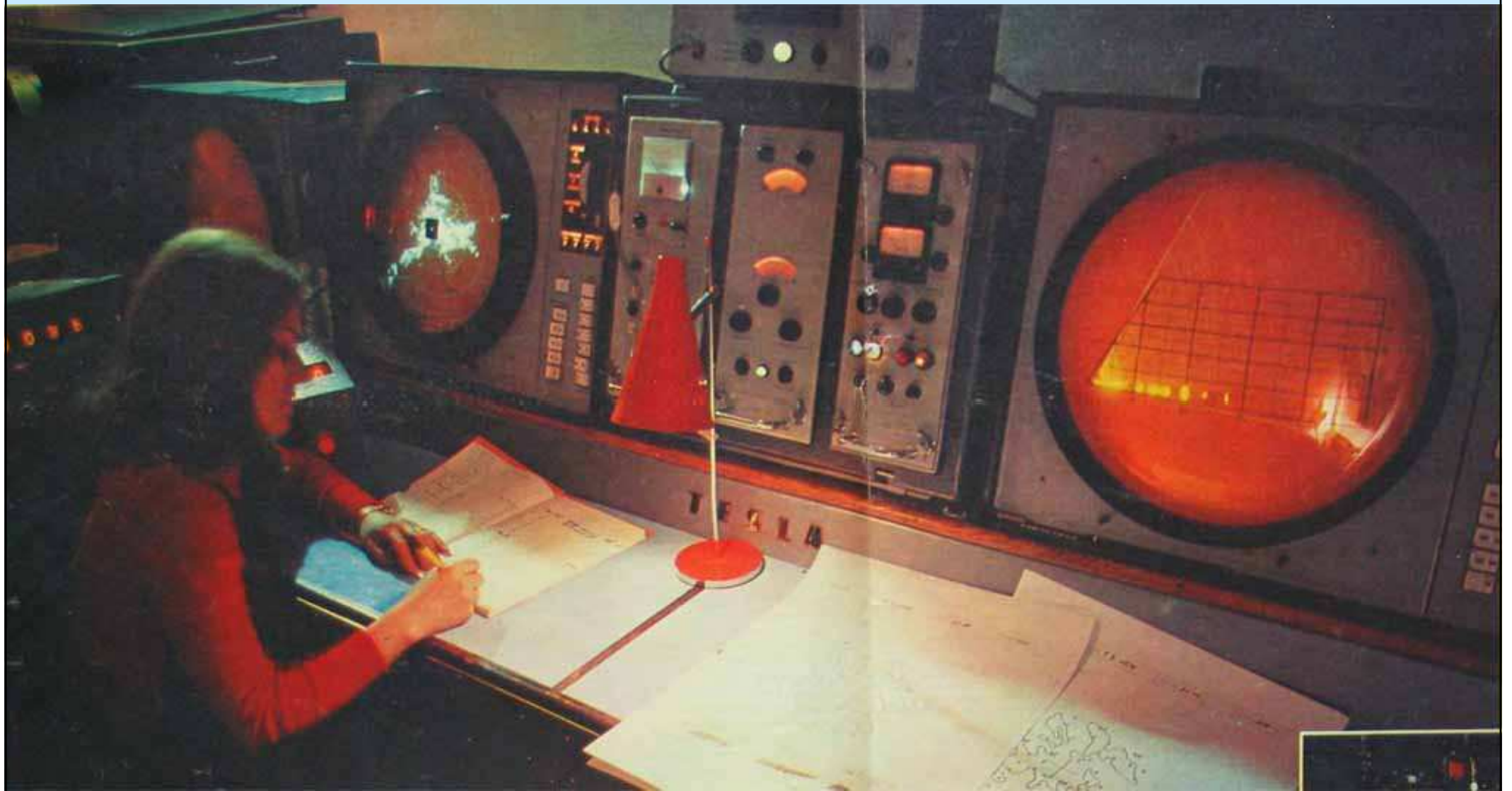
časové řízení zisku:  $1/R^2$  10/200 km

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





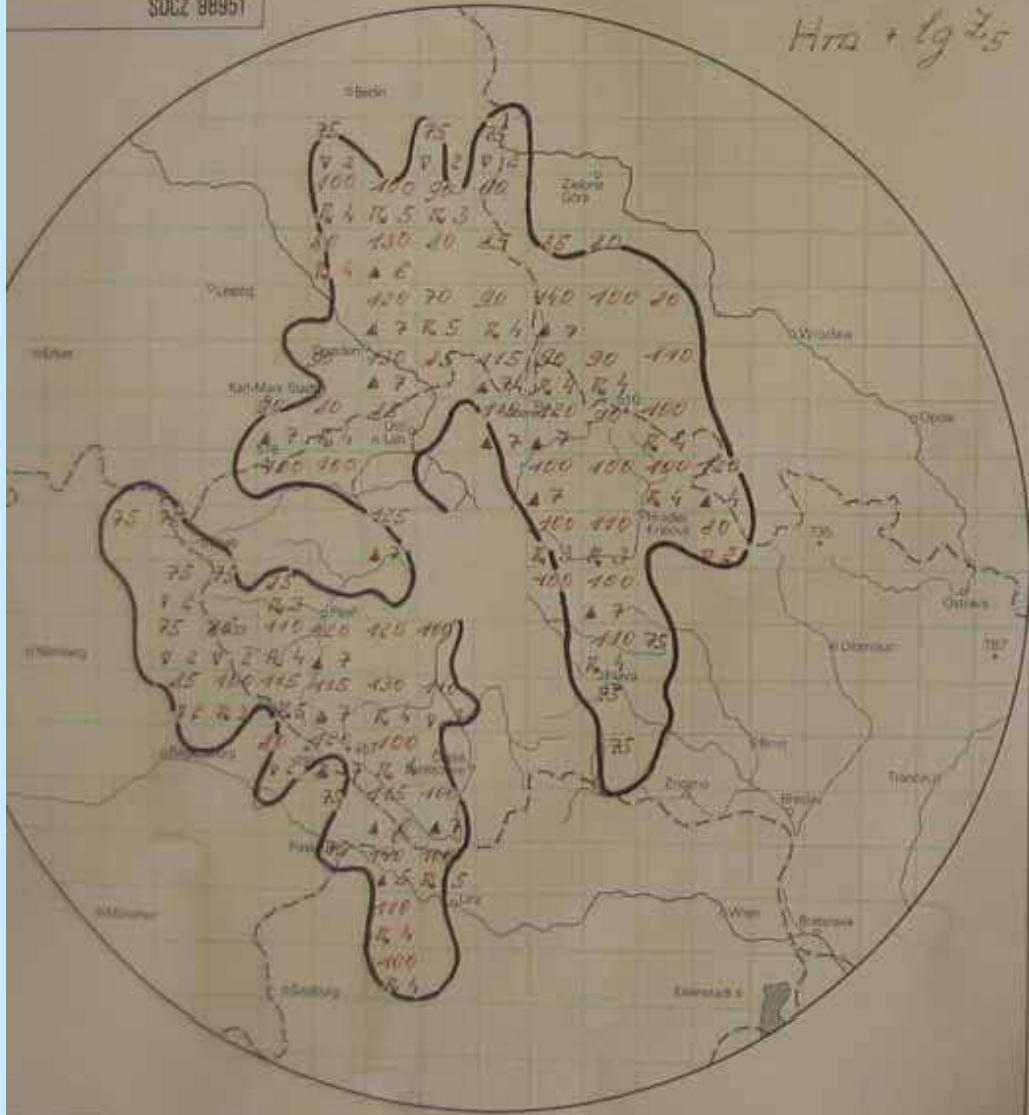


# RUČNÍ ZPRACOVÁNÍ

LETNOSTNÍ SLUŽBA ČSSR    DATUM: 24. 7. 1988    ČAS: 15,30 GMT    ROZSAH: 300 KM  
 11520    RADIOLOKAČNÍ SITUACE (OBLÁČNOST A JEVY)

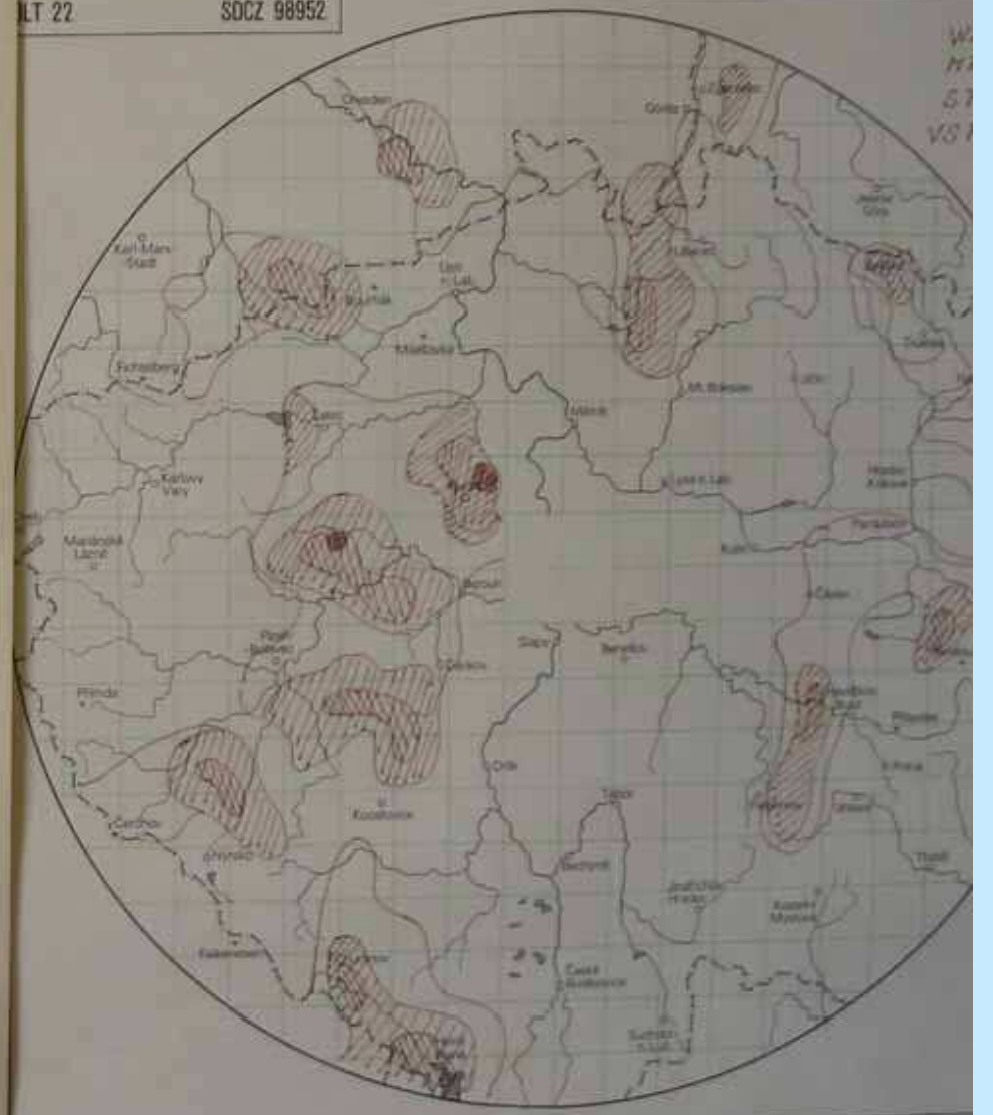
SOCZ 98951

*Hra + lg 25*



# RUČNÍ ZPRACOVÁNÍ

POVĚTRNOSTNÍ SLUŽBA ČSSR    DATUM: 24. 7. 1988    ČAS: 15,30 GMT    ROZSAH: 300 KM  
 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

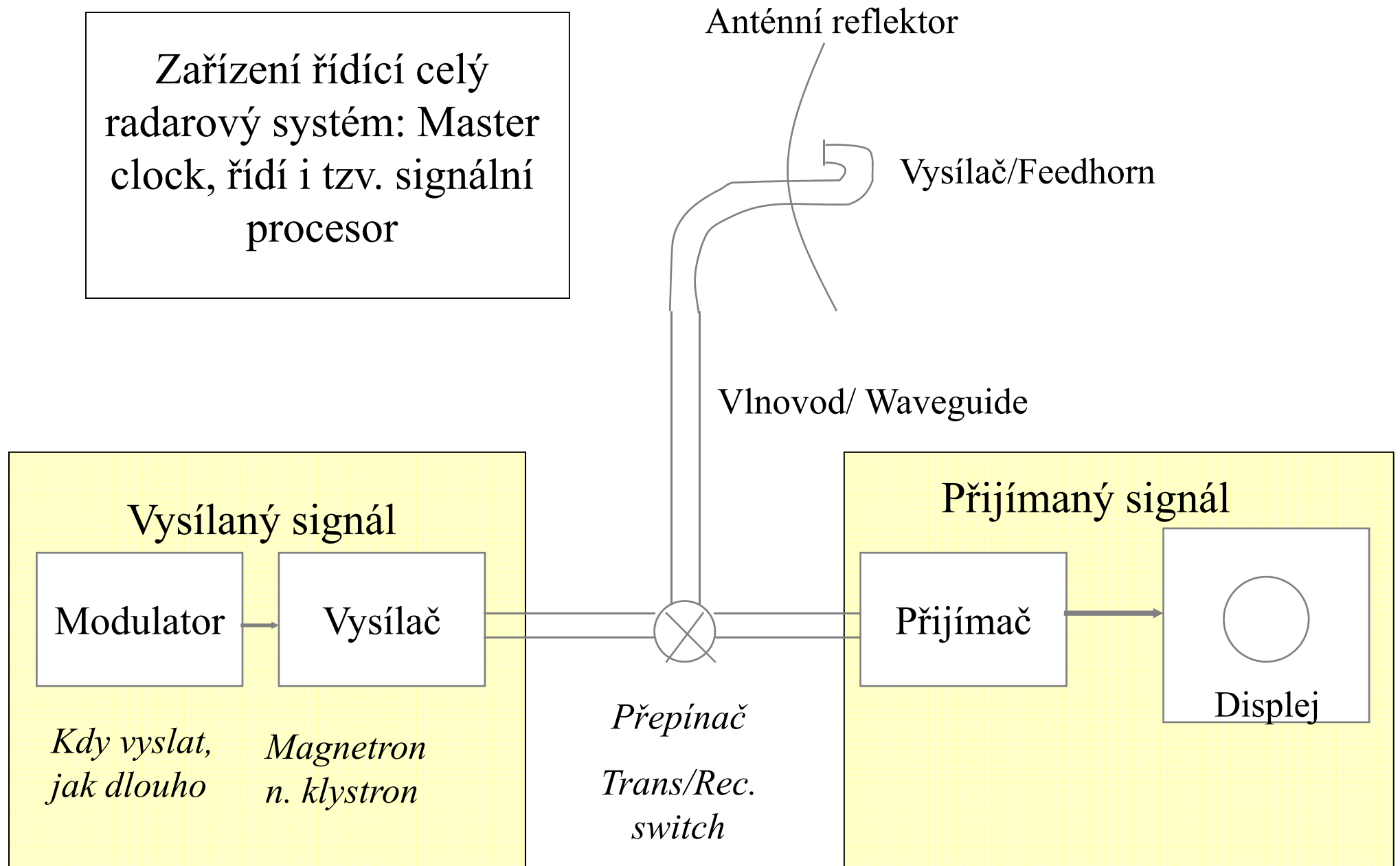


# Meteorologické radary

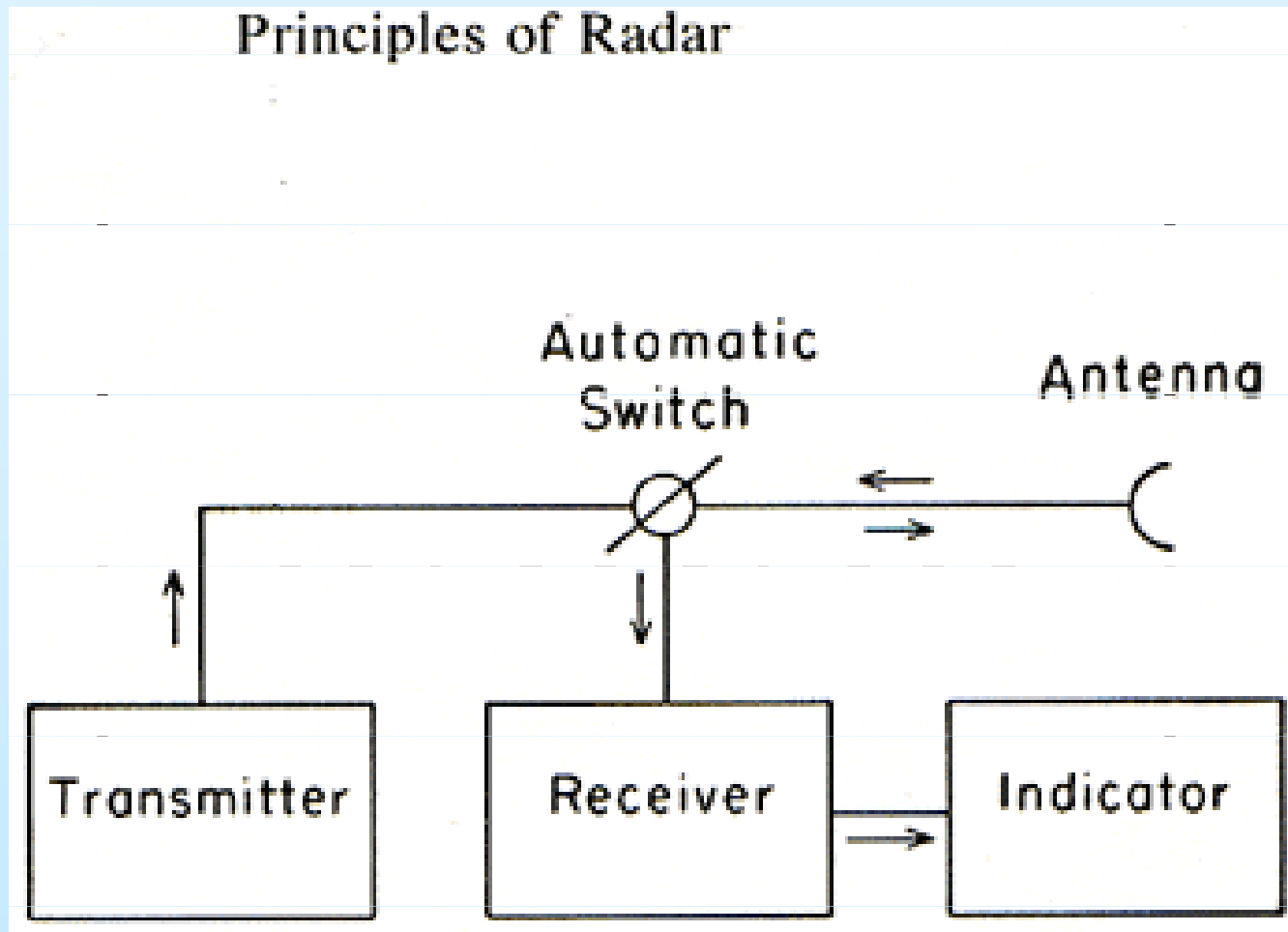
- Princip:
  - Vysílá v pulsech elmg. záření
  - Část emitované energie je odražena meteorologickými i jinými cíly
  - Odražená energie je detekovaná přijímačem.
  - Pozice cíle je určována pomocí znalosti pozice (azimutu a elevace) antény a časem, který uplynul mezi vysláním pulsu a detekcí odraženého 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)
- $\tau$  – trvání pulsu (0.1-10  $\mu\text{s}$ , často 2  $\mu\text{s}$ )
- h – délka pulsu (pro 2  $\mu\text{s}$ : 600 m)
- Část energie obsažené v pulsu je odrážena k radaru

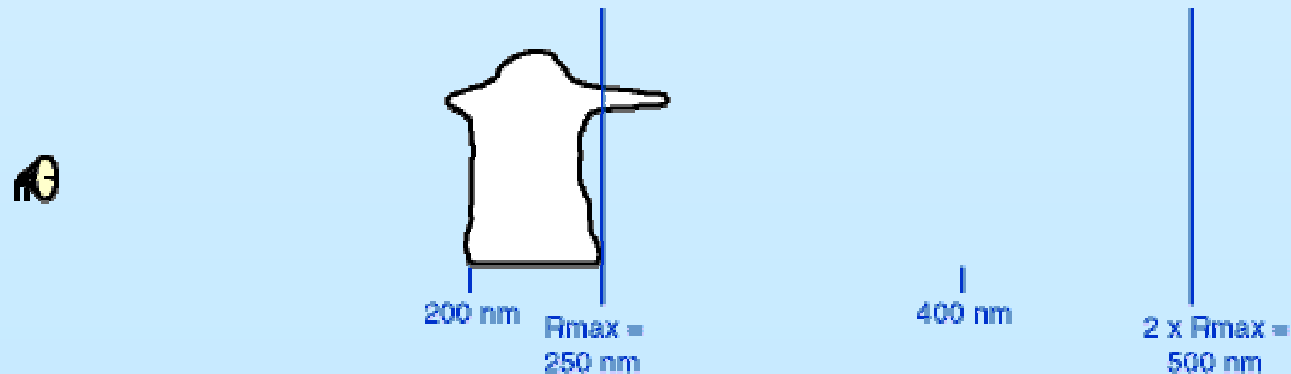
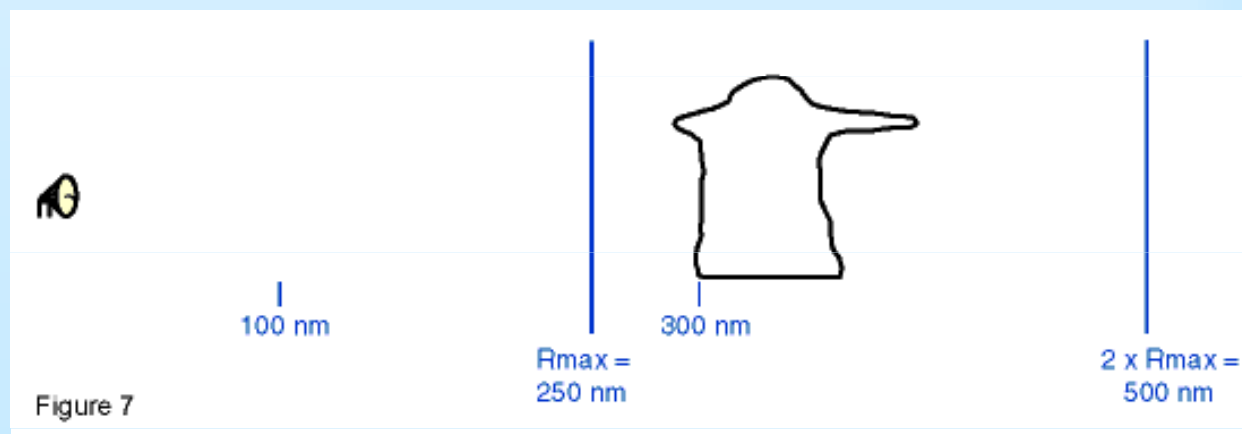


Figure 6

# 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

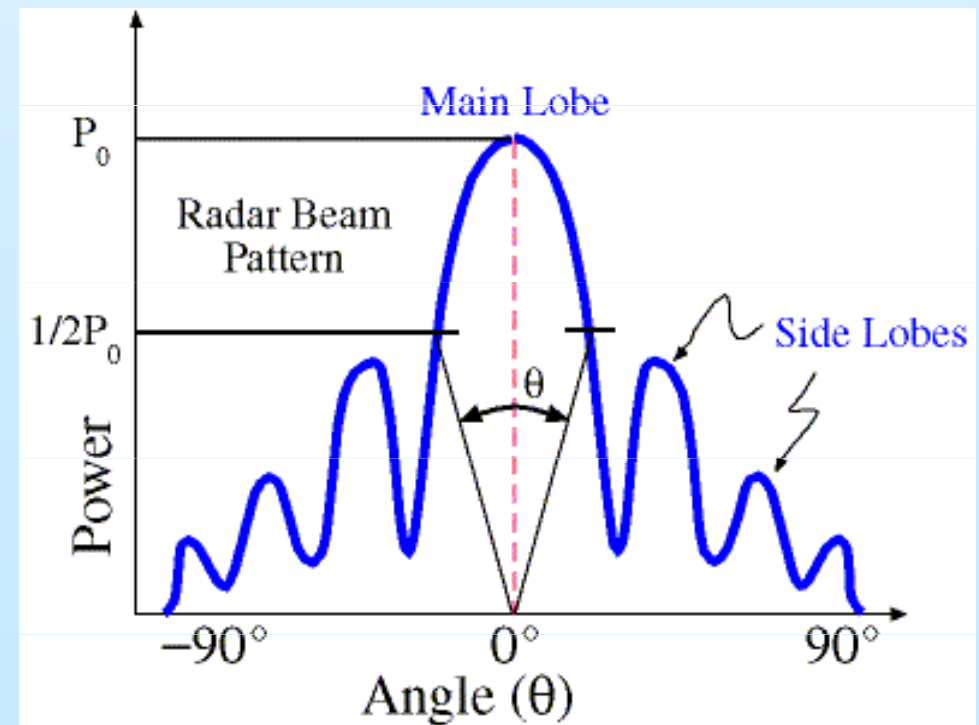
- Antény: izotropní, směrové
- Radar: směrové antény
- Vysílací část (vlastní anténa – feedhorn) a odražeč (reflector)
- Anténní odražeč (rotační paraboloid) směruje radarový signál do prostoru v určeném směru
- Větší anténa => lepší směrování (závislé na vlnové délce; větší vln. délky => horší směrování)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

# Anténa

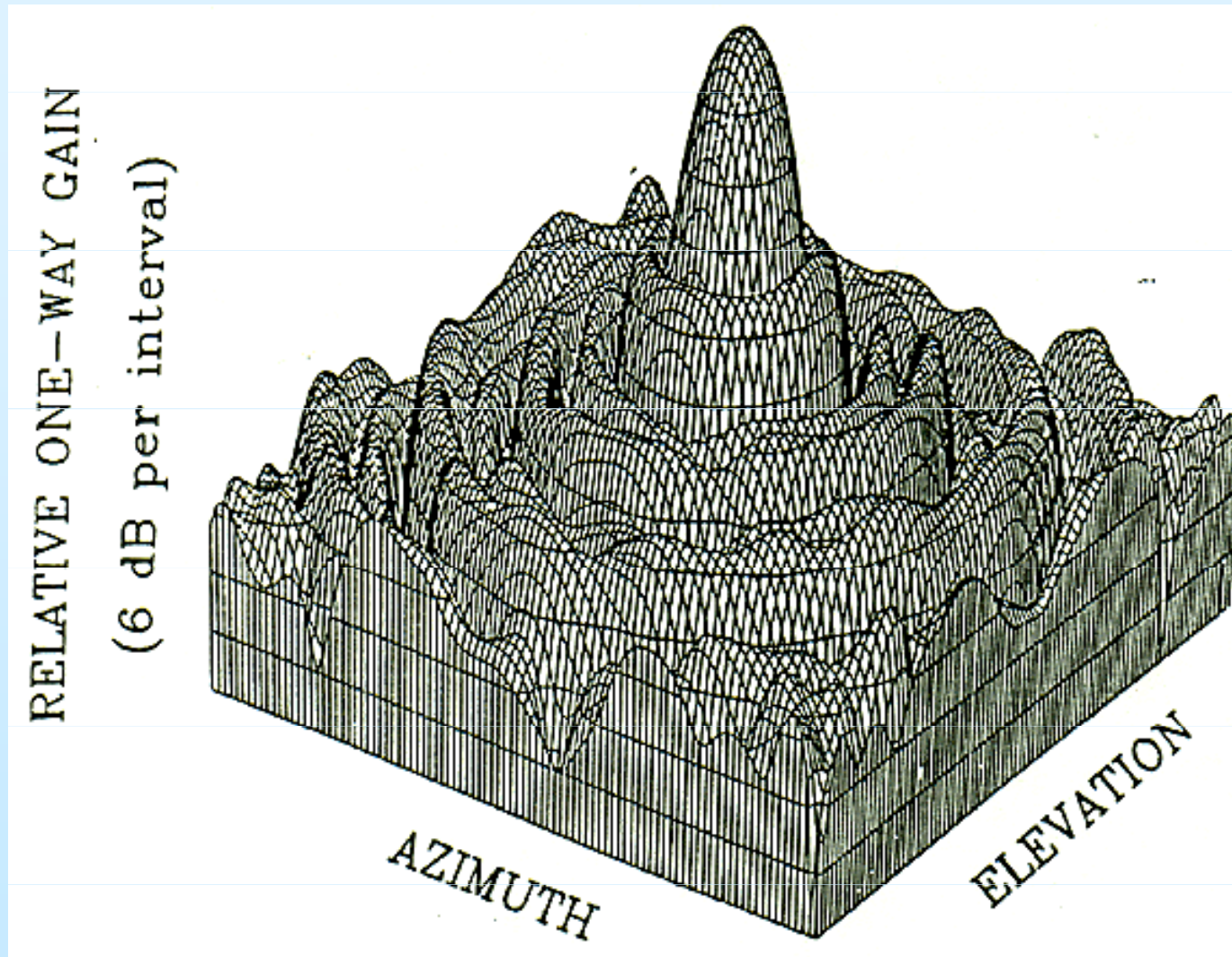
- Velikost antény: průměr – jednotky metrů
- Zisk antény:  $G[dB]=10.\log(P_{in\_beam}/P_{isotr})$
- $G$ : 20-45 dB ( $g=10^G/10$ )

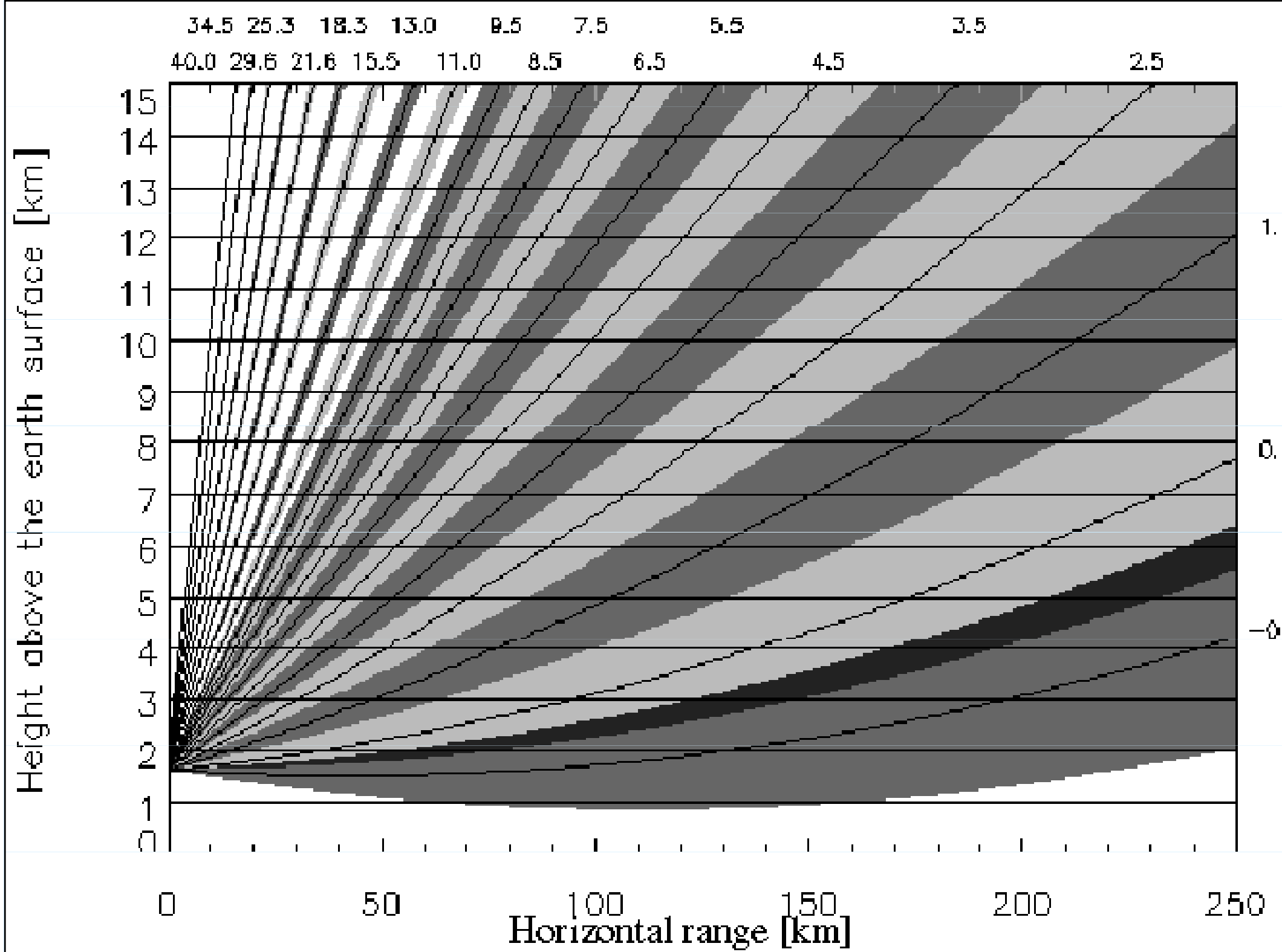
**Konvenční šířka radarového svazku** („paprsku“, angl. beam): Omezena polovinou max. intenzity (3dB)

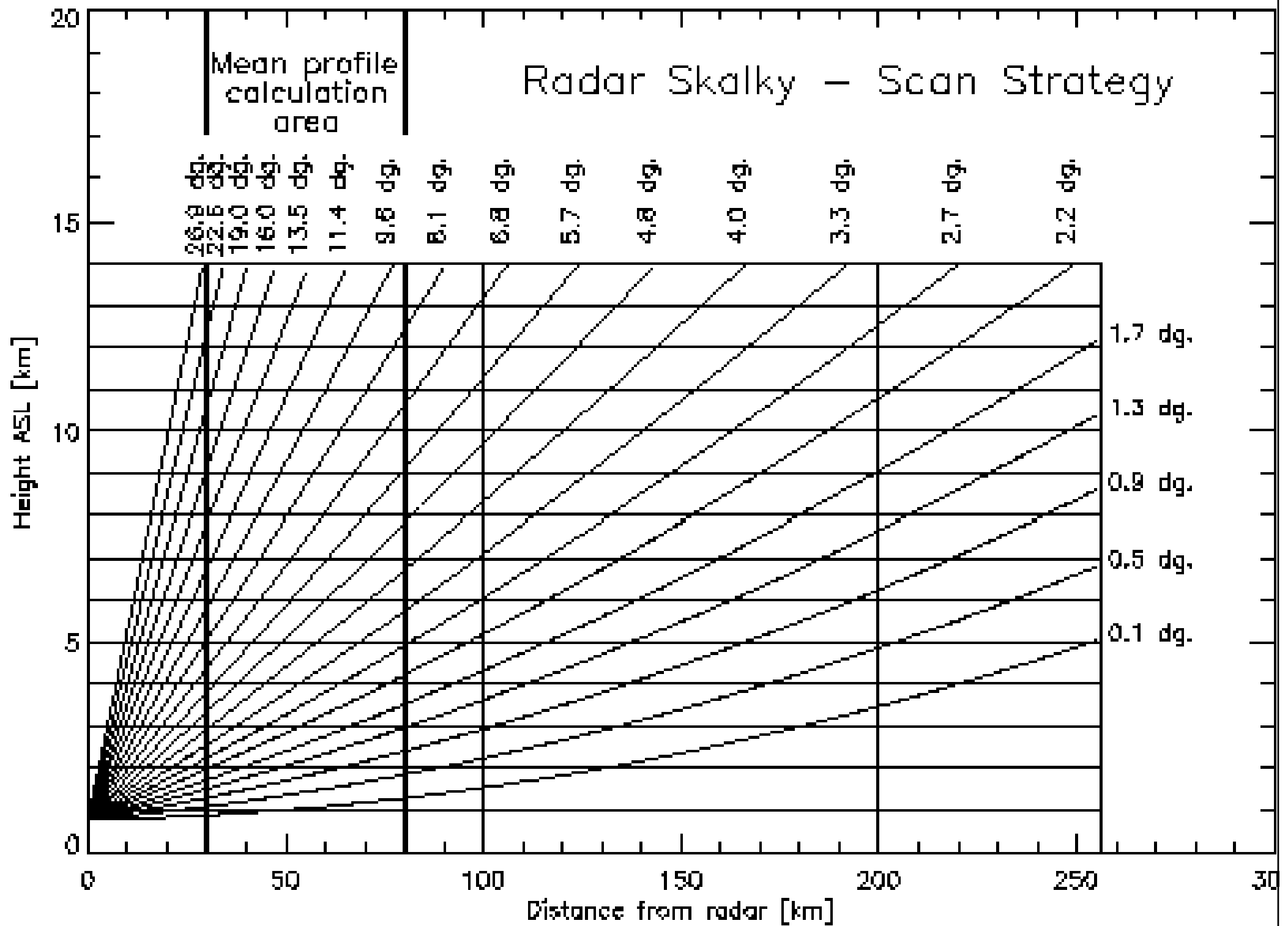
Kromě hlavního laloku vysílá anténa i (nepříliš žádoucí) boční laloky (side lobes)



# 3D pohled na radarový paprsek







# 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

$\Theta$  - elevační úhel

$H_0$  - výška antény nad referenční hladinou (moře)



# Typy refrakce

A – subrefrakce (záporná refrakce)

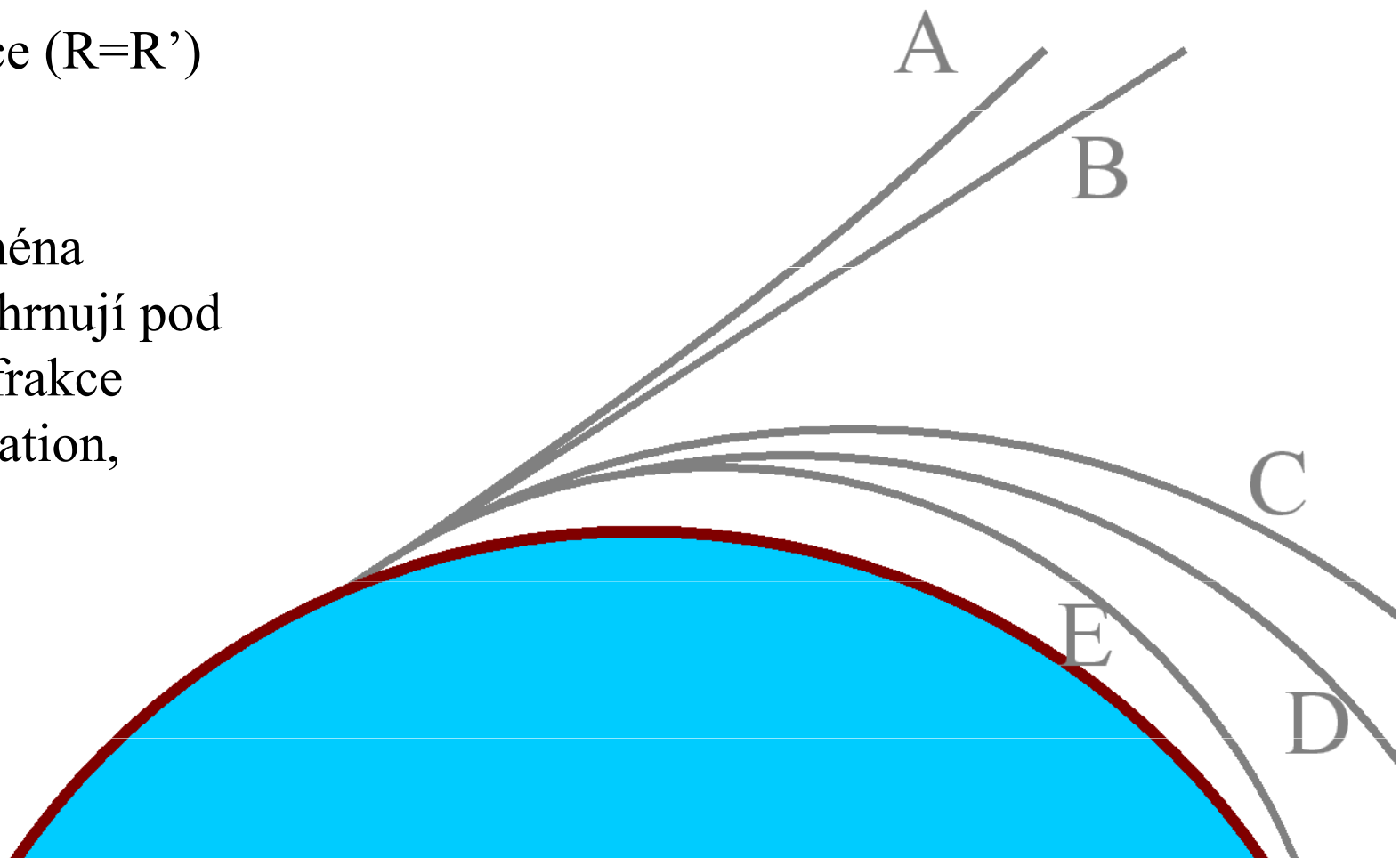
B – nulová refrakce

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

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

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

$P_\sigma$  – množství energie zachycené cílem

$A_\sigma$  – 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

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

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

$\sigma$  – efektivní plocha zp. rozptylu

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

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

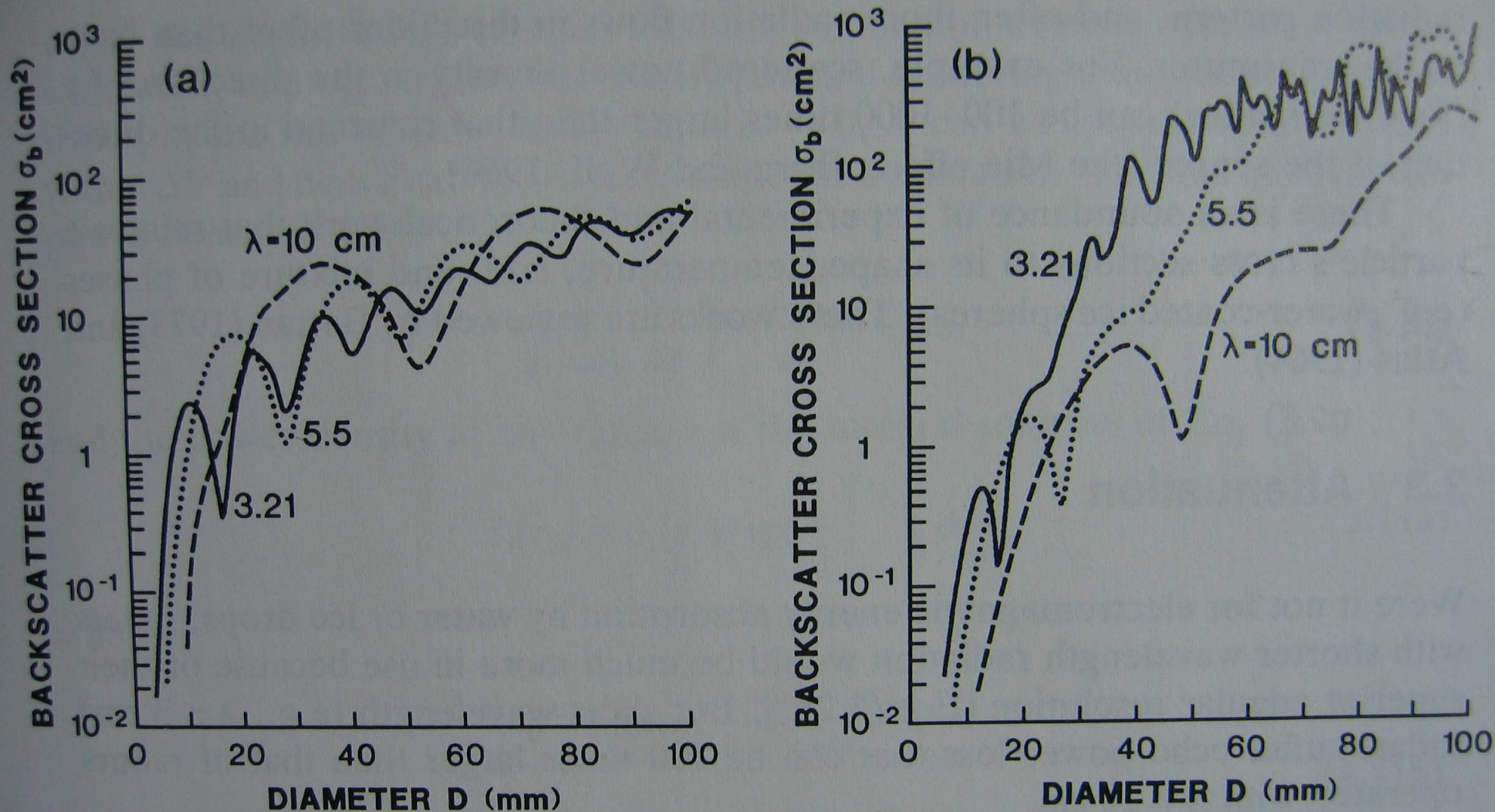
$$\text{Pro } D/\lambda > 10 : \sigma = \pi r^2$$

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  $\sigma_b$  for spheres: (a) Liquid water; the complex relative permittivity  $m^2$  (at  $0^\circ\text{C}$ ) 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  $2 \times 10^8$  kapek v  $\text{m}^3$
- $1^\circ$  paprsek zachytí ve vzdálenosti 57 km v ve snímaném objemu o délce 150 m:  **$2 \times 10^{16}$  kapek**
- **Padající srážky:**  $10^9$ - $10^{12}$  kapek

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

# Snímaný elementární (rozlišitelný) objem

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

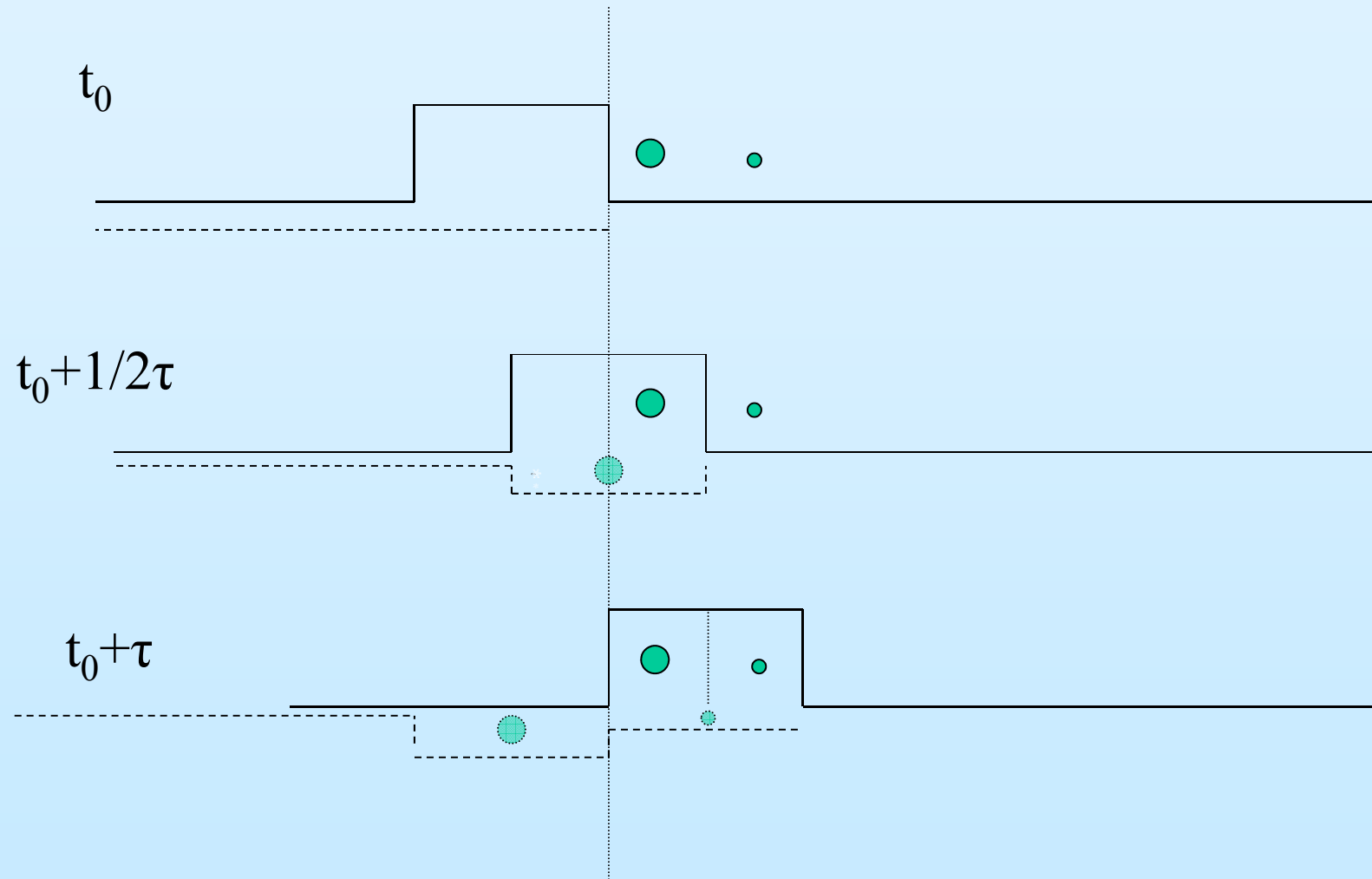
$\Phi, \Theta$  – horizontální a vertikální šířka  
anténního svazku

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

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



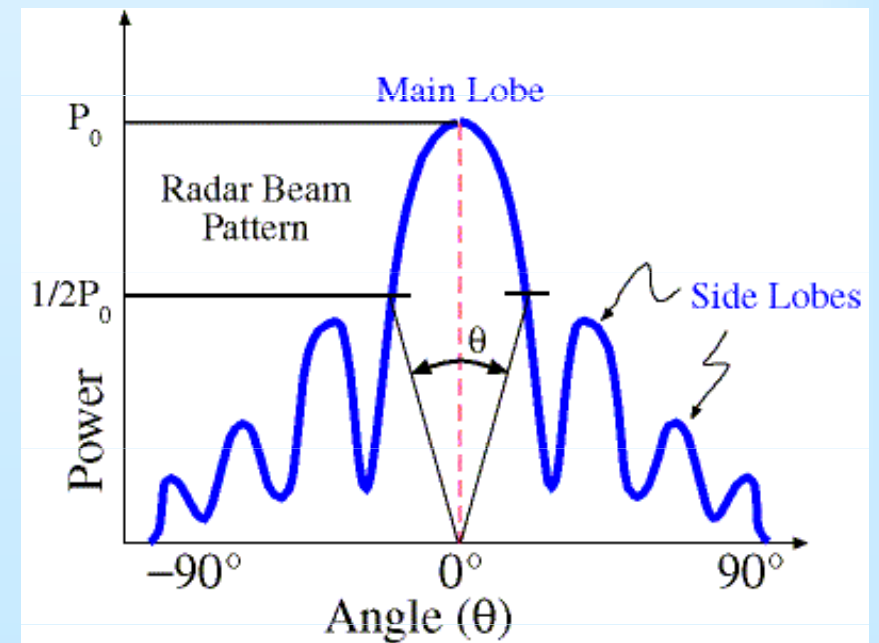
# Snímaný elementární (rozlišitelný) objem



# Snímaný objem

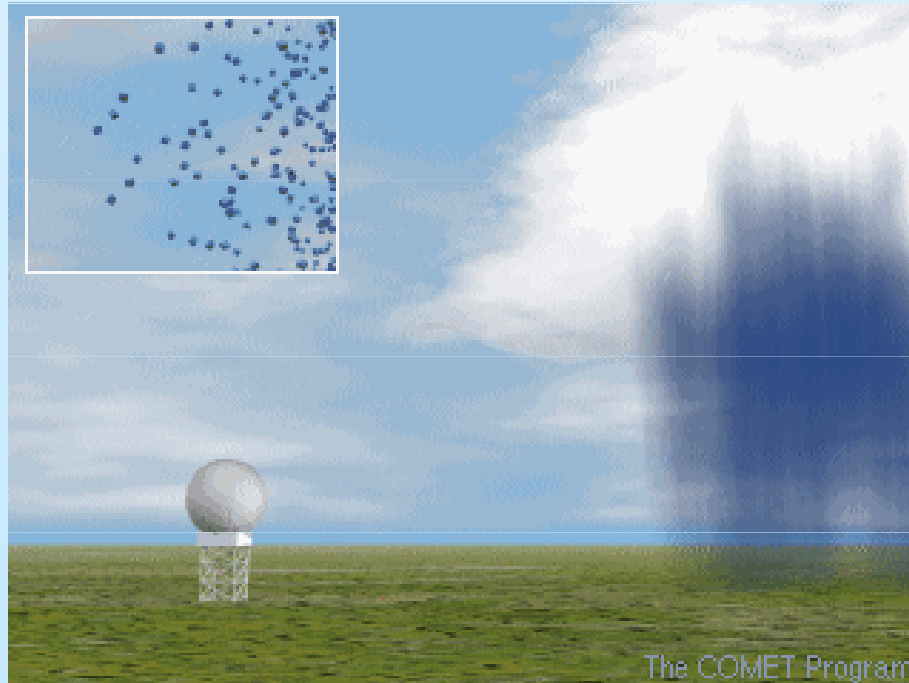
Protože v paprsku omezeném hranicemi 3dB je pouze část záření antény, musíme dělit faktorem  $2\ln(2)$ , což dává:

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



# 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)

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

$\Pi_M$  – 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.)

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

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

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

# 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  $0.001 \text{ [mm}^6/\text{m}^3]$  do  $50000000 \text{ [mm}^6/\text{m}^3]$ , 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

- a. V jednom  $\text{m}^3$  je jedna sférická (vodní) 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.
- b. V jednom  $\text{m}^3$  jsou tyto sférické kapky
1. 1 kapka o velikosti 3 mm
  2. 10 kapek o velikosti 2 mm
  3. 500 kapek o velikosti 1 mm
  4. 10000 kapek o velikosti 0,5 mm
- Vypočtete celkovou odrazivost v původních jednotkách odrazivosti [ $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ] a dBz. Jaká velikost kapek nejvíce přispívá k celkové odrazivosti?

# 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?