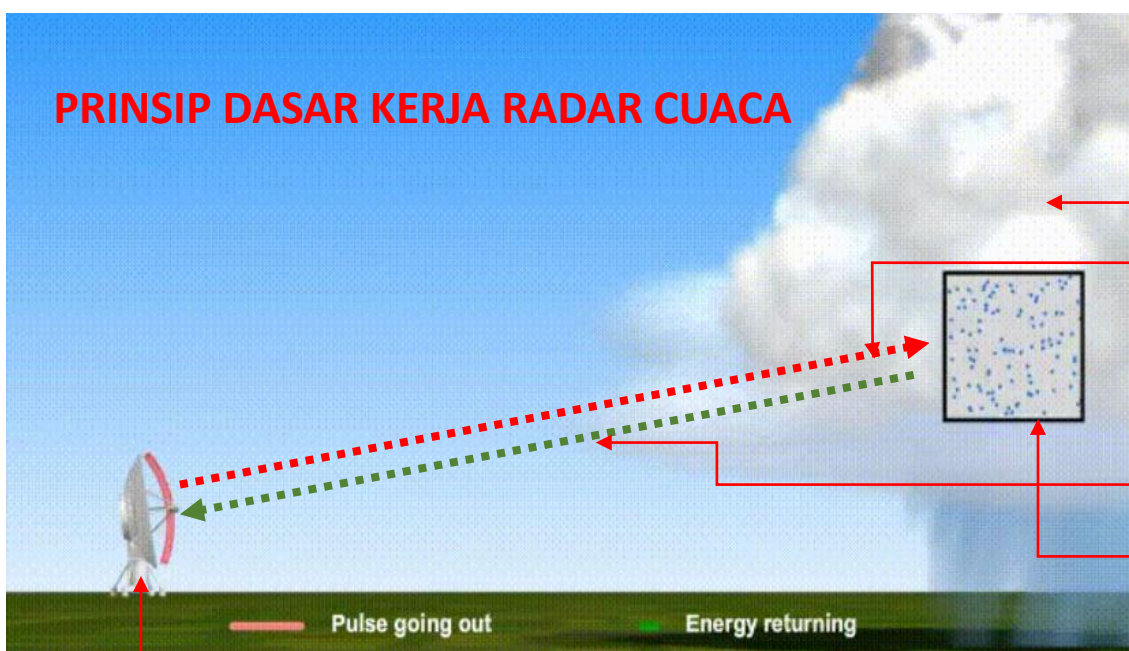


PRINSIP DASAR KERJA RADAR CUACA



Gambar ini menjelaskan prinsip dasar kerja radar cuaca dalam mendeteksi target (hidrometeor) seperti tetesan hujan, butiran es, atau partikel awan.

Radar

- Antena radar memancarkan gelombang elektromagnetik dalam bentuk pulsa.
- Pada gambar ditunjukkan dengan garis merah muda (Pulse going out).

Awan/Hujan

- Di dalam awan terdapat banyak partikel air atau es.
- Kotak pembesaran menunjukkan partikel-partikel kecil yang menjadi target radar.

Pulsa Mengenai Target

- Ketika pulsa radar mencapai tetesan hujan atau partikel es, sebagian energi dipantulkan ke segala arah.
- Fenomena ini disebut hamburan (scattering).

Energi Kembali ke Radar

- Sebagian kecil energi pantulan kembali ke antena radar.
- Ditunjukkan oleh garis hijau (Energy returning).
- Energi pantulan yang kembali ini disebut echo atau backscatter.

Kotak hitam di dalam awan memperlihatkan bahwa:

- Radar sebenarnya tidak "melihat" awan secara keseluruhan.
- Radar mendeteksi jutaan partikel air/es di dalam suatu volume udara.
- Semakin banyak dan semakin besar partikel dalam volume tersebut, semakin kuat sinyal pantul yang diterima radar.

Apa yang Dihitung Radar? Dari sinyal pantulan tersebut radar dapat menentukan:

1. (Jarak Target) Dengan mengukur waktu tempuh pulsa pergi dan kembali.

$$r = \frac{ct}{2}$$

r = jarak target, c = kecepatan cahaya, t = waktu tempuh pulang-pergi sinyal

2. (Intensitas Hujan)

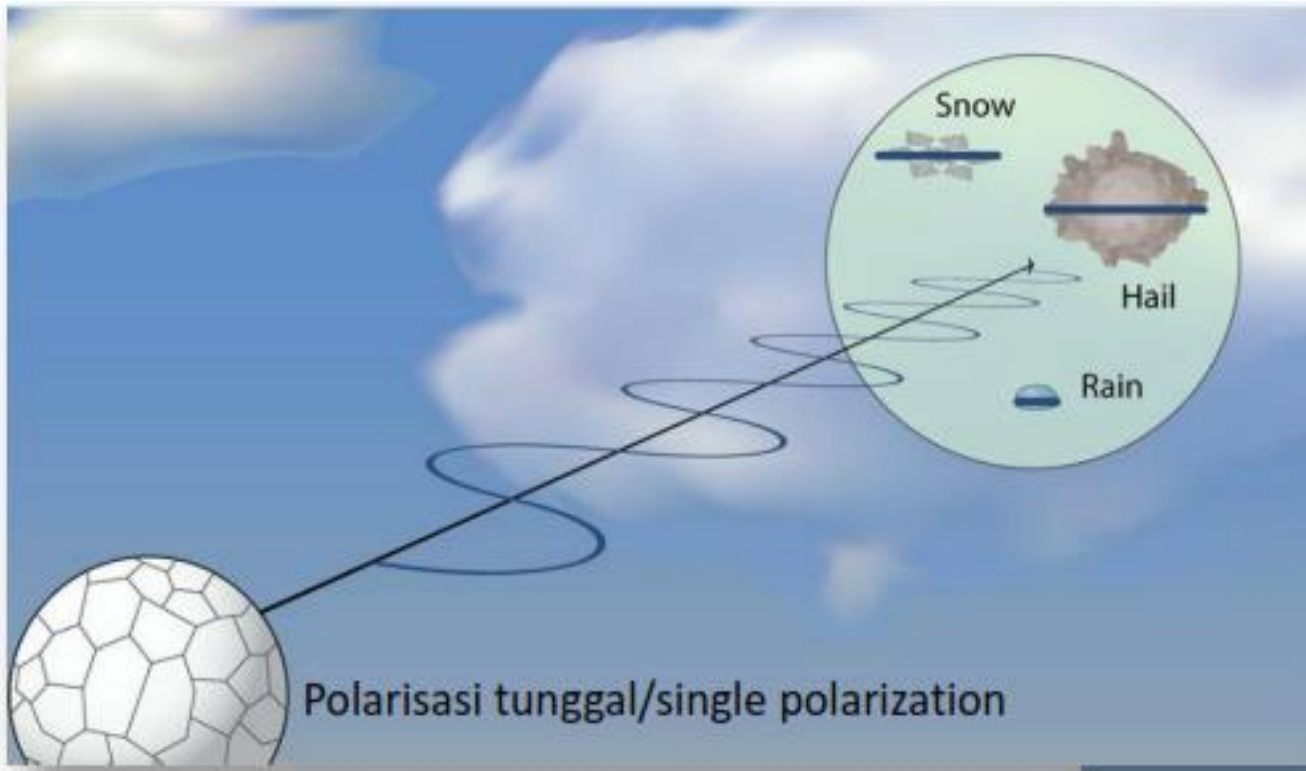
- Pantulan yang kuat → banyak atau besar tetesan hujan.
 - Pantulan yang lemah → sedikit atau kecil tetesan hujan.
- Besarnya pantulan ditampilkan sebagai **reflektivitas (dBZ)**.

3. (Kecepatan Gerak Partikel)

Jika radar Doppler digunakan, perubahan frekuensi sinyal pantulan dapat digunakan untuk menghitung kecepatan angin menuju atau menjauhi radar.

Kesimpulan

Gambar ini menggambarkan proses pemancaran pulsa radar → mengenai tetesan hujan → dipantulkan kembali → diterima radar sebagai echo. Dari echo tersebut radar cuaca dapat menentukan lokasi hujan, jarak hujan, intensitas hujan, dan pergerakan massa udara. Ini adalah konsep paling dasar dari pengamatan radar cuaca.



Polarisasi tunggal/single polarization

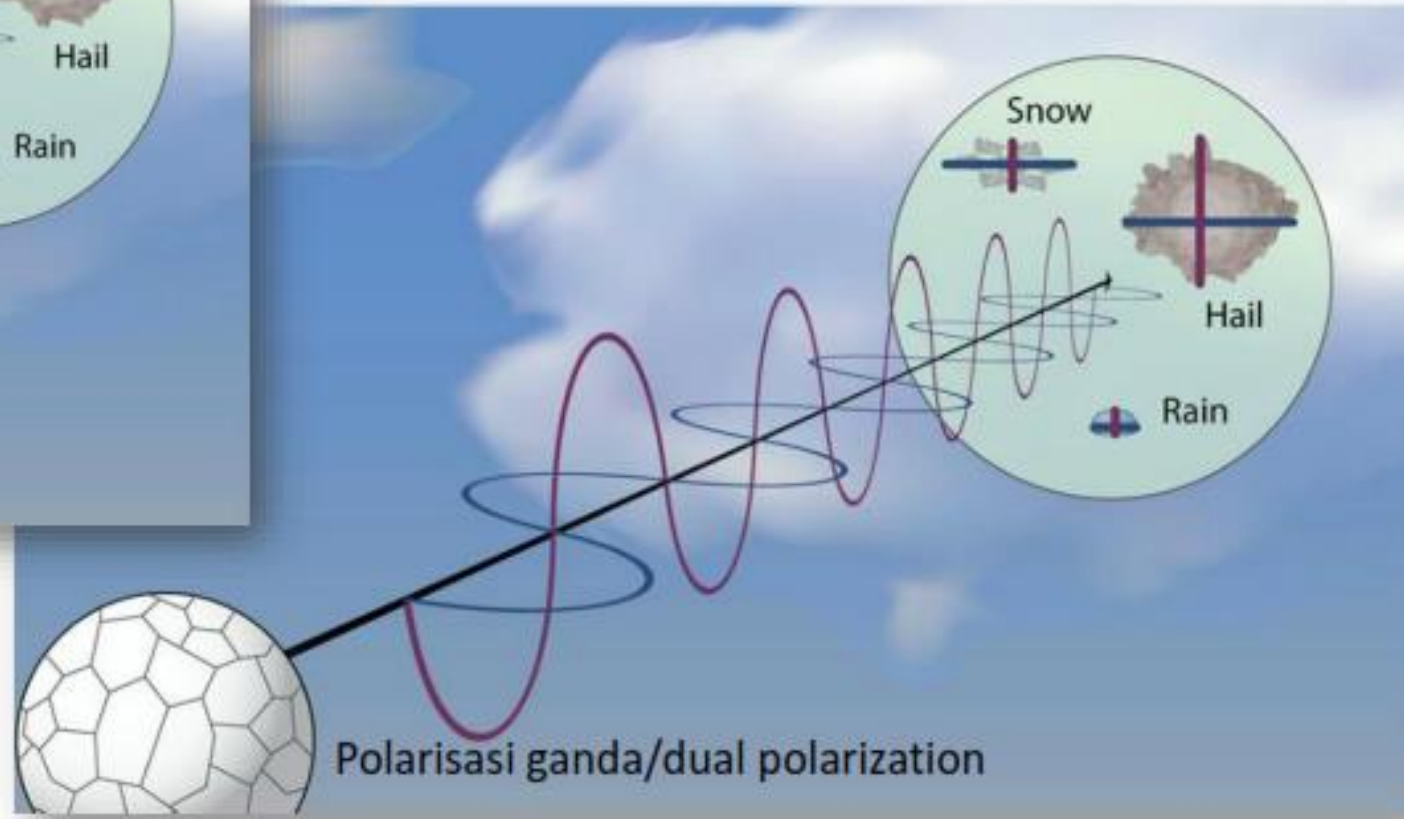
Single Polarization

- Mengukur satu arah polarisasi.
- Hanya memberikan informasi dasar tentang kekuatan pantulan.
- Sulit membedakan jenis hidrometeor.

Dual Polarization

- Mengukur polarisasi horizontal dan vertikal.
- Dapat mengetahui bentuk, ukuran, dan jenis partikel.
- Jauh lebih akurat untuk identifikasi hujan, salju, hujan es, bahkan non-meteorological target.

Itulah sebabnya hampir semua radar cuaca modern (termasuk banyak radar cuaca operasional saat ini) telah menggunakan **Dual Polarization Weather Radar** karena kemampuan klasifikasi hidrometeorinya jauh lebih baik dibanding radar polarisasi tunggal.



Polarisasi ganda/dual polarization

Hubungan antara frekuensi radar (f) dan panjang gelombang (λ).

Rumus Dasar :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Keterangan:

- f = frekuensi (Hz atau s^{-1})
- c = kecepatan cahaya ($\approx 3 \times 10^8$ m/s atau 3×10^{10} cm/s)
- λ = panjang gelombang (meter atau cm)

Rumus tersebut menunjukkan bahwa:

- Frekuensi dan panjang gelombang berbanding terbalik.**
- Semakin **tinggi frekuensi**, semakin **pendek panjang gelombangnya**.
- Semakin **rendah frekuensi**, semakin **panjang panjang gelombangnya**.

Frekuensi	Panjang Gelombang
Tinggi	Pendek
Rendah	Panjang

Contoh pada Radar Cuaca

Radar S-Band

- Frekuensi $\approx 2,7$ – $3,0$ GHz
- Panjang gelombang ≈ 10 cm

Radar C-Band

- Frekuensi $\approx 5,3$ – $5,6$ GHz
- Panjang gelombang ≈ 5 cm

Radar X-Band

- Frekuensi ≈ 9 – 10 GHz
- Panjang gelombang ≈ 3 cm

Terlihat bahwa ketika frekuensi meningkat dari S-Band ke X-Band, panjang gelombang menjadi semakin pendek.

Mengapa Penting untuk Radar Cuaca?

1. Kemampuan Mendeteksi Partikel Kecil

Panjang gelombang yang lebih pendek lebih sensitif terhadap:

- Gerimis
- Awan
- Partikel kecil

Karena itu radar X-Band dapat melihat detail hujan lebih baik.

2. Pelemahan Sinyal (Attenuation)

Panjang gelombang pendek lebih mudah diserap oleh hujan.

Akibatnya:

Band	Attenuation
S-Band	Sangat rendah
C-Band	Sedang
X-Band	Tinggi

3. Jangkauan Pengamatan

Radar dengan panjang gelombang lebih panjang umumnya memiliki jangkauan lebih jauh.

Contohnya:

- Radar S-Band BMKG** dapat mengamati hingga ± 250 – 300 km dengan attenuation yang kecil.
- Radar X-Band biasanya digunakan untuk area lokal dengan jangkauan lebih pendek.

Hubungan antara frekuensi radar (f) dan panjang gelombang (λ).

Kesimpulan :

Hubungan frekuensi dan panjang gelombang sangat penting dalam radar cuaca:

- ❑ Frekuensi tinggi → panjang gelombang pendek → detail lebih tinggi tetapi attenuation lebih besar.
- ❑ Frekuensi rendah → panjang gelombang panjang → jangkauan lebih jauh dan attenuation lebih kecil.

Karena itu banyak radar cuaca operasional BMKG menggunakan **S-Band** (≈ 10 cm), yang cocok untuk pengamatan hujan lebat di daerah tropis karena tidak mudah mengalami pelemahan sinyal oleh hujan.

Contoh Perhitungan

Jika panjang gelombang radar:

$$\lambda = 10 \text{ cm}$$

maka:

$$f = \frac{3 \times 10^{10}}{10}$$

$$f = 3 \times 10^9 \text{ Hz}$$

atau:

$$f = 3 \text{ GHz}$$

Ini adalah frekuensi yang digunakan oleh Radar S-Band.

Typical frequencies and wavelengths			
S-Band	2.8 GHz	11 cm	Precipitation
C-Band	5.6 GHz	5.4 cm	Precipitation
X-Band	10 GHz	3.2 cm	Precipitation
K-Band	25 GHz	1.2 cm	Clouds
W-Band	95 GHz	0.3 cm	Clouds

	Large wavelength	Small wavelength
😊	long range; V data	sensitive; compact
😞	dimensions; costs	attenuation

Pulse Repetition Frequency (PRF), Pulse Repetition Time (PRT)

KONSEP Pulse Repetition Frequency (PRF), Pulse Repetition Time (PRT), dan pengaruhnya terhadap kemampuan radar cuaca dalam mendeteksi target.

1. Pulse Repetition Frequency (PRF)

PRF adalah jumlah pulsa radar yang dipancarkan setiap detik.

Satuan:

- Hertz (Hz)
- Pulsa per detik (pps)

Contoh:

- PRF = 500 Hz → radar mengirim 500 pulsa/detik
- PRF = 2000 Hz → radar mengirim 2000 pulsa/detik

Semakin besar PRF, semakin sering radar memancarkan pulsa.

2. Pulse Repetition Time (PRT)

PRT adalah selang waktu antara dua pulsa berturut-turut.

Hubungannya dengan PRF:

$$PRT = \frac{1}{PRF}$$

Contoh :

PRF=500 Hz

PRT=1/500 ≈ 0,002 second

PRF=2000Hz

PRT=1/2000 ≈ 0,0005 second

Artinya semakin tinggi PRF, semakin pendek waktu tunggu antar pulsa

Kesimpulan

PRF (Pulse Repetition Frequency) menentukan seberapa sering radar memancarkan pulsa, sedangkan **PRT (Pulse Repetition Time)** adalah waktu antar pulsa.

- PRF rendah** → jangkauan lebih jauh, tetapi resolusi dan pengukuran kecepatan lebih rendah.
- PRF tinggi** → resolusi dan pengukuran kecepatan lebih baik, tetapi jangkauan efektif menjadi lebih pendek.

Karena itu radar cuaca modern biasanya menggunakan beberapa kombinasi PRF dalam satu siklus pemindaian untuk mendapatkan keseimbangan antara **jangkauan, resolusi, dan akurasi pengukuran kecepatan**.

3. Pulse Length (Lebar Pulsa)

Pulse Length adalah lamanya radar memancarkan satu pulsa.

Contoh r:

- Long Pulse = 3 μs
- Short Pulse = 0,5 μs

Hubungannya dengan panjang pulsa di ruang:

L = panjang pulsa , c = kecepatan cahaya , τ = pulse length

Pulsa yang lebih panjang membawa energi lebih besar.

$$L = c \times \tau$$

4. PRF Rendah (500 Hz) + Pulsa Panjang (3 μs)

Keuntungan Dapat mendeteksi target yang lebih jauh Karena:

- ❖ Energi per pulsa lebih besar
 - ❖ Pantulan dari target jauh lebih mudah diterima
- Jangkauan tak ambigu (Unambiguous Range) lebih besar. Radar memiliki waktu cukup lama untuk menunggu echo kembali sebelum mengirim pulsa berikutnya.

Kekurangan

- ❖ Resolusi jarak lebih buruk. Target yang berdekatan sulit dibedakan.
- ❖ Pengukuran kecepatan Doppler kurang baik

5. PRF Tinggi (2000 Hz) + Pulsa Pendek (0,5 μs)

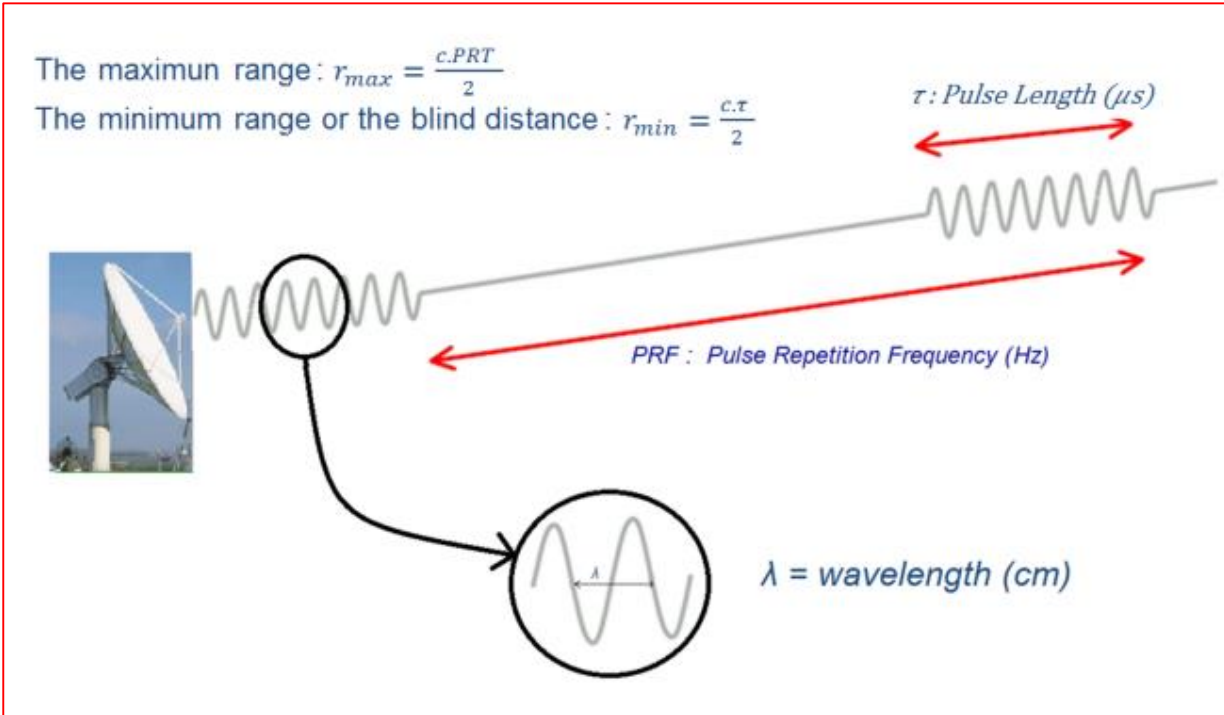
Keuntungan

- ❖ Resolusi jarak lebih baik, Radar dapat membedakan dua sel hujan yang jaraknya berdekatan.
- ❖ Pengukuran kecepatan angin lebih akurat. Sangat berguna untuk produk Velocity.
- ❖ Detail struktur badai lebih jelas

Kekurangan

- ❖ Jangkauan maksimum lebih pendek. Karena radar cepat mengirim pulsa berikutnya.
- ❖ Rentan terjadi Range Ambiguity, Echo dari pulsa sebelumnya bisa tertukar dengan pulsa berikutnya.

Hubungan antara panjang gelombang (λ), panjang pulsa (τ), PRF (Pulse Repetition Frequency)



1. Panjang Gelombang (λ)

Pada pembesaran lingkaran di bawah terlihat:

- ❖ λ (lambda) = panjang gelombang radar.
- ❖ Diukur dari puncak gelombang ke puncak berikutnya.

Radar	λ
S-Band	± 10 cm
C-Band	± 5 cm
X-Band	± 3 cm

Panjang gelombang menentukan karakteristik propagasi dan sensitivitas radar terhadap partikel hujan.

2. Pulse Length (τ)

Panah merah di bagian kanan menunjukkan: τ (tau) = Pulse Length yaitu lama waktu radar memancarkan satu pulsa.

Contoh: 0,5 μs , 1 μs , 2 μs , 3 μs

Semakin panjang pulsa: Energi lebih besar tetapi Resolusi jarak lebih buruk

3. PRF (Pulse Repetition Frequency)

Panah merah panjang menunjukkan jarak antar pulsa. PRF adalah jumlah pulsa yang dipancarkan per detik.

Contoh: 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz

Semakin tinggi PRF: Pulsa dipancarkan lebih rapat dan Waktu menunggu echo semakin pendek.

4. Jarak Maksimum Radar

Pada gambar tertulis:

$$r_{max} = \frac{c \cdot PRT}{2}$$

Karena:

$$PRT = \frac{1}{PRF}$$

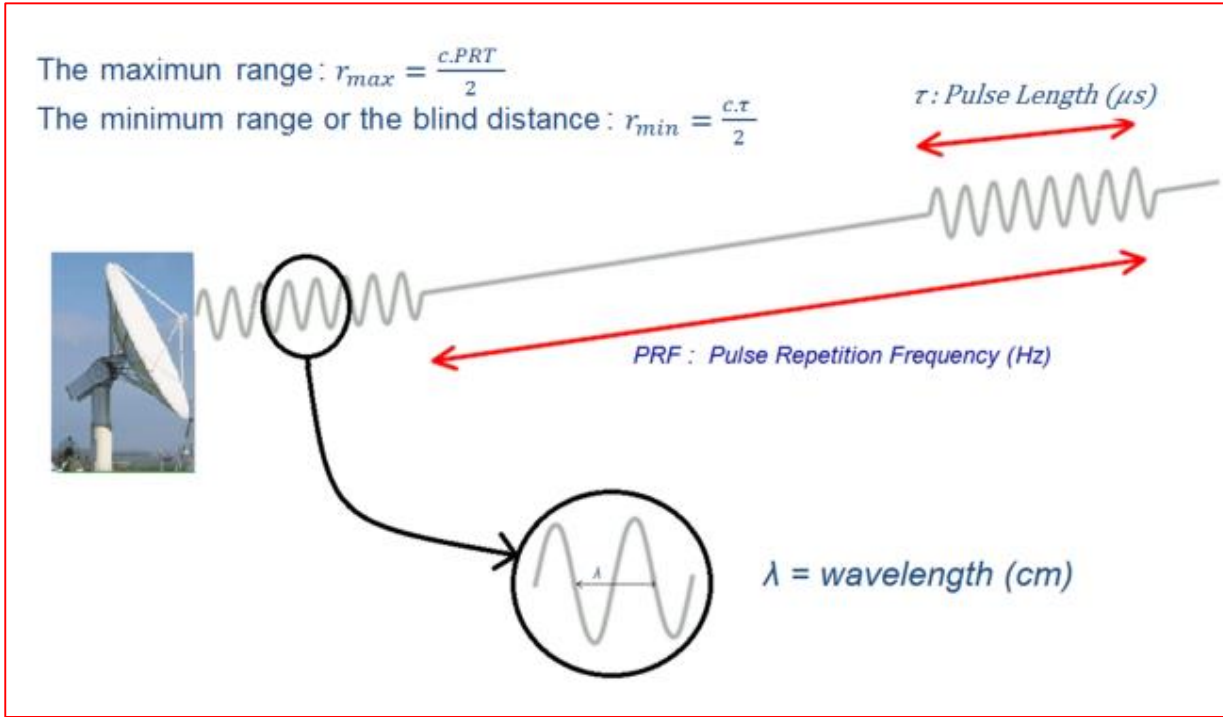
maka:

$$r_{max} = \frac{c}{2PRF}$$

Artinya

- ❖ Jarak maksimum radar ditentukan oleh waktu tunggu sebelum pulsa berikutnya dikirim.
- ❖ Jika echo belum kembali tetapi radar sudah mengirim pulsa baru, radar akan bingung menentukan echo berasal dari pulsa yang mana.

Hubungan antara panjang gelombang (λ), panjang pulsa (τ), PRF (Pulse Repetition Frequency)



5. Jarak Minimum (Blind Distance)

Pada gambar tertulis:

$$r_{min} = \frac{c\tau}{2}$$

Apa Maksudnya?

Saat radar sedang memancarkan pulsa, radar tidak bisa menerima echo. Jika ada target terlalu dekat:

- ❖ Echo sudah kembali
- ❖ Tetapi radar masih sibuk memancar

Akibatnya target tersebut tidak terdeteksi. Daerah ini disebut:

Blind Range atau **Blind Distance**.

Contoh

Pulse Length = $2 \mu s$

$$\tau = 2 \times 10^{-6} s$$

Maka:

$$r_{min} = \frac{300000 \times 2 \times 10^{-6}}{2}$$

$$r_{min} = 0,3 \text{ km}$$

atau sekitar 300 meter.

Target yang lebih dekat dari 300 meter tidak dapat dideteksi.

Hubungan Antar Parameter

Parameter	Jika Nilainya Meningkatkan
λ (panjang gelombang)	Frekuensi menurun
τ (pulse length)	Energi naik, blind range bertambah
PRF	Jarak maksimum menurun
PRT	Jarak maksimum bertambah

Kesimpulan

Secara sederhana:

- ❖ **Pulse Length besar** → target jauh lebih mudah dideteksi, tetapi blind range bertambah.
- ❖ **PRF tinggi** → pengukuran Doppler lebih baik, tetapi jangkauan maksimum berkurang.
- ❖ **PRF rendah** → jangkauan lebih jauh, tetapi pengukuran kecepatan menjadi kurang optimal.

Resolusi Radar Cuaca

KONSEP **resolusi radar (Radar Resolution)**, yaitu kemampuan radar untuk membedakan dua target yang letaknya berdekatan.

Ada dua jenis resolusi utama yang ditunjukkan pada gambar:

1. Resolusi Azimuth (Azimuth Resolution)

Resolusi azimuth adalah kemampuan radar membedakan dua target yang berada pada arah (sudut) yang berbeda. Pada gambar ditunjukkan oleh:

$$\theta$$

dengan:

- ❖ θ = lebar berkas antena (*beam width*)
- ❖ Satuan = derajat ($^{\circ}$)

Ilustrasi

Misalnya radar memiliki beam width: $\theta = 1^{\circ}$

Maka seluruh target yang berada dalam berkas 1° tersebut akan dianggap sebagai satu target oleh radar.

Pengaruh Jarak

Semakin jauh dari radar, semakin lebar area yang dicakup beam.

Contoh:

Beam Width = 1°

Pada jarak 100 km:

$$100 \times \tan(1^{\circ}) \approx 1,75 \text{ km}$$

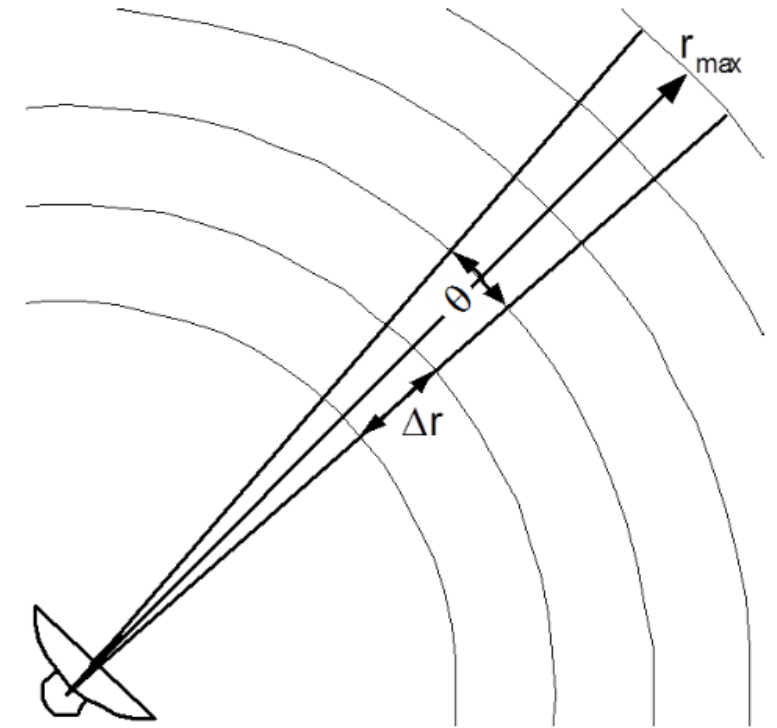
Pada jarak 250 km:

$$250 \times \tan(1^{\circ}) \approx 4,36 \text{ km}$$



Artinya:

- ❖ Dekat radar → detail lebih baik.
 - ❖ Jauh dari radar → detail semakin kasar.
- Ini adalah sebabnya sel hujan kecil yang masih terlihat jelas dekat radar bisa tampak melebar pada jarak jauh.



Resolusi Radar

Resolusi Radar Cuaca

2. Resolusi Radial (Range Resolution)

Resolusi radial adalah kemampuan radar membedakan dua target yang berada pada arah yang sama tetapi jaraknya berbeda. Pada gambar ditunjukkan dengan:

$$\Delta r$$

dan dihitung menggunakan:

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

Karena:

$$\Delta t = \tau$$

maka:

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2}$$

Mengapa Resolusi Radar Dibagi 2?

Karena sinyal radar:

- ❖ Pergi menuju target
- ❖ Kembali ke radar

Jadi waktu yang diukur adalah waktu pulang-pergi.

Contoh pada Gambar

Pulse Length = 0,5 μ s

$$\Delta r = 75 \text{ m}$$

Artinya:

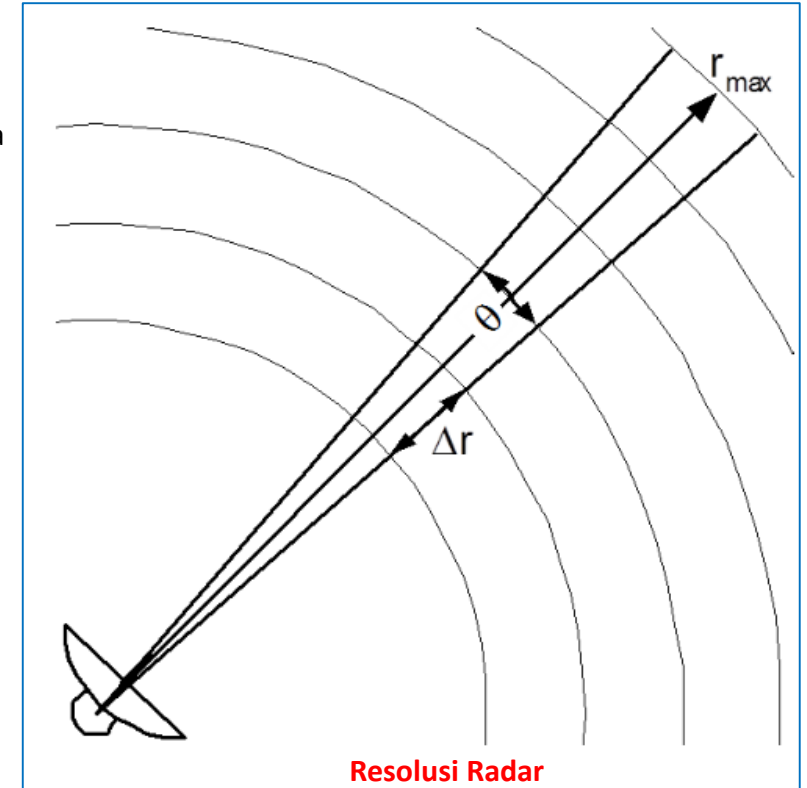
Dua target yang jaraknya lebih dekat dari 75 meter akan terlihat sebagai satu target.

Pulse Length = 1 μ s

$$\Delta r = 150 \text{ m}$$

Pulse Length = 3 μ s

$$\Delta r = 450 \text{ m}$$



Apa Artinya?

Semakin pendek pulsa:

- ❖ Resolusi lebih baik
- ❖ Detail hujan lebih jelas
- ❖ Energi lebih kecil

Semakin panjang pulsa:

- ❖ Energi lebih besar
- ❖ Target jauh lebih mudah dideteksi
- ❖ Resolusi lebih kasar

Resolusi Radar Cuaca

Penjelasan Gambar Sebelah Kanan

Pada gambar kanan terlihat:

- ❖ Radar di bawah.
- ❖ Berkas radar membentuk sudut θ .
- ❖ Lingkaran-lingkaran adalah jarak dari radar.
- ❖ Δr menunjukkan ukuran satu "sel resolusi" sepanjang arah radial.

Radar sebenarnya tidak mengukur titik tunggal, tetapi mengukur **volume sampel (resolution volume)** yang dibatasi oleh:

- ❖ Beam Width (θ)
- ❖ Range Resolution (Δr)

Setiap piksel pada tampilan radar merupakan rata-rata pantulan dari volume udara tersebut.

Hubungan dengan Produk Radar Cuaca

Misalnya radar BMKG:

- ❖ Beam Width = 1°
- ❖ Pulse Length = $0,5 \mu s$
- ❖ Range = 250 km

Maka:

Resolusi Radial ≈ 75 meter

Resolusi Azimuth pada 250 km

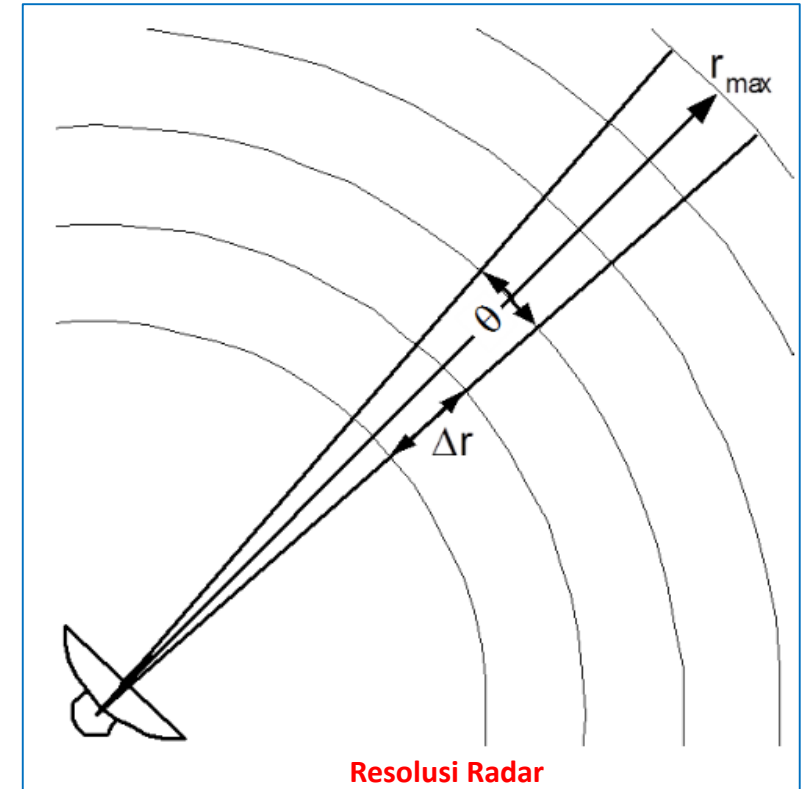
$$250 \times \tan(1^\circ) \approx 4,4 \text{ km}$$

Artinya pada jarak 250 km:

Satu piksel radar bisa mewakili area sekitar:

4,4 km \times 75 m

Karena itu detail struktur hujan di dekat radar jauh lebih tajam dibandingkan pada jarak yang jauh.



Kesimpulan

Gambar ini menunjukkan bahwa kualitas detail radar ditentukan oleh dua parameter utama:

Resolusi Azimuth (θ)

- ❖ Ditentukan oleh beam width antena.
- ❖ Semakin kecil beam width, semakin tajam detail arah.

Resolusi Radial (Δr)

- ❖ Ditentukan oleh panjang pulsa (Pulse Length).
- ❖ Semakin pendek pulsa, semakin baik kemampuan radar membedakan target yang berdekatan.

Secara sederhana:

Beam Width mengontrol ketajaman ke samping (arah azimuth), sedangkan **Pulse Length** mengontrol ketajaman ke depan-belakang (arah jarak/range). Kedua parameter ini menentukan seberapa detail struktur hujan yang dapat ditampilkan oleh radar cuaca.

Resolusi Radar Cuaca

Gambar disamping memberikan contoh nyata bagaimana resolusi radar (range resolution, Δr) memengaruhi kemampuan radar membedakan target yang berdekatan.

Pada bagian bawah terlihat grafik amplitudo echo terhadap jarak. Sumbu horizontal menunjukkan jarak (range), sedangkan sumbu vertikal menunjukkan kekuatan pantulan (amplitudo).

1. Target Tunggal (Single Chimney)

Pada contoh pertama terdapat satu cerobong asap.

Yang Terjadi

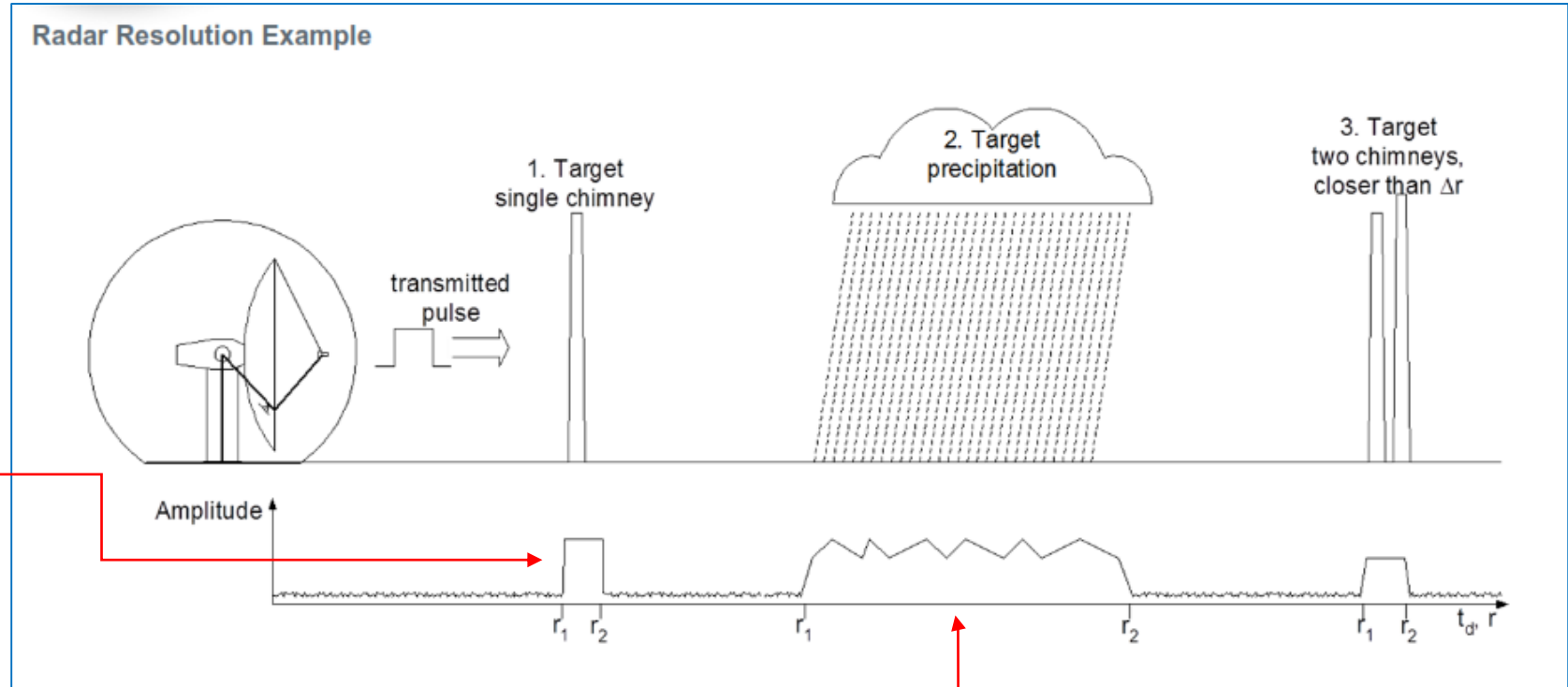
- ❖ Radar mengirim pulsa.
- ❖ Pulsa mengenai cerobong.
- ❖ Cerobong memantulkan energi kembali.

Karena hanya ada satu target, radar menerima satu echo.

Pada grafik terlihat bawah:

- ❖ Echo mulai pada jarak r_1
- ❖ Echo berakhir pada jarak r_2

Sehingga muncul satu puncak pantulan yang jelas.



2. Target Presipitasi (Hujan)

Pada contoh kedua targetnya adalah area hujan yang terjadi

Di dalam volume hujan terdapat ribuan hingga jutaan tetesan air. Setiap tetesan memantulkan sebagian energi ke radar.

Akibatnya:

- ❖ Echo diterima terus-menerus dari berbagai jarak.
- ❖ Pantulan menjadi lebih lebar dan tidak seragam.

Pada grafik bawah terlihat:

- ❖ Echo menyebar dari r_1 sampai r_2 .
- ❖ Bentuknya bergelombang karena distribusi tetesan hujan tidak merata.

Resolusi Radar Cuaca

3. Dua Cerobong Sangat Berdekatan

Ini bagian paling penting dari gambar.

Terdapat:

- ❖ Cerobong pertama
- ❖ Cerobong kedua

Tetapi jaraknya: $d < \Delta r$

artinya:

jarak antar target lebih kecil daripada resolusi radar.

Apa yang Terjadi?

Echo dari cerobong pertama dan kedua kembali hampir bersamaan. Radar tidak mampu memisahkannya. Akibatnya:

- ❖ Kedua echo saling bertumpuk.
- ❖ Radar melihatnya sebagai satu target.

Pada grafik bawah terlihat hanya satu puncak echo.

Padahal sebenarnya ada dua objek.

Analogi Sederhana

Bayangkan mata manusia melihat:

- ❖ Dua lampu yang sangat berjauhan → terlihat dua lampu.
- ❖ Dua lampu yang sangat berdekatan → terlihat seperti satu lampu besar. Radar mengalami hal yang sama.

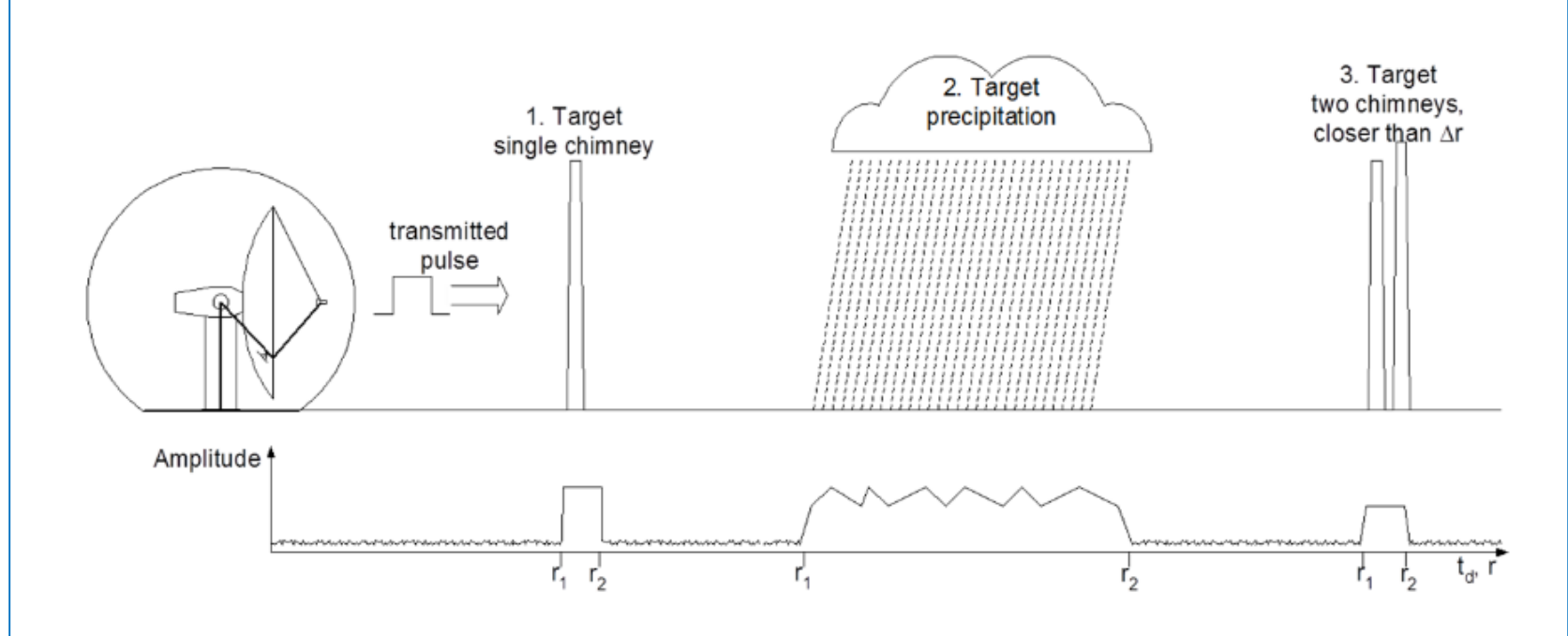
Kapan Dua Target Bisa Dipisahkan?

Jika:

$$d > \Delta r$$

maka radar dapat menghasilkan dua echo terpisah.

Radar Resolution Example



Jika:

$$d < \Delta r$$

maka radar hanya menghasilkan satu echo gabungan.

Hubungan dengan Pulse Length

Resolusi jarak radar:

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2}$$

dimana:

c = kecepatan cahaya

τ = pulse length

Semakin pendek pulse length:

- ❖ Δr semakin kecil
- ❖ Kemampuan memisahkan target semakin baik

Hubungannya dengan Radar Cuaca

Dalam radar cuaca:

Resolusi Buruk

- ❖ Sel hujan kecil dapat bergabung dengan sel hujan di dekatnya.
- ❖ Detail struktur badai hilang.

Resolusi Baik

- ❖ Inti hujan lebat dapat dipisahkan dengan jelas.
- ❖ Struktur badai, gust front, atau hook echo lebih mudah terlihat.

Resolusi Radar Cuaca

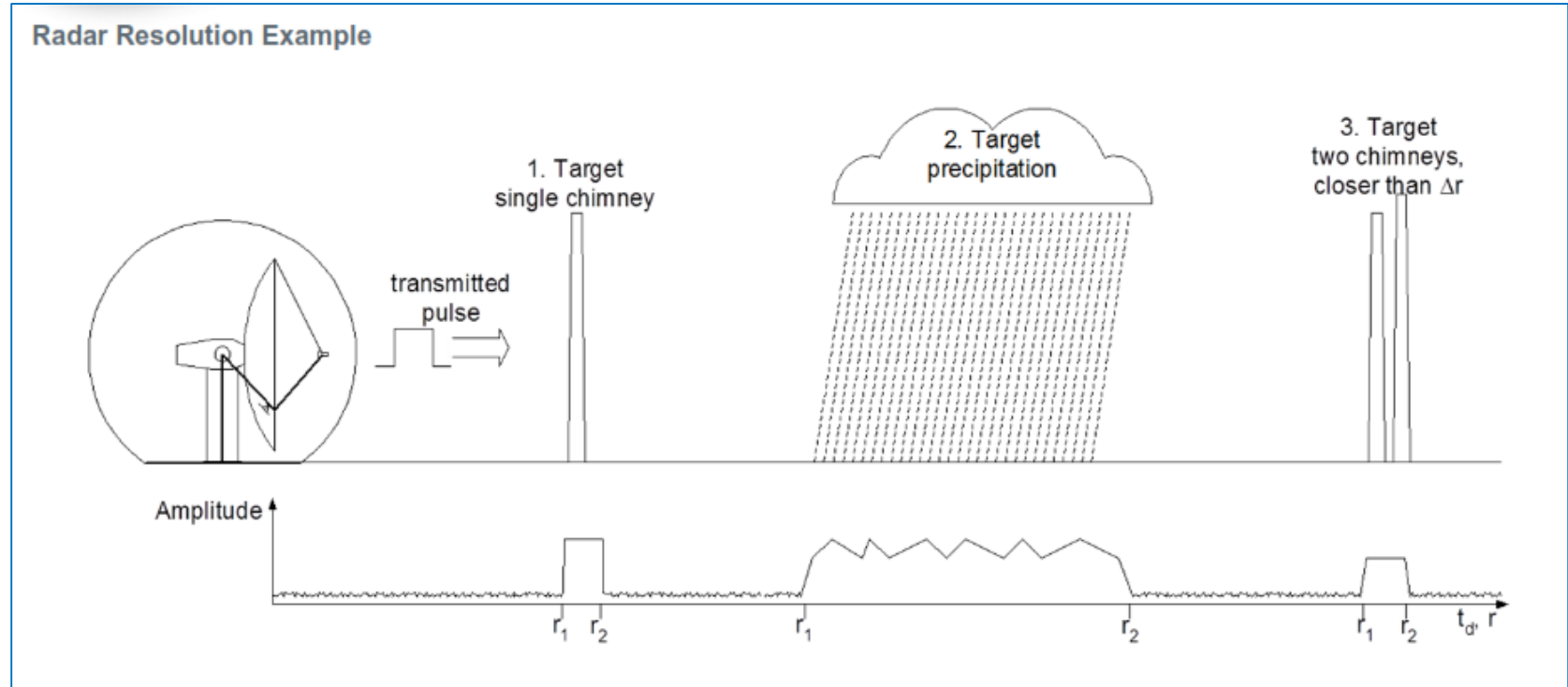
Kesimpulan

Gambar ini menunjukkan bahwa radar hanya dapat membedakan dua target jika jarak antar target **lebih besar dari resolusi jarak (Δr)**.

❖ **Satu target** → satu echo.

❖ **Area hujan** → echo menyebar sepanjang area hujan.

❖ **Dua target yang jaraknya $< \Delta r$** → terlihat sebagai satu target karena echo bertumpuk.



Inilah alasan mengapa **pulse length yang lebih pendek menghasilkan citra radar yang lebih detail**, karena nilai Δr menjadi lebih kecil sehingga radar mampu memisahkan target-target yang letaknya berdekatan.

Gambar ini menjelaskan konsep **Unambiguous Range (Jarak Tak Ambigu)** dan **Second Trip Echo (Echo Pantulan Kedua)** pada radar cuaca. Ini adalah salah satu sumber **echo palsu (false echo)** yang sering muncul pada citra radar.

1. Apa itu Unambiguous Range?

Unambiguous Range adalah jarak maksimum yang dapat diukur radar dengan benar tanpa kebingungan asal pulsa.

Rumusnya:

$$r_{max} = \frac{c \cdot PRT}{2} = \frac{c}{2PRF}$$

Keterangan:

c = kecepatan cahaya

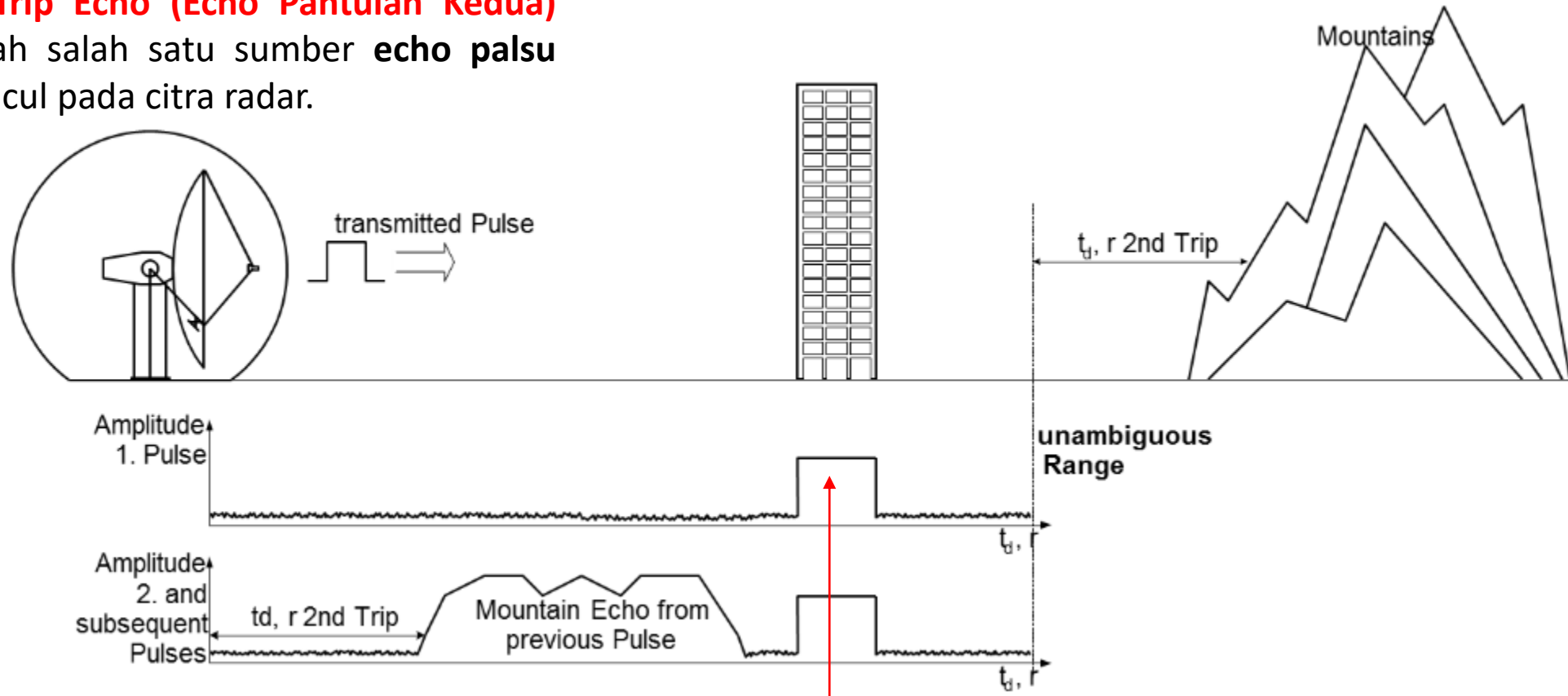
PRT = Pulse Repetition Time

PRF = Pulse Repetition Frequency

Pada gambar Garis bertuliskan:

Unambiguous Range

menunjukkan batas maksimum jarak yang dapat diukur radar dengan benar.



2. Pulsa Pertama

Pada bagian atas gambar:

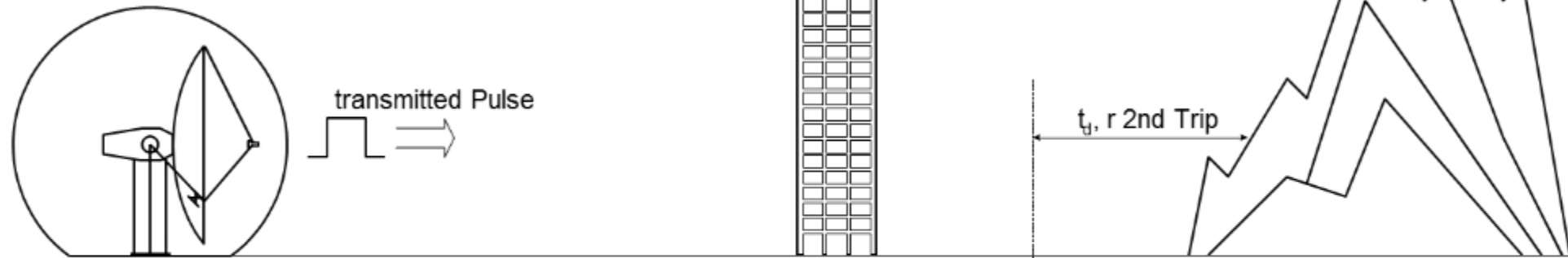
- ❖ Radar memancarkan pulsa.
- ❖ Pulsa mengenai gedung yang berada di dalam unambiguous range.
- ❖ Echo kembali sebelum pulsa berikutnya dipancarkan.

Hasilnya:

Radar mengetahui posisi target dengan benar.

Pada grafik bawah terlihat satu puncak echo pada lokasi yang tepat.

Gambar ini menjelaskan konsep **Unambiguous Range (Jarak Tak Ambigu)** dan **Second Trip Echo (Echo Pantulan Kedua)** pada radar cuaca. Ini adalah salah satu sumber **echo palsu (false echo)** yang sering muncul pada citra radar.

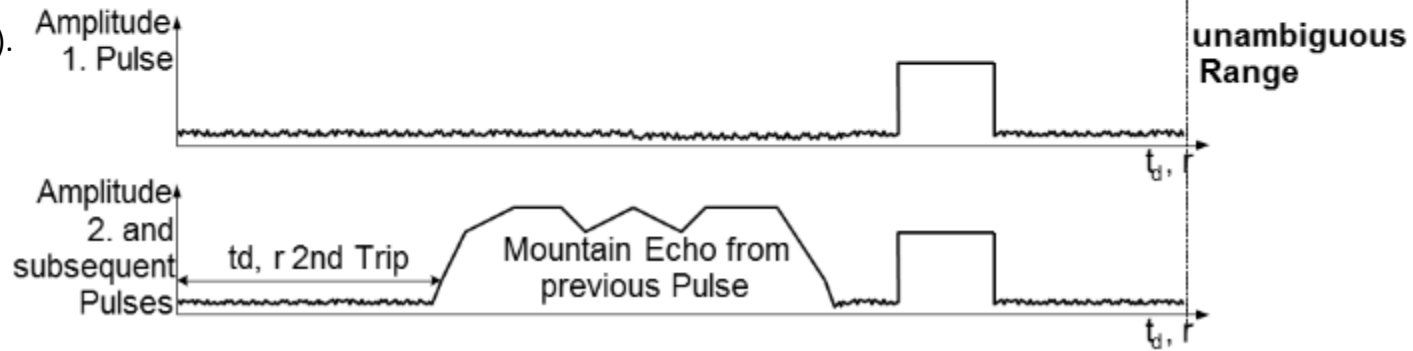


3. Target Jauh di Luar Unambiguous Range

Di sebelah kanan terdapat pegunungan (Mountains). Pegunungan berada:

$$r > r_{max}$$

Artinya lebih jauh dari pada jangkauan tak ambigu radar.



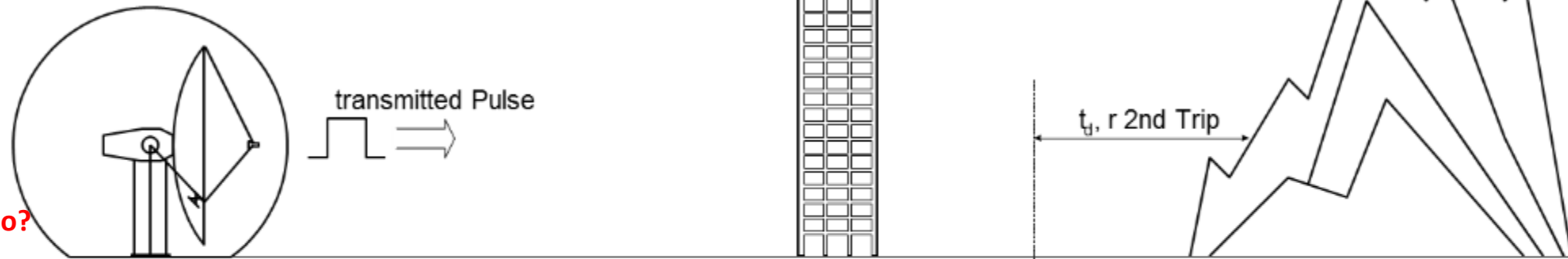
Apa yang Terjadi?

Echo dari pegunungan memerlukan waktu lama untuk kembali. Sebelum echo tersebut tiba Radar sudah mengirim pulsa berikutnya.

Akibatnya radar salah mengira:

Echo yang berasal dari pulsa lama dianggap sebagai echo dari pulsa baru. Inilah yang disebut: **Second Trip Echo** atau **Multiple Trip Echo**.

Gambar ini menjelaskan konsep **Unambiguous Range (Jarak Tak Ambigu)** dan **Second Trip Echo (Echo Pantulan Kedua)** pada radar cuaca. Ini adalah salah satu sumber **echo palsu (false echo)** yang sering muncul pada citra radar.



4. Mengapa Disebut Second Trip Echo?

Urutannya:

Pulsa 1

Radar mengirim pulsa pertama.

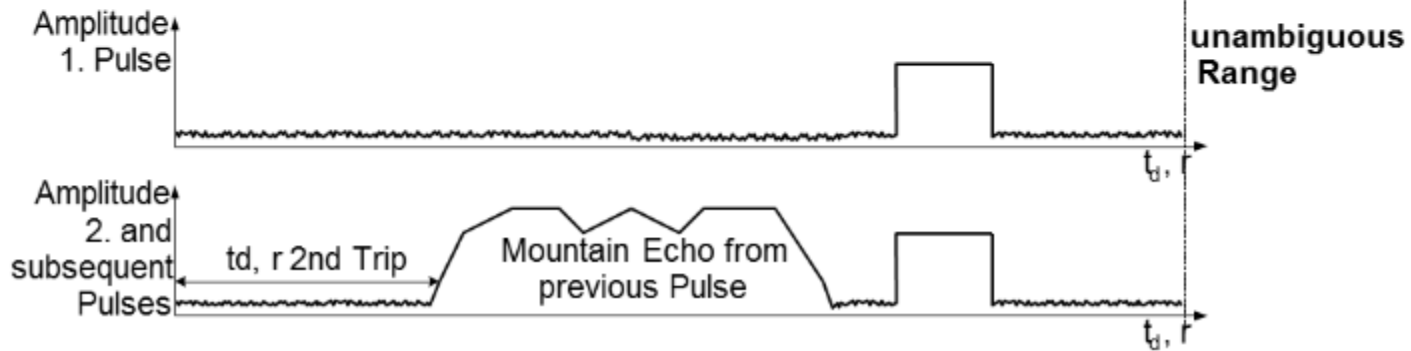
↓
Pulsa mencapai pegunungan yang sangat jauh.

↓
Echo belum sempat kembali.

Pulsa 2

Radar sudah mengirim pulsa kedua.

↓
Baru kemudian echo dari pulsa pertama tiba.



Radar berpikir: "Ini pasti pantulan dari pulsa kedua."
Padahal sebenarnya: Pantulan tersebut berasal dari pulsa pertama.

5. Akibatnya pada Tampilan Radar

Echo pegunungan yang sebenarnya jauh sekali muncul pada jarak yang lebih dekat.

Pada citra radar:

- ❖ Gunung jauh bisa tampak berada dekat radar.
- ❖ Hujan jauh bisa muncul di lokasi yang salah.

6. Mengapa Posisi Second Trip Echo Bisa Berubah?

Pada bagian atas gambar tertulis:

Change of PRF → unambiguous range will change → second trip echo will change position in range

Artinya:

Jika PRF diubah:

- ❖ Unambiguous range berubah.
- ❖ Lokasi munculnya second trip echo juga berubah.

Gambar ini menjelaskan konsep **Unambiguous Range (Jarak Tak Ambigu)** dan **Second Trip Echo (Echo Pantulan Kedua)** pada radar cuaca. Ini adalah salah satu sumber **echo palsu (false echo)** yang sering muncul pada citra radar.

7. Bagaimana Mengenal Second Trip Echo pada Radar Cuaca?

Biasanya:

- ❖ Muncul jauh dari area hujan sebenarnya.
- ❖ Posisinya berubah ketika PRF berubah.
- ❖ Sering muncul dekat batas jangkauan radar.
- ❖ Tidak konsisten dengan citra satelit.
- ❖ Tidak bergerak seperti sistem cuaca.

Contoh pada Radar Cuaca

Misalnya radar memiliki:

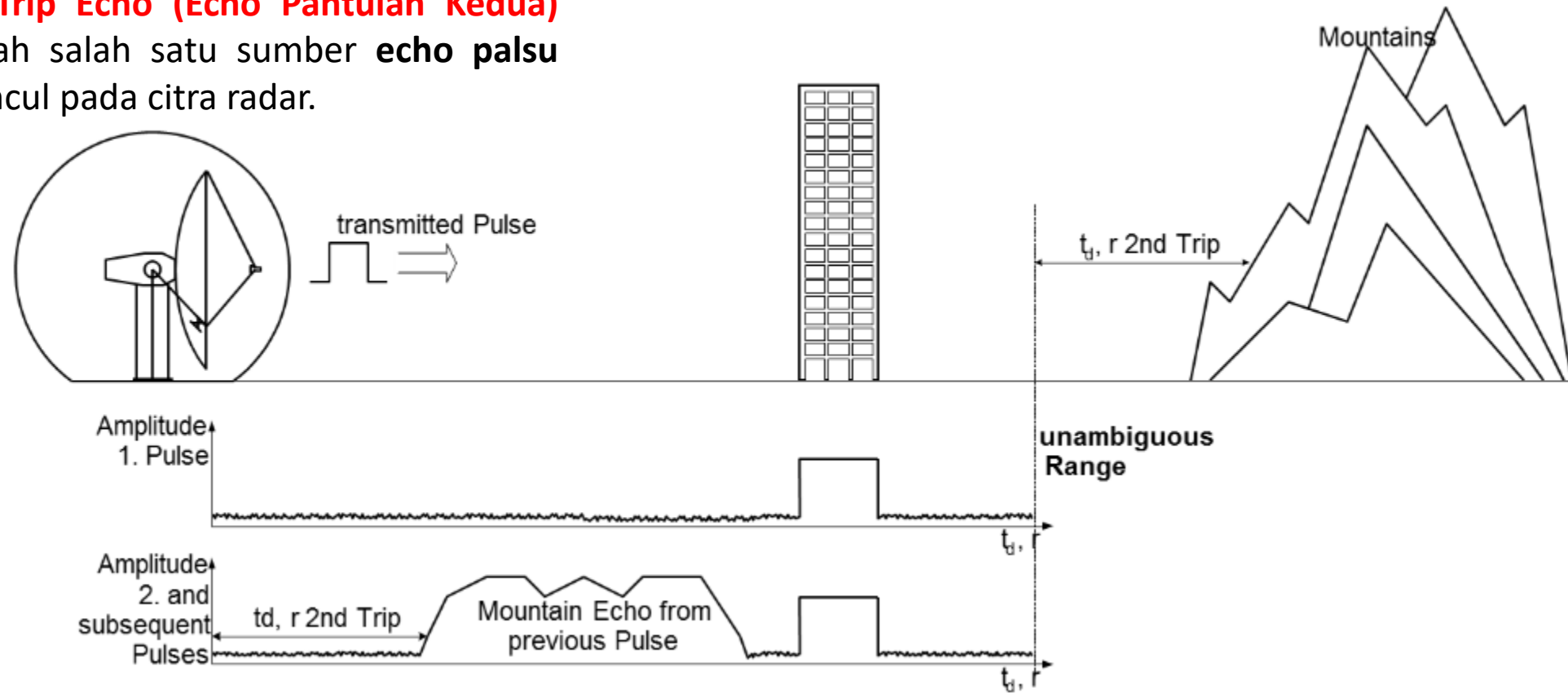
- ❖ PRF = 500 Hz
- ❖ Unambiguous range \approx 300 km

Jika ada badai sangat kuat pada jarak 350 km:

Echo dapat kembali setelah pulsa berikutnya dipancarkan.

Akibatnya:

Badai 350 km dapat muncul secara palsu pada jarak sekitar 50 km dari radar. Padahal sebenarnya badai tersebut jauh di luar jangkauan tak ambigu.



Kesimpulan

Gambar ini menunjukkan bagaimana **echo dari target yang berada di luar Unambiguous Range** dapat kembali terlambat dan **salah ditempatkan oleh radar**.

Fenomena ini disebut:

Second Trip Echo (Echo Pantulan Kedua)

Ciri utamanya:

- ❖ Disebabkan oleh PRF yang terlalu tinggi atau target yang terlalu jauh.
- ❖ Target sebenarnya berada di luar jangkauan tak ambigu.
- ❖ Echo muncul pada jarak yang salah (lebih dekat dari posisi sebenarnya).
- ❖ Merupakan salah satu bentuk artefak atau echo palsu pada radar cuaca.

ANTENA MAIN AND SIDE LOBES

Gambar ini menjelaskan **pola pancaran antena radar (antenna radiation pattern)**, khususnya perbedaan antara **main lobe (lobus utama)** dan **side lobes (lobus samping)**.

Gambar Utama

Di sisi kiri terdapat dua ilustrasi:

❑ Isotropic Radiator (lingkaran merah yang Anda tandai)

- ❖ Antena teoritis yang memancarkan energi ke segala arah secara merata.
- ❖ Bentuknya seperti lingkaran penuh karena energi tersebar 360°.

❑ Radar Antenna

- ❖ Antena radar parabola memfokuskan energi menjadi berkas sempit (beam) ke satu arah.
- ❖ Berkas sempit berwarna biru panjang disebut **main lobe**.
- ❖ Karena energi dipusatkan ke satu arah, diperoleh **gain** (penguatan) yang besar.

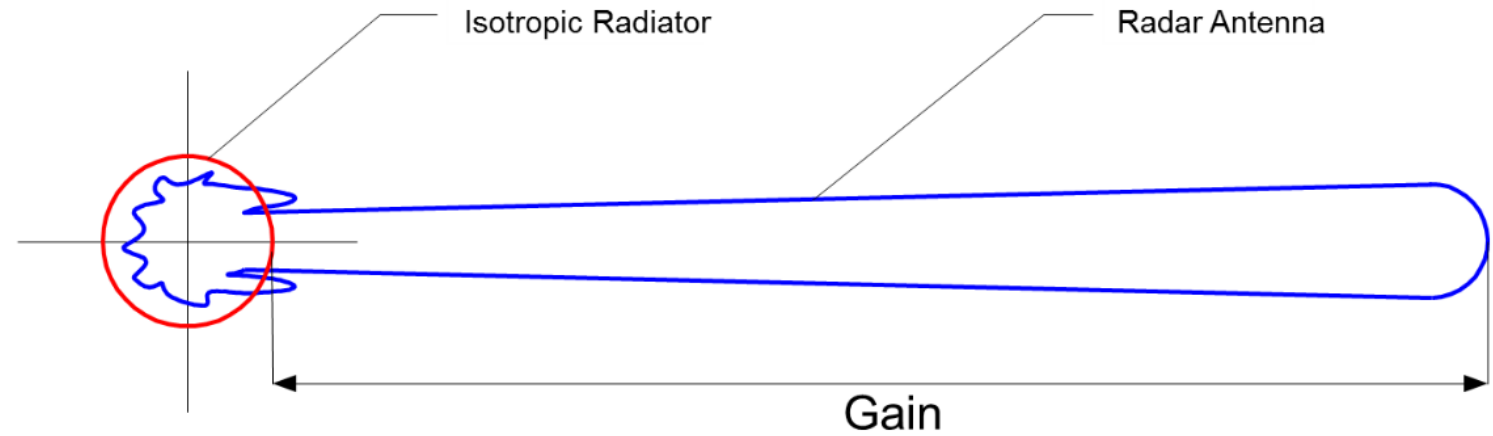
Lingkaran Merah yang Anda Tandai

Bagian bergerigi di sekitar antena menunjukkan **side lobes**. Meskipun antena radar berusaha memancarkan energi hanya ke depan, kenyataannya tidak mungkin 100% sempurna yang disebabkan karena adanya:

- ❖ Difraksi pada tepi reflektor parabola
 - ❖ Ketidaktersempurnaan desain antena
 - ❖ Distribusi energi pada feed horn
- maka sebagian kecil energi bocor ke arah lain membentuk **side lobes**.

Pada gambar:

- ❖ Garis biru panjang → **Main Lobe**
- ❖ Gelombang kecil bergerigi di sekitar antena → **Side Lobes**



Persentase Energi

- ❖ Sekitar **98% energi** berada di Main Lobe.
 - ❖ Sekitar **2% energi** berada di Side Lobes.
- Jadi walaupun kecil, side lobe tetap ada.

Dampak Side Lobe pada Radar Cuaca

Untuk radar cuaca (misalnya Radar S-Band yang Anda gunakan), side lobe dapat menyebabkan:

1. Ground Clutter

Pantulan dari:

- ❖ Gunung
- ❖ Bukit
- ❖ Gedung
- ❖ Menara

yang sebenarnya berada di luar beam utama.

Akibatnya muncul echo palsu.

ANTENA MAIN AND SIDE LOBES

Gambar ini menjelaskan pola pancaran antena radar (antenna radiation pattern), khususnya perbedaan antara main lobe (lobus utama) dan side lobes (lobus samping).

2. Side Lobe Echo

Awan hujan yang sangat kuat dapat tertangkap melalui side lobe sehingga menghasilkan:

- ❖ Pantulan tidak nyata
- ❖ Area hujan palsu
- ❖ Artefak pada produk reflektivitas

3. Overestimation Curah Hujan

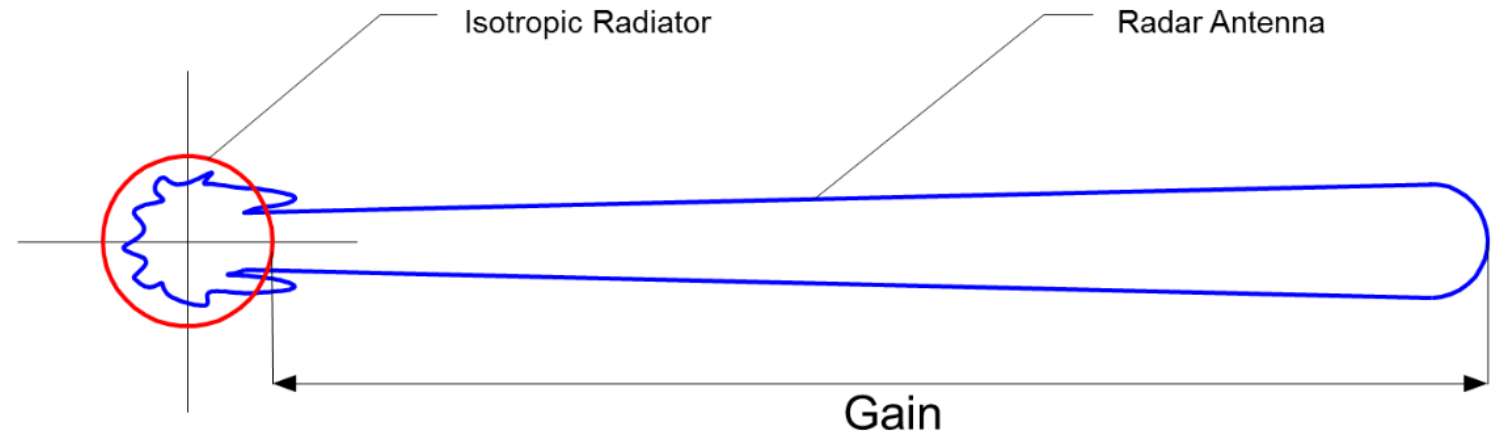
Jika side lobe mengenai objek dengan reflektivitas tinggi maka nilai dBZ bisa menjadi lebih besar dari kondisi sebenarnya.

Analogi Sederhana

Bayangkan Anda menggunakan senter:

- ❖ Cahaya terang di tengah = **Main Lobe**
- ❖ Cahaya redup yang menyebar ke samping = **Side Lobes**

Walaupun fokus cahaya mengarah ke depan, tetap ada sedikit cahaya yang menyebar ke samping. Pada antena radar, energi elektromagnetik juga berperilaku seperti itu.



Hubungan dengan Gain

Panah **Gain** di bagian bawah menunjukkan bahwa:

- ❖ Antena isotropik memiliki gain = 0 dBi (referensi).
- ❖ Antena radar memfokuskan energi menjadi beam sempit sehingga gain sangat besar (biasanya radar cuaca S-Band sekitar 44–46 dBi).

Semakin sempit beam utama:

- ❖ Gain semakin tinggi.
- ❖ Resolusi radar semakin baik.
- ❖ Side lobe biasanya semakin kecil relatif terhadap main lobe.

Kesimpulan

Gambar ini menunjukkan bahwa antena radar tidak memancarkan energi hanya pada satu berkas utama saja. Sebagian besar energi (~98%) terkonsentrasi pada **main lobe** yang menghasilkan gain tinggi, tetapi sebagian kecil (~2%) bocor menjadi **side lobes** yang dapat menyebabkan pantulan tidak diinginkan (clutter, echo palsu, dan gangguan pengukuran radar cuaca).

ANTENA MAIN AND SIDE LOBES

Gambar disamping menunjukkan bagaimana side lobe pada antena radar dapat menyebabkan target yang sama muncul lebih dari satu kali (multiple display) dan meningkatkan clutter pada tampilan radar.

Bagian-bagian gambar

1. Main Lobe (lobus utama)

Area abu-abu besar yang mengarah ke awan hujan adalah **main lobe**.

- ❖ Ini adalah berkas radar utama.
- ❖ Sebagian besar energi radar dipancarkan melalui jalur ini.
- ❖ Pantulan dari hujan yang diterima melalui main lobe merupakan data yang diinginkan.

2. Side Lobes (lobus samping)

Garis-garis tipis di atas dan bawah main lobe adalah **side lobes**.

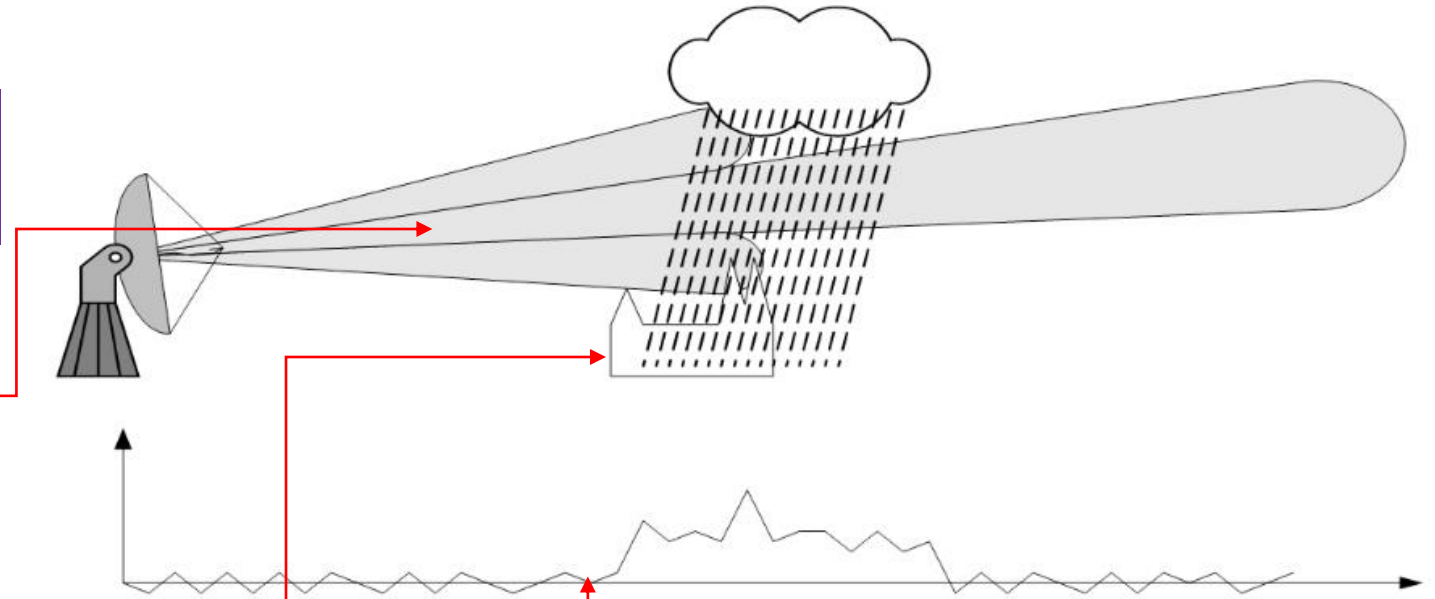
- ❖ Energinya jauh lebih kecil dibanding main lobe.
- ❖ Tetap mampu mengenai objek yang sama, misalnya awan hujan.
- ❖ Pantulan dari side lobe ikut diterima radar.

Apa yang Terjadi pada Gambar?

Awan hujan berada di dalam beam utama, tetapi juga terkena beberapa side lobe. Akibatnya:

- ❖ Main lobe mengenai hujan → menghasilkan echo utama.
- ❖ Side lobe juga mengenai hujan → menghasilkan echo tambahan.
- ❖ Radar menganggap pantulan tersebut berasal dari beberapa arah berbeda.

Hasilnya, target hujan yang sebenarnya satu dapat terlihat beberapa kali pada display radar.

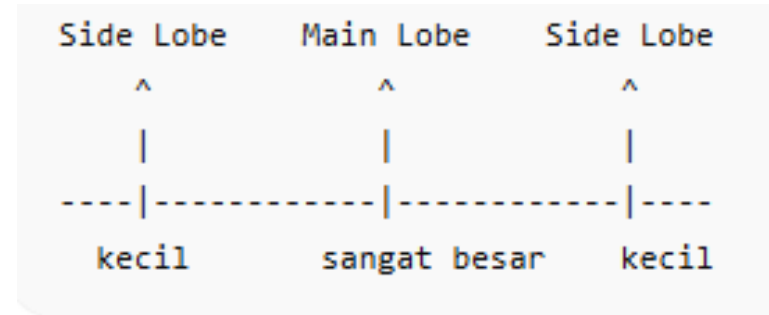


Grafik di Bagian Bawah

Grafik bawah merupakan ilustrasi kekuatan sinyal yang diterima radar.

- ❖ Puncak tertinggi di tengah = pantulan dari **main lobe**.
- ❖ Puncak-puncak kecil di samping = pantulan dari **side lobes**.

Secara sederhana:



Karena energi side lobe lebih lemah, puncaknya juga lebih rendah.

ANTENA MAIN AND SIDE LOBES

Gambar disamping menunjukkan bagaimana side lobe pada antena radar dapat menyebabkan target yang sama muncul lebih dari satu kali (multiple display) dan meningkatkan clutter pada tampilan radar.

Dampak pada Radar Cuaca

Kasus 1: Hujan Sangat Lebat

Jika ada sel badai dengan reflektivitas tinggi (misalnya >55 dBZ):

- ❖ Main lobe menerima pantulan kuat.
- ❖ Side lobe juga menerima pantulan yang masih cukup kuat.

Akibatnya dapat muncul:

- ❖ Echo ganda
- ❖ Area hujan palsu
- ❖ Ring atau bayangan di sekitar inti badai

Kasus 2: Ground Clutter

Jika side lobe mengenai:

- ❖ Gunung
- ❖ Gedung
- ❖ Menara
- ❖ Bukit

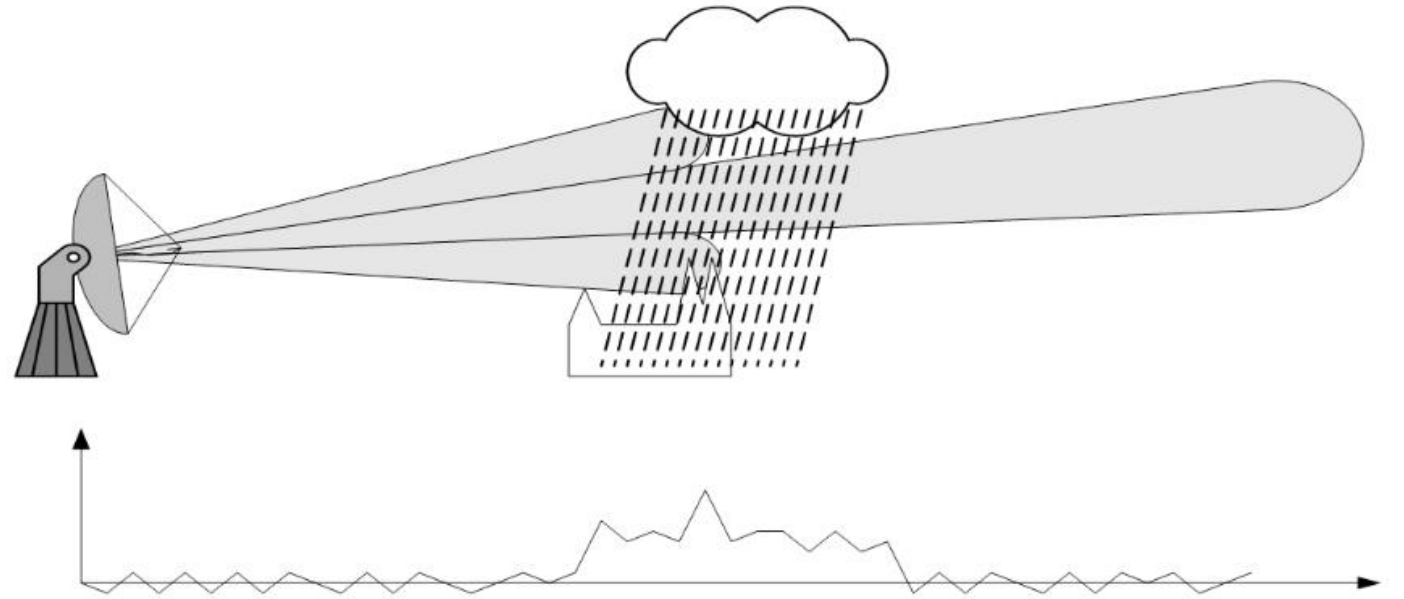
maka radar menerima pantulan yang sebenarnya berada di luar beam utama. Akibatnya muncul clutter tambahan pada PPI.

Kesimpulan

Gambar tersebut menjelaskan bahwa **side lobe dapat mengenai target hujan yang sama dengan yang terkena main lobe**. Akibatnya radar menerima pantulan tambahan sehingga:

- 1.Target yang sama bisa muncul lebih dari sekali (multiple display).
- 2.Ground clutter bertambah.
- 3.Muncul echo palsu atau artefak pada produk radar.

Semakin kecil level side lobe suatu antena (misalnya -30 dB dibanding -20 dB), semakin baik kualitas data radar karena gangguan side lobe menjadi lebih kecil.



Pada Radar Cuaca S-Band

Untuk radar cuaca seperti Gematronik/Leonardo Rainbow:

Side lobe biasanya terlihat sebagai:

- ❖ Echo tipis di sekitar sel badai yang sangat kuat.
- ❖ Ground clutter yang lebih luas dari seharusnya.
- ❖ "Bayangan" atau duplikasi target.
- ❖ Reflektivitas rendah yang mengelilingi echo utama.

Fenomena ini sering terlihat saat ada:

- ❖ Cumulonimbus (Cb) yang sangat kuat.
- ❖ Hujan ekstrem dekat radar.
- ❖ Pegunungan di sekitar lokasi radar.

PRINSIP PENGHITUNGAN RADAR

Gambar disamping menjelaskan prinsip dasar bagaimana radar cuaca mengubah sinyal yang diterima menjadi estimasi curah hujan di permukaan. Secara sederhana, radar tidak mengukur hujan secara langsung, tetapi melalui beberapa tahap perhitungan.

Alur Pengukuran Radar

1. Radar menerima sinyal pantulan (P_r)

Di sisi kiri terlihat:

- ❖ **Antenna** radar
- ❖ **Receiver** (penerima)

Radar memancarkan gelombang elektromagnetik ke atmosfer. Ketika gelombang mengenai tetes hujan di dalam awan, sebagian energi dipantulkan kembali ke radar. Energi pantulan yang diterima disebut P_r dengan satuan **mW (milliwatt)**. Semakin banyak tetes hujan atau semakin besar ukurannya, semakin besar nilai P_r

2. Receiver mengubah sinyal menjadi data digital (U)

Sinyal analog dari receiver kemudian dikonversi menjadi angka digital oleh ADC (Analog-to-Digital Converter). Pada gambar ditulis:

U dalam satuan **AD Counts**

Artinya:

- ❖ Radar sebenarnya membaca angka digital mentah.
- ❖ Belum berupa reflektivitas atau curah hujan.

Langkah 1: Kalibrasi Radar

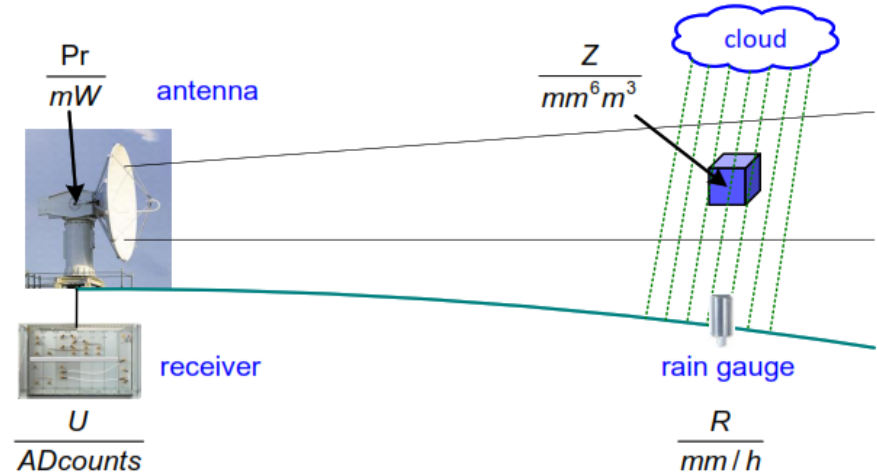
Di bagian bawah tertulis:

$$P_r = f_1(U)$$

Artinya:

Radar menggunakan **fungsi kalibrasi** untuk mengubah nilai digital (U) menjadi daya pantulan sebenarnya (P_r). Tanpa kalibrasi yang baik:

- ❖ Nilai dBZ bisa salah.
- ❖ Estimasi hujan bisa meleset.



1. Step: $P_r = f_1(U)$ → Radar calibration function
2. Step: $Z = f_2(P_r)$ → Radar equation
3. Step: $R = f_3(Z)$ → Z/R relation

Langkah 2: Persamaan Radar

Kemudian:

$$Z = f_2(P_r)$$

Di sini radar menghitung **Reflektivitas (Z)**, dan ditulis sebagai :

$$Z (mm^6/m^3)$$

Reflektivitas menggambarkan Seberapa banyak dan seberapa besar partikel hujan di dalam volume radar. Semakin besar nilai Z:

- ❖ Semakin banyak tetes hujan.
- ❖ Semakin besar ukuran tetes hujan.

PRINSIP PENGHITUNGAN RADAR

Gambar disamping menjelaskan prinsip dasar bagaimana radar cuaca mengubah sinyal yang diterima menjadi estimasi curah hujan di permukaan. Secara sederhana, radar tidak mengukur hujan secara langsung, tetapi melalui beberapa tahap perhitungan.

Kubus Biru pada Awan

Kubus biru menggambarkan **Volume sampling radar (radar bin atau radar resolution volume)**. Radar tidak mengukur seluruh awan sekaligus. Radar hanya mengukur volume kecil tertentu dalam beam.

Misalnya:

- ❖ Lebar beam = 1°
- ❖ Resolusi jarak = 250 m

Maka satu bin radar memiliki volume tertentu yang digunakan untuk menghitung Z.

Langkah 3: Hubungan Z-R

Setelah memperoleh reflektivitas:

$$R = f_3(Z)$$

Radar mengubah Z menjadi:

$$R$$

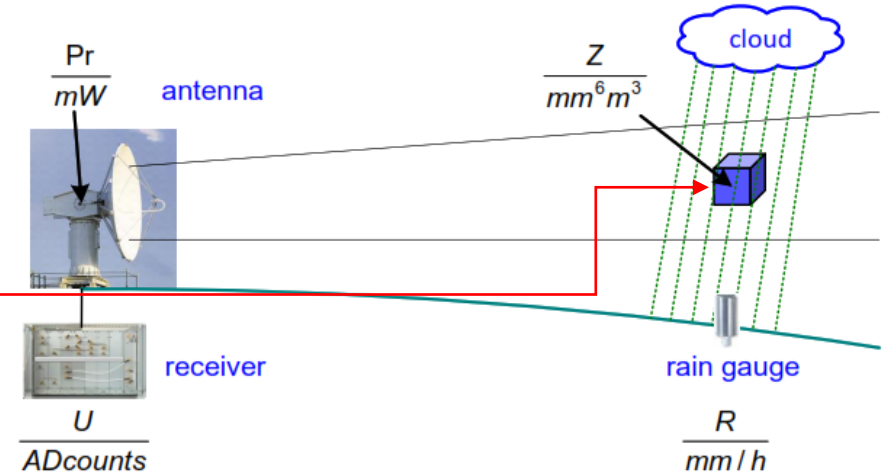
yaitu **intensitas hujan** dengan satuan: *mm/h*

Persamaan Z-R yang Umum

Radar cuaca sering menggunakan:

$$Z = 200R^{1.6}$$

Persamaan diatas dikenal sebagai hubungan **Marshall-Palmer**.



1. Step: $Pr = f_1(U)$ → Radar calibration function
2. Step: $Z = f_2(Pr)$ → Radar equation
3. Step: $R = f_3(Z)$ → Z/R relation

Contoh:

dBZ	Intensitas Hujan
20 dBZ	Gerimis
30 dBZ	Hujan ringan
40 dBZ	Hujan sedang
50 dBZ	Hujan lebat
60 dBZ	Hujan sangat lebat

PRINSIP PENGHITUNGAN RADAR

Gambar disamping menjelaskan prinsip dasar bagaimana radar cuaca mengubah sinyal yang diterima menjadi estimasi curah hujan di permukaan. Secara sederhana, radar tidak mengukur hujan secara langsung, tetapi melalui beberapa tahap perhitungan.

Peran Rain Gauge pada Gambar

Silinder kecil di permukaan adalah **rain gauge (ombrometer)**. Rain gauge digunakan untuk:

- ❖ Mengukur hujan sebenarnya di permukaan.
- ❖ Membandingkan hasil radar dengan kondisi nyata.
- ❖ Menyesuaikan persamaan Z-R agar lebih akurat untuk wilayah setempat.

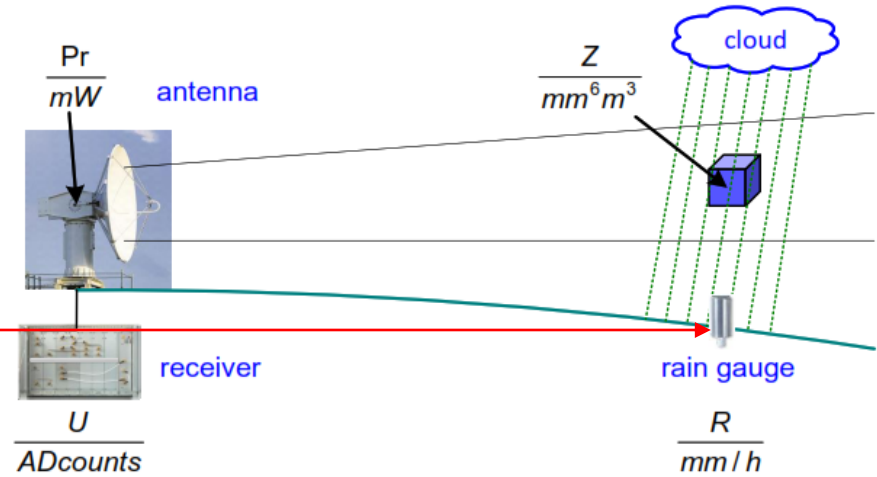
Karena:

- ❖ Radar mengukur di atmosfer.
- ❖ Rain gauge mengukur di permukaan.

Keduanya perlu dibandingkan secara berkala.

Inti dari gambar

- ❖ Radar cuaca **tidak langsung mengukur curah hujan (mm/jam)**.
- ❖ Radar hanya mengukur **energi pantulan** dari tetes hujan. Melalui proses **kalibrasi** → **perhitungan reflektivitas (Z)** → **konversi Z-R**,
- ❖ radar akhirnya dapat memperkirakan intensitas hujan yang kemudian dibandingkan dengan pengukuran **rain gauge** di permukaan untuk memastikan akurasinya.



Ringkasan Proses

```
Radar memancarkan gelombang
↓
Pantulan diterima antena
↓
Receiver menghasilkan data digital (U)
↓
Kalibrasi radar
↓
Diperoleh daya pantulan (Pr)
↓
Persamaan radar
↓
Diperoleh reflektivitas (Z)
↓
Hubungan Z-R
↓
Diperoleh curah hujan (R)
```

PROSES KALIBRASI RADAR

Gambar disamping menjelaskan fungsi kalibrasi radar (Radar Calibration Function), yaitu hubungan antara:

❖ P_r (Received Power) = daya pantulan yang diterima radar (dBm)

❖ U (AD Counts) = nilai digital yang dibaca receiver radar

Kalibrasi ini sangat penting karena radar sebenarnya tidak langsung mengukur dBZ, melainkan membaca sinyal digital dari receiver.

1. Sumbu Grafik

Sumbu Horizontal (X)

$$P_r \text{ (dBm)}$$

Daya sinyal yang diterima radar.

Contoh:

❖ -113 dBm → sinyal sangat lemah

❖ -57 dBm → sinyal sedang

❖ -20 dBm → sinyal sangat kuat

Semakin ke kanan, sinyal semakin kuat.

Sumbu Vertikal (Y)

$$U \text{ (AD Counts)}$$

Nilai digital keluaran receiver.

Ini adalah angka yang dibaca **ADC (Analog-to-Digital Converter)**.

2. Daerah Noise

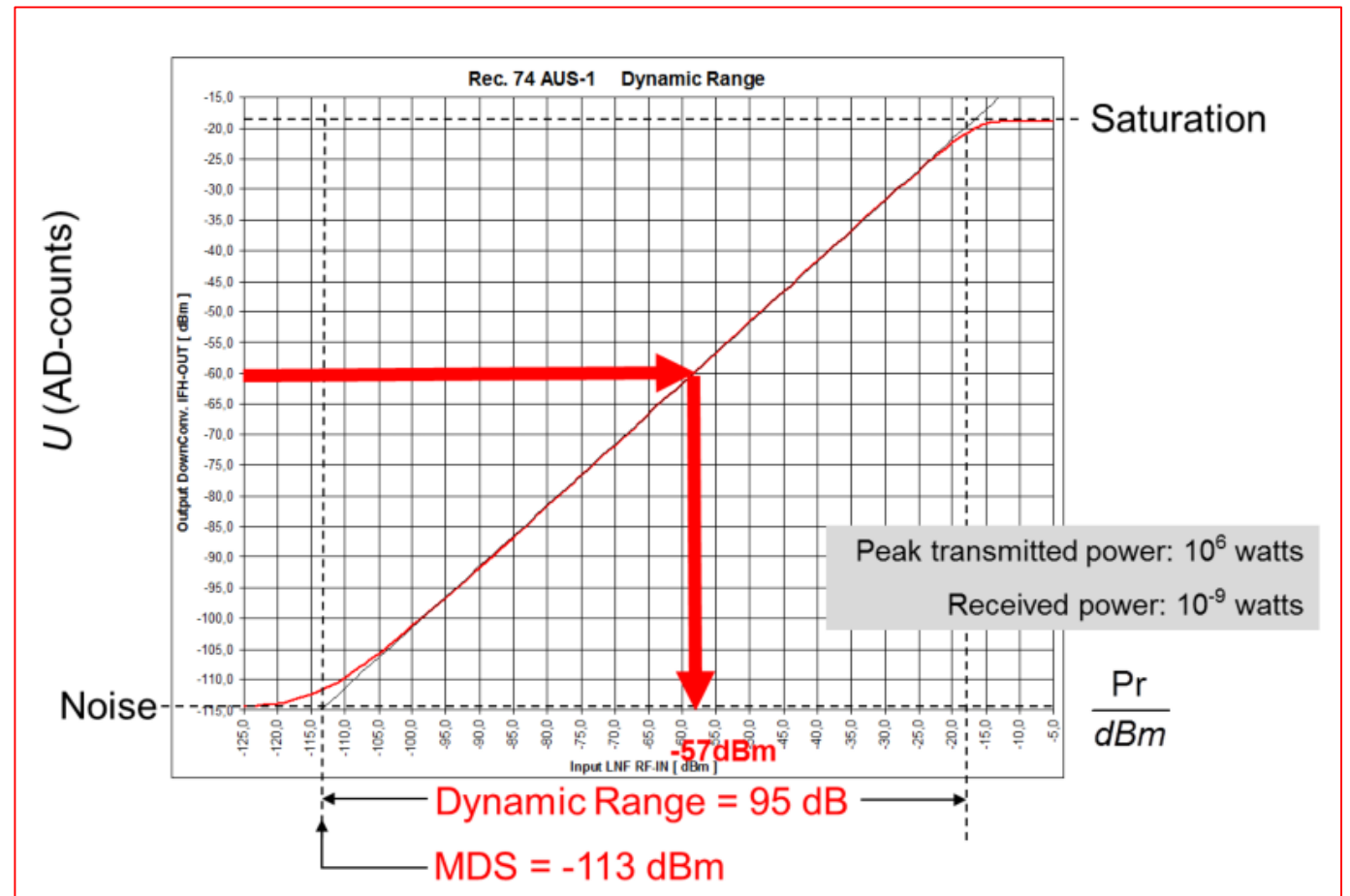
Di bagian kiri bawah terdapat tulisan: **Noise** Ini adalah daerah dimana:

❖ Sinyal terlalu lemah.

❖ Tidak dapat dibedakan dari noise elektronik receiver.

Pada gambar ditunjukkan:

$$MDS = -113 \text{ dBm}$$



MDS = **Minimum Detectable Signal**

Artinya Radar tidak dapat mendeteksi sinyal yang lebih kecil dari sekitar -113 dBm.

Contoh

Jika pantulan hujan menghasilkan:

❖ -120 dBm, maka radar hampir tidak bisa melihatnya.

Jika:

❖ -110 dBm, maka radar mulai bisa mendeteksinya.

PROSES KALIBRASI RADAR

Gambar disamping menjelaskan fungsi kalibrasi radar (Radar Calibration Function), yaitu hubungan antara:

- ❖ P_r (Received Power) = daya pantulan yang diterima radar (dBm)
 - ❖ U (AD Counts) = nilai digital yang dibaca receiver radar
- Kalibrasi ini sangat penting karena radar sebenarnya tidak langsung mengukur dBZ, melainkan membaca sinyal digital dari receiver.

3. Daerah Linear (Paling Penting)

Bagian tengah grafik berupa **garis lurus merah**. Di daerah ini berlaku:

$$U \propto P_r$$

Artinya:

Jika daya pantulan naik **10 dB**, maka output digital juga naik secara proporsional. Ini adalah daerah operasi ideal radar. Sebagian besar pengukuran cuaca dilakukan di daerah ini.

Contoh Panah Merah

Panah menunjukkan:

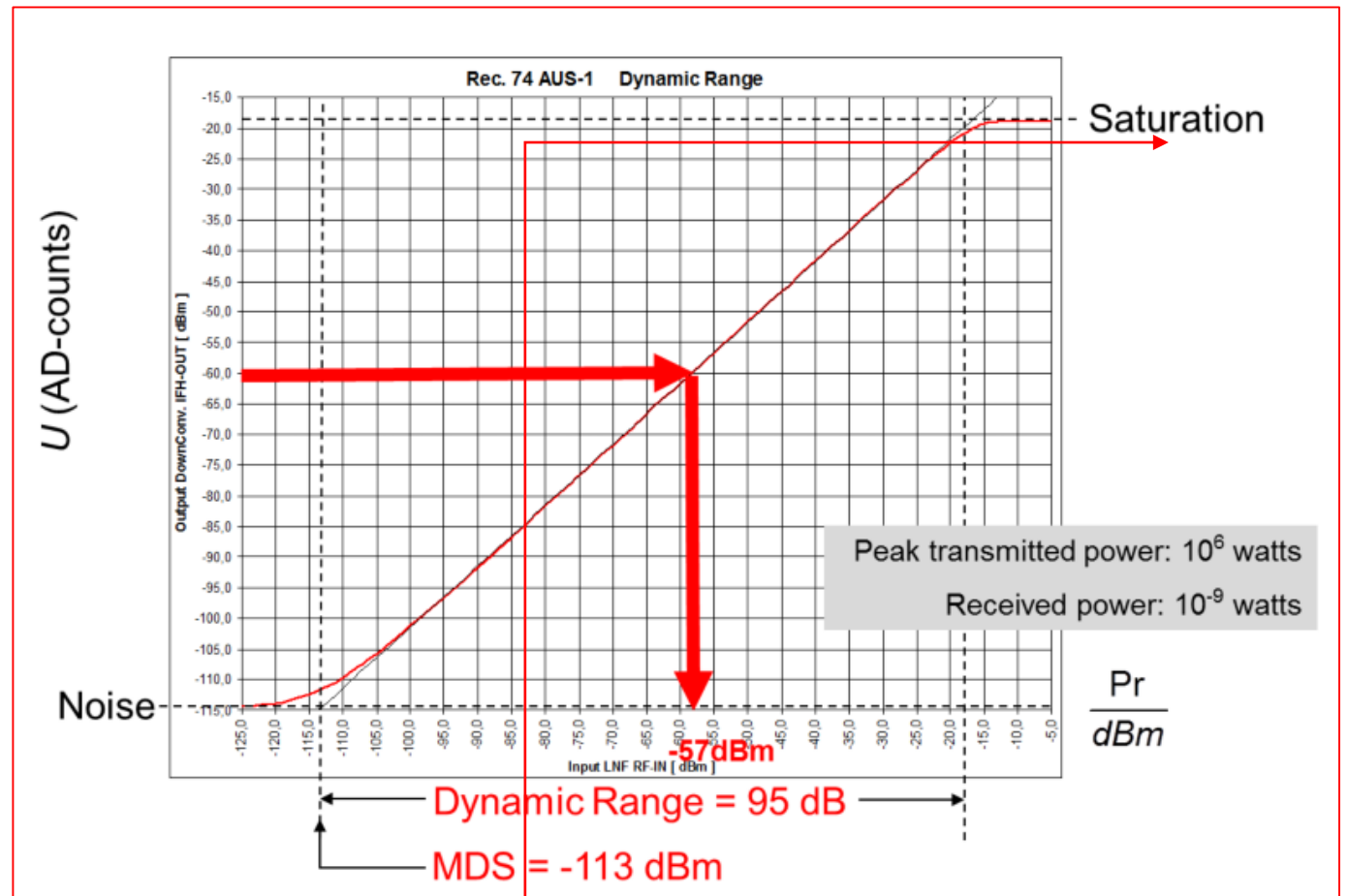
Jika receiver menghasilkan nilai sekitar

$$U = -60$$

maka berdasarkan kurva kalibrasi didapat:

$$P_r \approx -57 \text{ dBm}$$

Inilah fungsi kalibrasi: $P_r = f(U)$



4. Daerah Saturasi

Di kanan atas terdapat tulisan: **Saturation**

Artinya:

Receiver sudah mencapai batas maksimum. Walaupun sinyal terus bertambah kuat, output digital hampir tidak bertambah lagi. Kurva menjadi datar.

Analogi

Seperti timbangan dengan kapasitas 150 kg:

- ❖ Berat 100 kg → terbaca normal
 - ❖ Berat 140 kg → terbaca normal
 - ❖ Berat 180 kg → tetap menunjukkan maksimum
- Receiver radar juga demikian.

PROSES KALIBRASI RADAR

Gambar disamping menjelaskan fungsi kalibrasi radar (Radar Calibration Function), yaitu hubungan antara:

- ❖ P_r (Received Power) = daya pantulan yang diterima radar (dBm)
 - ❖ U (AD Counts) = nilai digital yang dibaca receiver radar
- Kalibrasi ini sangat penting karena radar sebenarnya tidak langsung mengukur dBZ, melainkan membaca sinyal digital dari receiver.

5. Dynamic Range

Di bagian bawah tertulis:

$$\text{Dynamic Range} = 95 \text{ dB}$$

Artinya:

Radar mampu mengukur sinyal mulai dari:

$$-113 \text{ dBm}$$

sampai sekitar:

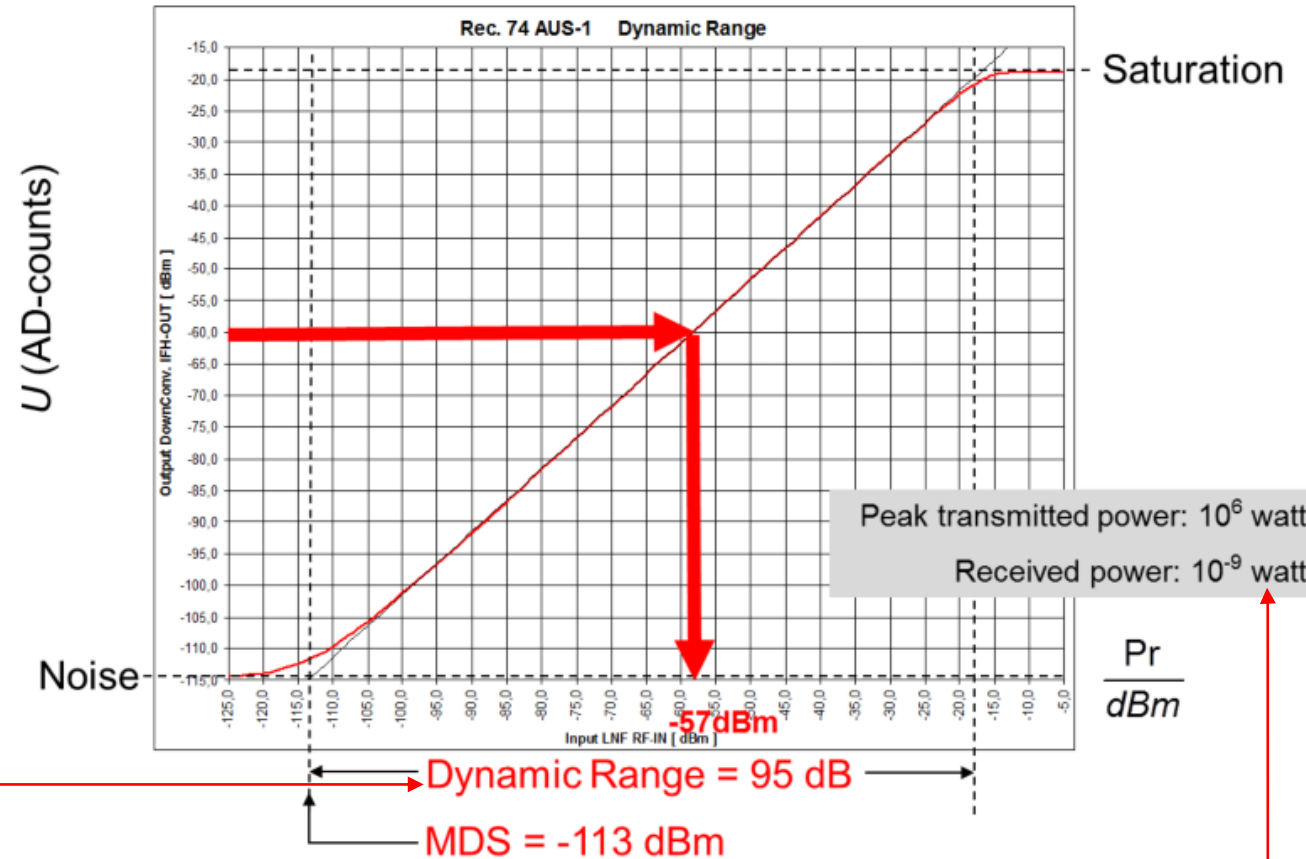
$$-18 \text{ dBm}$$

Rentangannya:

$$95 \text{ dB}$$

Semakin besar dynamic range:

- ❖ Semakin mampu mendeteksi hujan sangat lemah dan sangat kuat secara bersamaan.
- ❖ Semakin baik kualitas radar.



6. Kotak Abu-Abu di Kanan

Tertulis:

- ❖ Peak transmitted power = 10610⁶106 watt
 - ❖ Received power = 10⁻⁹10⁻⁹10⁻⁹ watt
- Artinya: Radar memancarkan daya sangat besar: **1.000.000 watt**

Tetapi setelah menempuh jarak jauh dan dipantulkan kembali oleh tetes hujan, yang diterima radar hanya **0,000000001 watt** atau **1 nanowatt** **Karena itulah receiver radar harus sangat sensitif.**

PROSES KALIBRASI RADAR

Gambar disamping menjelaskan fungsi kalibrasi radar (Radar Calibration Function), yaitu hubungan antara:

❖ P_r (Received Power) = daya pantulan yang diterima radar (dBm)

❖ U (AD Counts) = nilai digital yang dibaca receiver radar

Kalibrasi ini sangat penting karena radar sebenarnya tidak langsung mengukur dBZ, melainkan membaca sinyal digital dari receiver.

Hubungan dengan dBZ

Setelah memperoleh:

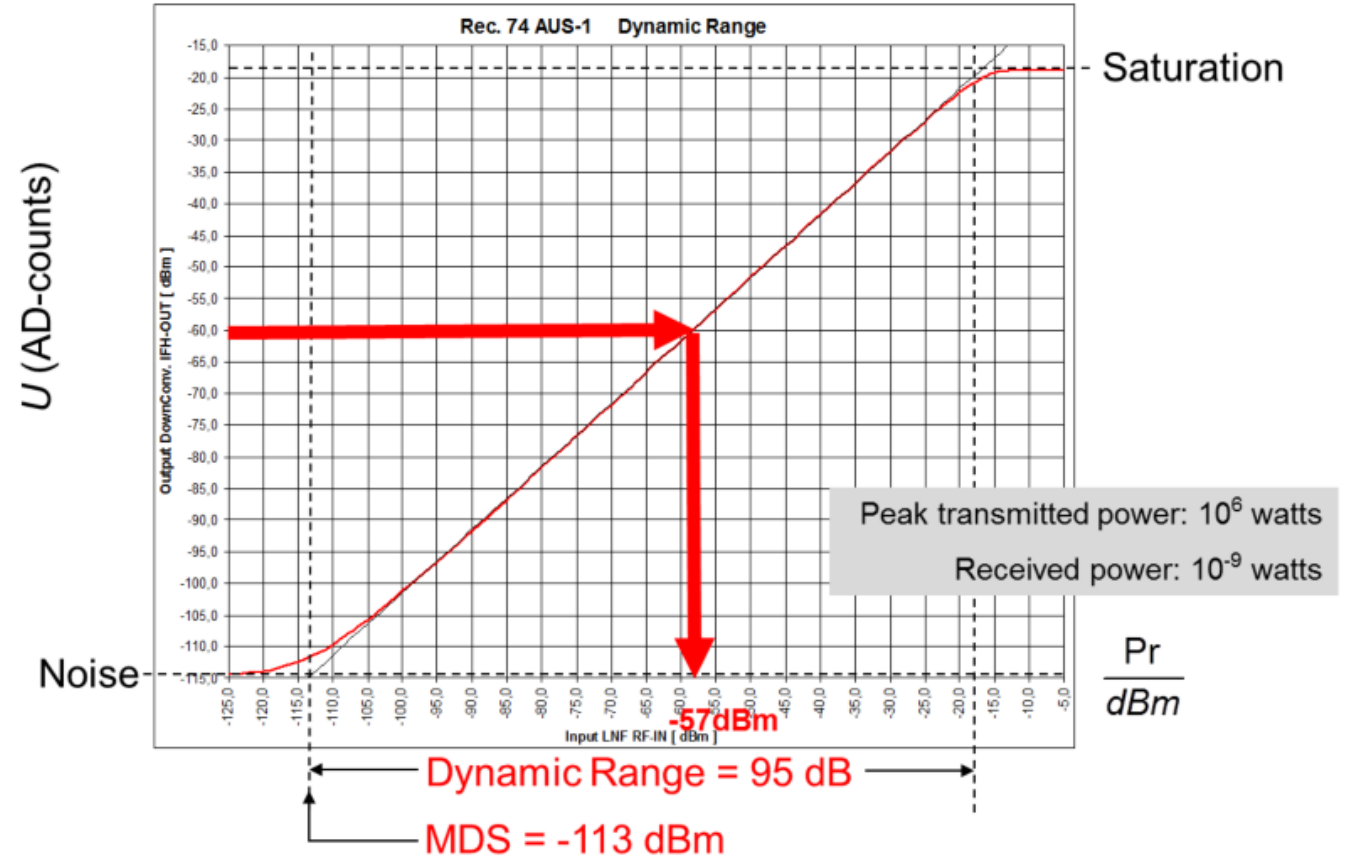
$$P_r$$

melalui kurva kalibrasi ini, radar menggunakan **Radar Equation** untuk menghitung:

$$Z \text{ (reflektivitas).}$$

Kemudian:

$$Z \rightarrow \text{dBZ} \rightarrow R(\text{mm/jam})$$



Kesimpulan

Gambar diatas menunjukkan **kurva kalibrasi receiver radar**, yaitu hubungan antara daya sinyal yang diterima radar (P_r) dan nilai digital yang dibaca sistem (U). Terdapat tiga daerah utama:

1.Noise Region (< -113 dBm) \rightarrow sinyal terlalu lemah untuk dideteksi.

2.Linear Region \rightarrow daerah kerja ideal tempat radar mengukur hujan secara akurat.

3.Saturation Region \rightarrow sinyal terlalu kuat sehingga receiver mulai jenuh.

Nilai **Dynamic Range = 95 dB** menunjukkan kemampuan radar untuk mengukur pantulan yang sangat lemah hingga sangat kuat tanpa kehilangan akurasi. Ini merupakan salah satu parameter penting dalam performa radar cuaca modern.

RADAR EQUATION

Gambar disamping menjelaskan konsep **Radar Reflectivity (Reflektivitas Radar)**, yaitu ukuran kemampuan suatu target (tetes hujan, es, salju, atau hidrometeor lainnya) dalam **memantulkan kembali energi gelombang radar** ke antena.

Apa itu Reflektivitas (Z)?

Ketika radar memancarkan gelombang elektromagnetik ke atmosfer:

1. Gelombang mengenai tetes hujan.
2. Sebagian energi dipantulkan kembali (backscatter).
3. Radar menerima pantulan tersebut.
4. Dari kekuatan pantulan itu dihitung nilai **Z (Reflectivity Factor)**. Semakin besar nilai Z:
 - ❖ Semakin banyak partikel hujan.
 - ❖ Semakin besar ukuran partikel hujan.
 - ❖ Semakin kuat pantulan ke radar.

Penjelasan Gambar

1. Radar Memancarkan Gelombang

Di sebelah kiri terlihat antena radar. Radar mengirimkan pulsa gelombang radio ke atmosfer.

Radar →→→→→→ Awan/Hujan

2. Gelombang Mengenai Partikel Hujan

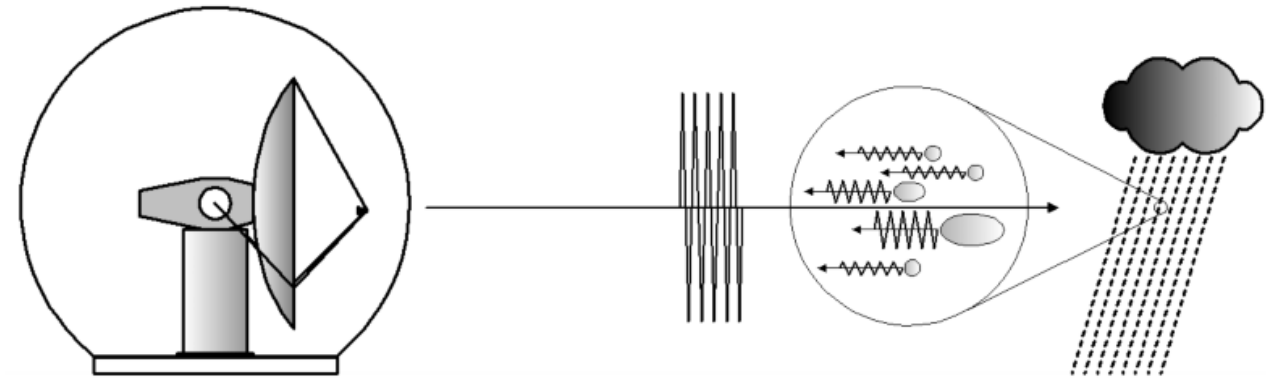
Di lingkaran tengah diperlihatkan berbagai ukuran partikel.

Terdapat:

- ❖ Partikel kecil
- ❖ Partikel sedang
- ❖ Partikel besar

Setiap partikel memantulkan sebagian energi radar.

Panah kecil yang mengarah kembali ke radar menunjukkan **backscatter** (pantulan balik).



3. Radar Menerima Pantulan

Pantulan yang kembali ke radar digunakan untuk menghitung Z, Namun dalam operasional radar cuaca biasanya ditampilkan sebagai:

dBZ

Faktor yang Mempengaruhi Reflektivitas

Pada bagian atas gambar dijelaskan bahwa reflektivitas bergantung pada:

A. Ukuran Partikel (Size)

Ini faktor paling penting.

Misalnya:

Diameter Tetes

0,5 mm

2 mm

5 mm

Pantulan

Kecil

Besar

Sangat besar

RADAR EQUATION

Gambar disamping menjelaskan konsep **Radar Reflectivity (Reflektivitas Radar)**, yaitu ukuran kemampuan suatu target (tetes hujan, es, salju, atau hidrometeor lainnya) dalam **memantulkan kembali energi gelombang radar** ke antena.

Karena dalam teori radar:

$$Z \propto D^6$$

dengan D = diameter tetes hujan.

Artinya sedikit peningkatan ukuran tetes menghasilkan peningkatan pantulan yang sangat besar. Contoh:

❖ Tetes 2 mm menghasilkan pantulan 64 kali lebih besar dibanding tetes 1 mm. Karena:

$$2^6 = 64$$

B. Konsentrasi Partikel

Jumlah partikel dalam satu volume udara. Misalnya:

- ❖ Gerimis → sedikit tetes
- ❖ Hujan lebat → banyak tetes

Semakin banyak tetes: → reflektivitas meningkat.

Mengapa Ukuran Partikel Sangat Penting?

Perhatikan lingkaran tengah. Terdapat partikel kecil dan besar. Partikel besar menghasilkan gelombang pantulan yang lebih kuat. Itulah sebabnya:

Gerimis, Banyak tetes kecil : dBZ rendah sehingga Pantulan lemah

Hujan Lebat, Banyak tetes besar: dBZ tinggi sehingga Pantulan kuat

C. Fase Partikel (State)

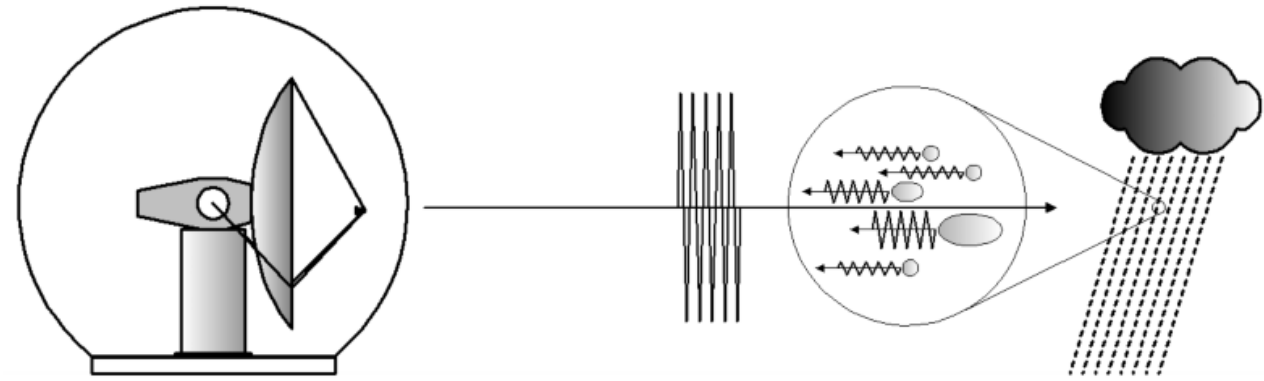
Bisa berupa:

- ❖ Air cair
- ❖ Es
- ❖ Campuran air dan es

Air cair memantulkan radar jauh lebih kuat daripada es.

Karena itu:

- ❖ Hujan biasanya memiliki dBZ lebih tinggi.
- ❖ Salju biasanya memiliki dBZ lebih rendah.



D. Bentuk Partikel (Shape)

Misalnya:

- ❖ Bulat
- ❖ Pipih
- ❖ Lonjong

Bentuk mempengaruhi cara energi dipantulkan.

Ini adalah alasan radar polarimetrik dapat membedakan:

- ❖ Hujan
- ❖ Es
- ❖ Hujan es (hail)

Kesimpulan

Gambar ini menunjukkan bahwa **reflektivitas radar (Z)** adalah ukuran seberapa efektif tetes hujan atau partikel atmosfer memantulkan energi radar kembali ke antena. Nilai Z terutama dipengaruhi oleh:

1. **Ukuran partikel** (paling berpengaruh).
2. **Jumlah partikel** dalam volume udara.
3. **Fase partikel** (air, es, campuran).
4. **Bentuk partikel**.

Semakin besar dan semakin banyak tetes hujan, semakin kuat pantulan radar dan semakin tinggi nilai **dBZ** yang terlihat pada produk reflektivitas radar cuaca.

RADAR EQUATION

1. Power P_r of Received Radiation

Bagian paling atas menunjukkan:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 L^2 c \tau \eta}{(4\pi)^3 2 r^2} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega$$

Artinya:

$$P_r \propto \frac{\eta}{r^2}$$

Simbol	Arti
P_r	Daya pantulan yang diterima radar
P_t	Daya pancar radar
G	Gain antena
λ	Panjang gelombang radar
r	Jarak target dari radar
τ	Durasi pulsa
η	Radar Reflectivity
$f(\theta, \varphi)$	Pola antena

Power P_r of received radiation

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 L^2 c \tau \eta}{(4\pi)^3 2 r^2} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega$$

Radar reflectivity η

$$\eta = \int_0^{D_{max}} \sigma(D) n(D) dD \approx \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z$$

Radar reflectivity factor Z

$$Z = \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD \rightarrow Z \sim D^6$$

Simplified radar equation

$$P_r = C \frac{1}{r^2} Z \quad C = |K|^2 \frac{\pi^5}{\lambda^4} \frac{P_t G^2 L^2 \lambda^2 c \tau}{(4\pi)^3 2} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega \quad Z = \frac{1}{C} r^2 P_r$$

Makna Fisik

Persamaan ini mengatakan:

- ❖ Pantulan semakin kuat jika target lebih reflektif.
- ❖ Pantulan semakin kuat jika radar memiliki daya pancar besar.
- ❖ Pantulan semakin lemah jika target semakin jauh.

Yang paling mudah dipahami adalah:

$$P_r \propto \frac{1}{r^2}$$

Jika jarak menjadi 2 kali lebih jauh:

$$P_r = \frac{1}{4}$$

dari semula.

RADAR EQUATION

2. Radar Reflectivity (η)

$$\eta = \int \sigma(D)n(D)dD$$

Ini menyatakan total kemampuan semua tetes hujan dalam volume radar untuk memantulkan energi.

Apa artinya?

Dalam satu volume radar terdapat:

- ❖ Tetes kecil
- ❖ Tetes sedang
- ❖ Tetes besar

Masing-masing memiliki radar cross section:

$$\sigma(D)$$

dan jumlahnya:

$$n(D)$$

Radar menjumlahkan kontribusi seluruh tetes tersebut.

3. Mengapa Muncul D^6 ?

Untuk radar cuaca (Rayleigh Scattering):

$$\sigma(D) \propto D^6$$

Sehingga:

$$\eta \propto \int D^6 n(D) dD$$

Inilah alasan reflektivitas sangat sensitif terhadap ukuran tetes hujan.

Power P_r of received radiation

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 L^2 c \tau \eta}{(4\pi)^3 2 r^2} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega$$

Radar reflectivity η

$$\eta = \int_0^{D_{max}} \sigma(D) n(D) dD \approx \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z$$

Radar reflectivity factor Z

$$Z = \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD \rightarrow Z \sim D^6$$

Simplified radar equation

$$P_r = C \frac{1}{r^2} Z \quad C = |K|^2 \frac{\pi^5}{\lambda^4} \frac{P_t G^2 L^2 \lambda^2 c \tau}{(4\pi)^3 2} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega \quad Z = \frac{1}{C} r^2 P_r$$

Contoh

Tetes 2 mm dibanding tetes 1 mm:

$$2^6 = 64$$

Artinya:

Satu tetes 2 mm menghasilkan pantulan sekitar 64 kali lebih kuat daripada satu tetes 1 mm. Inilah alasan ukuran tetes hujan sangat penting.

RADAR EQUATION

4. Radar Reflectivity Factor (Z)

Bagian berikutnya:

$$Z = \int D^6 n(D) dD$$

Ini adalah definisi resmi reflektivitas radar.

$$Z = \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD$$

Arti setiap simbol

Simbol	Arti
D	Diameter tetes hujan
$n(D)$	Jumlah tetes dengan diameter D
Z	Faktor reflektivitas

5. Simplified Radar Equation

Di bagian bawah:

$$P_r = C \frac{Z}{r^2}$$



Ini adalah bentuk sederhana dari persamaan radar.

Maknanya

Daya pantulan yang diterima radar:

- ❖ Berbanding lurus dengan reflektivitas Z
- ❖ Berbanding terbalik dengan kuadrat jarak r^2

Jika Z naik

Misalnya:

- ❖ Hujan ringan $\rightarrow Z$ kecil
- ❖ Hujan lebat $\rightarrow Z$ besar

Maka P_r yang diterima radar juga meningkat

Jika jarak naik

Misalnya:

- ❖ Hujan berada pada 50 km
- ❖ Hujan yang sama berada pada 100 km

Maka P_r menjadi sekitar seperempatnya

Power P_r of received radiation

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 L^2 c \tau \eta}{(4\pi)^3 r^2} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega$$

Radar reflectivity η

$$\eta = \int_0^{D_{max}} \sigma(D) n(D) dD \approx \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z$$

Radar reflectivity factor Z

$$Z = \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD \rightarrow Z \sim D^6$$

Simplified radar equation

$$P_r = C \frac{1}{r^2} Z \quad C = |K|^2 \frac{\pi^5}{\lambda^4} \frac{P_t G^2 L^2 \lambda^2 c \tau}{(4\pi)^3} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega \quad Z = \frac{1}{C} r^2 P_r$$

6. Menghitung Z dari Pantulan Radar

Persamaan dibalik menjadi:

$$Z = \frac{r^2 P_r}{C}$$

Ini lah yang dilakukan radar sebenarnya.

Langkahnya:

1. Radar mengukur P_r
2. Radar mengetahui jarak r
3. Konstanta radar C diketahui dari kalibrasi
4. Radar menghitung Z
5. Z dikonversi menjadi dBZ
6. dBZ dikonversi menjadi intensitas hujan (mm/jam)

RADAR EQUATION

Hubungan dengan dBZ

Karena nilai Z bisa sangat besar:

- ❖ 1
- ❖ 1000
- ❖ 1000000

maka digunakan skala logaritmik:

$$dBZ = 10 \log_{10}(Z)$$

Z	dBZ
1	0 dBZ
10	10 dBZ
100	20 dBZ
1000	30 dBZ
10000	40 dBZ
100000	50 dBZ

Kesimpulan

Gambar ini menunjukkan dasar matematika radar cuaca:

1. Radar mengukur daya pantulan P_r
2. Pantulan bergantung pada reflektivitas target η
3. Reflektivitas radar didefinisikan sebagai:

$$Z = \int D^6 n(D) dD$$

4. Karena ada faktor D^6 , ukuran tetes hujan sangat mempengaruhi pantulan radar.
5. Dengan persamaan radar:

$$P_r = C \frac{Z}{r^2}$$

radar dapat menghitung reflektivitas Z , lalu mengubahnya menjadi **dBZ** dan akhirnya menjadi **estimasi curah hujan (mm/jam)**.

Power P_r of received radiation

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 L^2 c \tau \eta}{(4\pi)^3 r^2} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega$$

Radar reflectivity η

$$\eta = \int_0^{D_{max}} \sigma(D) n(D) dD \approx \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z$$

Radar reflectivity factor Z

$$Z = \int_0^{D_{max}} D^6 n(D) dD \rightarrow Z \sim D^6$$

Simplified radar equation

$$P_r = C \frac{1}{r^2} Z \quad C = |K|^2 \frac{\pi^5}{\lambda^4} \frac{P_t G^2 L^2 \lambda^2 c \tau}{(4\pi)^3} \int_{\Omega} f^4(\theta, \varphi) d\Omega \quad Z = \frac{1}{C} r^2 P_r$$

RADAR EQUATION

Gambar disamping menunjukkan **Persamaan Radar Meteorologi (Meteorological Radar Equation)** yang menjelaskan hubungan antara:

- ❖ Daya pantulan yang diterima radar (P_r)
- ❖ Karakteristik radar
- ❖ Karakteristik hujan yang diamati

Persamaannya adalah:

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \cdot \frac{P_t G^2 \theta \phi \lambda^2}{r^2} \cdot |K|^2 \cdot Z$$

persamaan dibagi menjadi **3 kelompok (lingkaran hijau)** agar lebih mudah dipahami.

Fraksi 1: Konstanta Geometri

$$\frac{\pi^3}{1024 \ln 2}$$

Ini disebut **geometrical constant**.

Nilainya tetap dan berasal dari:

- ❖ Geometri beam radar
- ❖ Bentuk volume pengamatan radar
- ❖ Turunan matematis persamaan radar

Karena nilainya selalu sama, biasanya tidak terlalu diperhatikan dalam operasi radar sehari-hari.

Radar Equation (meteorological)

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \cdot \ln 2} \cdot \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta \cdot \phi \cdot \lambda^2}{r^2} \cdot |K|^2 \cdot Z$$

fraction 1: geometrical constant

fraction 2: constants of radar hardware

fraction 3: characteristics of the precipitation

Fraksi 2: Karakteristik Radar

$$\frac{P_t G^2 \theta \phi \lambda^2}{r^2}$$

Bagian ini berisi parameter perangkat radar.

P_t = **Peak Transmitted Power**

Daya pancar radar.

Contoh:

- ❖ Radar C-band: 250 kW
- ❖ Radar S-band: 750 kW – 1 MW

Semakin besar daya pancar: → □ Pantulan yang diterima semakin kuat.

G^2 = **Gain Antena**

Gain menunjukkan kemampuan antena memfokuskan energi.

Contoh:

- ❖ Gain 45 dBi
- ❖ Gain 46 dBi

Semakin besar gain: → □ Radar lebih sensitif.

RADAR EQUATION

θ dan ϕ

Lebar beam antena:

- θ = beamwidth horizontal
- ϕ = beamwidth vertikal

Biasanya sekitar:

1°

untuk radar cuaca modern. Beam yang lebih sempit:

- ❖ Resolusi lebih baik
- ❖ Gain lebih tinggi

λ

Panjang gelombang radar.

Contoh:

Radar	λ
X-band	3 cm
C-band	5 cm
S-band	10 cm

Panjang gelombang mempengaruhi interaksi radar dengan partikel hujan.

r^2

Jarak target dari radar.
Ini berada di penyebut

$\frac{1}{r^2}$

Artinya:

Semakin jauh target:

→ □ Sinyal yang diterima semakin kecil.

Contoh:

- ❖ 50 km → sinyal kuat
- ❖ 100 km → sinyal sekitar 4 kali lebih lemah

Fraksi 3: Karakteristik Presipitasi

$$|K|^2 \cdot Z$$

Bagian ini berhubungan langsung dengan hujan.

Faktor Dielektrik $|K|^2$

Menunjukkan kemampuan partikel memantulkan gelombang radar. Nilainya berbeda untuk:

| Jenis Partikel | $|K|^2$ |

|-----|-----|

| Air cair | ≈ 0.93 |

| Es | ≈ 0.20 |



Radar Equation (meteorological)

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \cdot \ln 2} \cdot \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta \cdot \phi \cdot h}{\lambda^2} \cdot \frac{|k|^2}{r^2} \cdot Z$$

fraction 1: geometrical constant

fraction 2: constants of radar hardware

fraction 3: characteristics of the precipitation

Artinya:

Air cair memantulkan radar jauh lebih kuat daripada es.
Itulah sebabnya:

- ❖ Hujan menghasilkan dBZ tinggi.
- ❖ Salju menghasilkan dBZ lebih rendah.

RADAR EQUATION

Reflektivitas Z

Ini adalah parameter paling penting.

$$Z = \int D^6 n(D) dD$$

Artinya: Z bergantung pada:

- ❖ Ukuran tetes hujan
- ❖ Jumlah tetes hujan

Karena ada faktor:

$$D^6$$

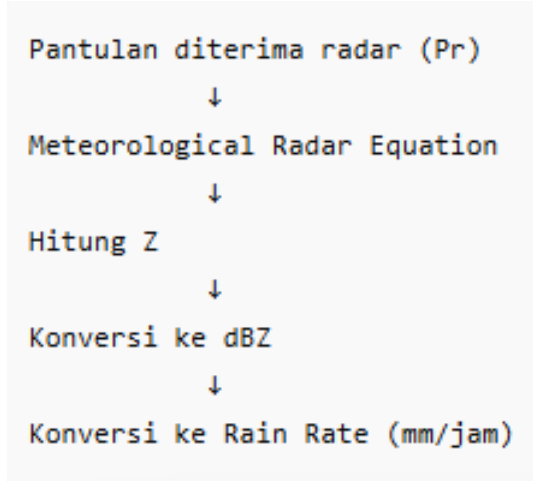
maka ukuran tetes sangat dominan.

Hubungannya dengan Produk Radar Cuaca

Ketika radar menampilkan:

- ❖ Reflectivity (dBZ)
- ❖ CAPPI
- ❖ PPI
- ❖ Rainfall Rate

prosesnya adalah:



Radar Equation (meteorological)

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \cdot \ln 2} \cdot \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta \cdot \phi \cdot h}{\lambda^2} \cdot \frac{|k|^2}{r^2} \cdot Z$$

fraction 1: geometrical constant

fraction 2: constants of radar hardware

fraction 3: characteristics of the precipitation

Jadi berdasarkan persamaan pada gambar diatas menjelaskan bahwa **daya pantulan yang diterima radar (P_r)** ditentukan oleh tiga kelompok faktor utama:

1. **Konstanta geometri radar.**
2. **Spesifikasi perangkat radar** (daya pancar, gain, beamwidth, panjang gelombang, dan jarak).
3. **Karakteristik hujan** (ukuran dan jumlah tetes yang direpresentasikan oleh reflektivitas Z). Semakin besar Z dan semakin dekat target ke radar, semakin kuat sinyal yang diterima radar.

variable	description	unit	remarks / typical values
G	antenna gain	-	20,000 (~43dB)
Pr	received power	mW	1 ... 10 ⁻¹¹ (0 ... -110 dBm)
Pt	transmitted power (peak)	mW	250·10 ⁶ (250 kW)
Z	reflectivity factor	mm ⁶ /m ³	200 (for R = 1 mm/h)
h	radar pulse length	m	600 (long pulse 2 μs)
k ²	complex index of refraction	-	0.93 for water (0.2 for ice)
r	target range	m	100·10 ³ (100 km)
λ	radar wave length	m	0.053 (C-band)
θ	half power beam width (horizontal)	rad	0.017 (~1 degree)
Φ	half power beam width (vertical)	rad	0.017 (~1 degree)

TARGET TITIK KE TARGET VOLUM RADAR CUACA

Dari Target Titik ke Target Volume

1. Persamaan radar untuk **target titik (point target)** perlu disesuaikan dan dikembangkan agar sesuai dengan kebutuhan berbagai aplikasi radar, misalnya:
 - Deteksi target bergerak (Moving Target Indication/MTI)
 - Radar apertur sintetis (Synthetic Aperture Radar/SAR)
 - Radar meteorologi (Radar Cuaca)
2. Instrumen penginderaan jauh aktif (seperti radar) memiliki **resolusi spasial yang terbatas**. Oleh karena itu, radar tidak mengamati satu target tunggal (misalnya satu tetes hujan atau satu kristal es), melainkan selalu mengukur **suatu volume ruang** yang berisi sangat banyak target.
3. → Yang diamati radar adalah **target volume (distributed target)**, bukan **target titik (point target)**.
4. Untuk memperhitungkan hal tersebut, **Radar Cross Section (RCS)** atau luas penampang radar tidak lagi dihitung untuk satu objek saja, melainkan diganti dengan **jumlah seluruh penampang hambur (scattering cross section)** dari semua partikel yang berada dalam volume resolusi radar (range-bin).

$$\sigma = \sum \sigma_i \quad = \quad V \sum \sigma_i$$

(range-bin) (m³)

RADAR EQUATION

1. Bagian C (System Constant)

Bagian berwarna oranye

$$C = \frac{\pi^3}{1024 \ln(2)} \frac{P_t G^2 \theta \phi \tau}{\lambda^2}$$

Disebut:

System Constant atau **Radar Constant**.

Berisi parameter yang berasal dari radar itu sendiri:

P_t = daya pancar radar

G = gain antena

θ = beamwidth horizontal

ϕ = beamwidth vertikal

τ = panjang pulsa

λ = panjang gelombang

Maknanya

Jika parameter radar berubah, maka sensitivitas radar juga berubah.

Contoh:

- ❖ Daya pancar naik → Pr naik
- ❖ Gain antena naik → Pr naik
- ❖ Panjang pulsa naik → Pr naik

2. Bagian G(R) (Range Dependent)

Bagian biru:

$$G(R) = \frac{1}{R^2}$$

Maknanya

Semakin jauh target:

→ □ Energi pantulan yang diterima semakin kecil.



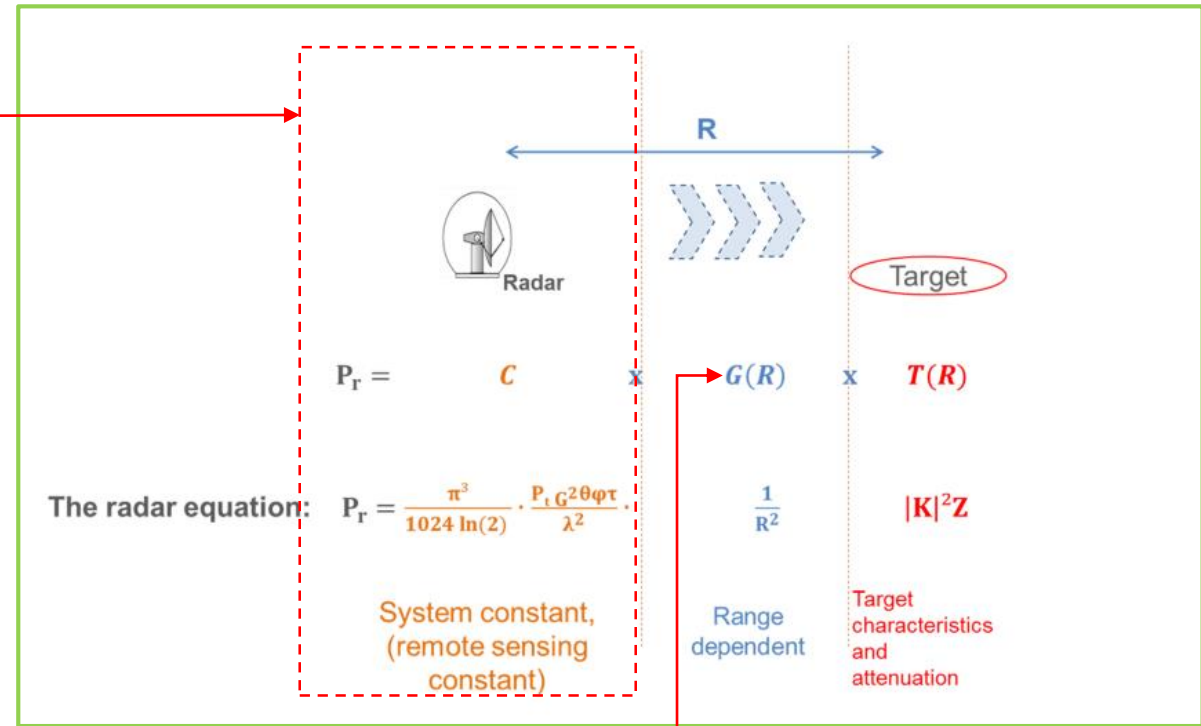
Misalnya:

Jarak	Faktor
50 km	1
100 km	1/4
150 km	1/9

Mengapa Terjadi?

Energi radar menyebar ketika bergerak menjauhi antena. Semakin jauh target:

- Energi yang mengenai target berkurang.
- Energi pantulan yang kembali ke radar juga berkurang.



RADAR EQUATION

3. Bagian T(R) (Target Characteristics)

Bagian merah yang Anda lingkari.

$$T(R) = |K|^2 Z$$

Ini mewakili sifat fisik target yang dipantulkan radar.

Faktor Dielektrik

$$|K|^2$$

Menunjukkan kemampuan partikel memantulkan gelombang radar.

Nilai tipikal:

Target	$ K ^2$
Air cair	0.93
Es	0.20

Artinya:

Air hujan memantulkan radar lebih kuat daripada es.

Faktor Reflektivitas Z

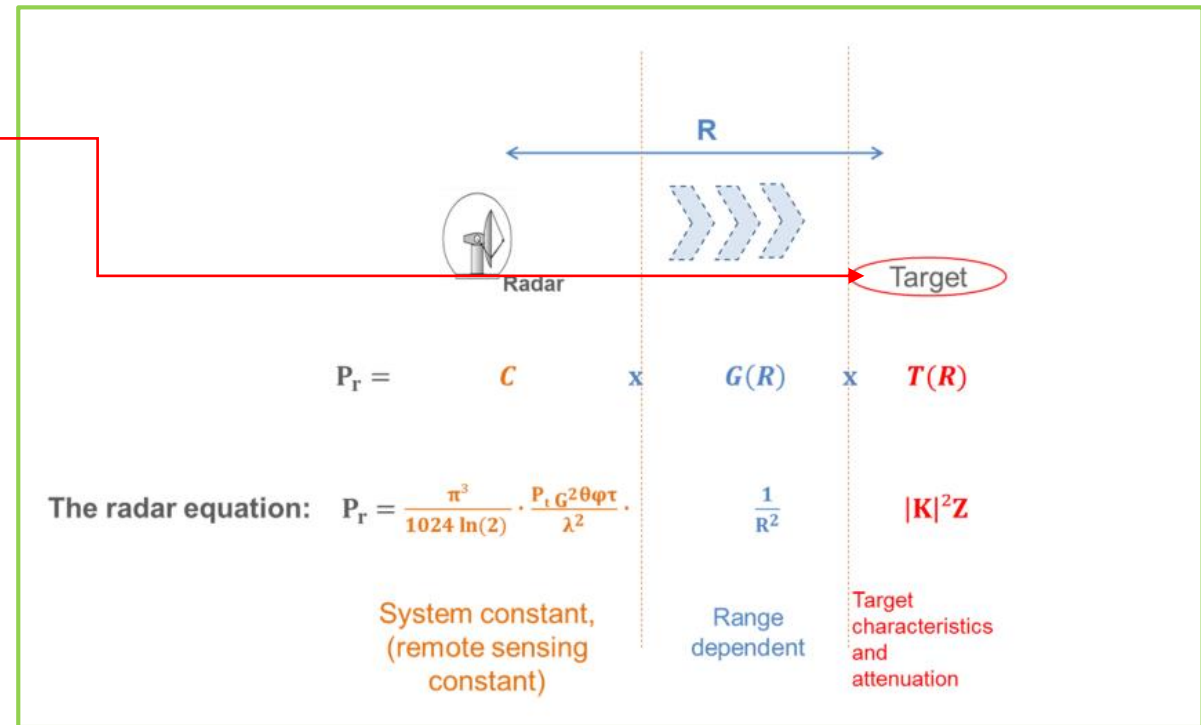
Menggambarkan:

- ❖ Ukuran tetes hujan
- ❖ Jumlah tetes hujan

Semakin besar:

- ❖ Tetes hujan
- ❖ Konsentrasi hujan

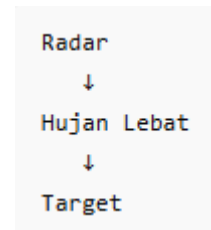
maka nilai Z semakin besar.



Mengapa Disebut "Target Characteristics and Attenuation"?

Karena bagian ini tidak hanya dipengaruhi oleh hujan yang dipantulkan, tetapi juga oleh pelemahan sinyal (**attenuation**) sepanjang jalur radar.

Misalnya:



Sebelum mencapai target:

- ❖ Sebagian energi sudah diserap hujan.
- ❖ Pantulan yang kembali juga mengalami pelemahan.

Akibatnya:

P_r menjadi lebih kecil dari seharusnya.

Fenomena ini sangat penting pada:

- Radar X-band
- Radar C-band

dan lebih kecil pengaruhnya pada:

- Radar S-band

RADAR EQUATION

Contoh Praktis pada Radar Cuaca

Misalkan ada dua awan dengan intensitas hujan yang sama:

Awan A

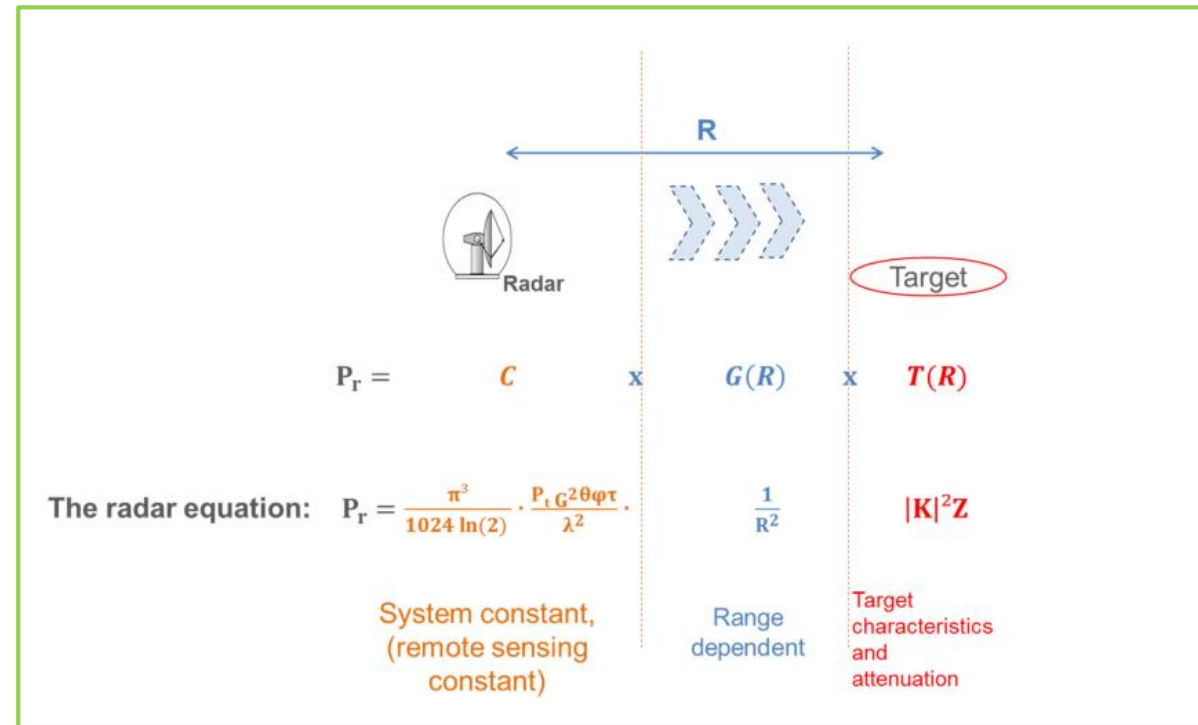
❖ Jarak 20 km

Awan B

❖ Jarak 200 km

Walaupun hujannya sama, pantulan yang diterima radar dari Awan B akan jauh lebih kecil karena faktor:

$$\frac{1}{R^2}$$



Oleh karena itu radar harus melakukan **range correction** agar kedua awan dapat ditampilkan dengan nilai dBZ yang benar.

Itulah salah satu alasan mengapa dalam pengolahan data radar cuaca terdapat proses **kalibrasi dan koreksi jarak**, sehingga reflektivitas yang tampil pada PPI atau CAPPI tidak bergantung pada jarak target dari radar.

RADAR EQUATION

Konstanta Fisik $|K|^2$

Nilai ini menggambarkan sifat fisik target, terutama kemampuan material target untuk menghantarkan arus listrik (**konduktivitas listrik**).

Untuk air cair:

$$|K|^2 \approx 0.91 - 0.93$$

Untuk es:

$$|K|^2 = 0.18$$

Konstanta Dielektrik (ϵ)

$$|K|^2 = \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} \right|^2$$

Nilai ini menunjukkan seberapa kuat suatu material memantulkan energi radar.

Karena nilai $|K|^2$ air jauh lebih besar daripada es, maka:

- ❖ Hujan (air cair) memantulkan radar lebih kuat.
- ❖ Es atau salju memantulkan radar lebih lemah.

Faktor Reflektivitas Z

Terdapat dua karakteristik penting dari target presipitasi (hujan cair) yang menentukan seberapa efisien target tersebut mengembalikan energi (P_r) ke radar:

- ❖ → **Jumlah tetes hujan**
- ❖ → **Ukuran (diameter D) tetes hujan**

Karena:

$$P_r \sim Z \sim D^6$$

maka ukuran tetes hujan sangat berpengaruh terhadap pantulan radar.

RADAR EQUATION

Faktor yang Dapat Mempengaruhi Nilai Z

Pada bagian bawah slide disebutkan bahwa nilai reflektivitas (Z) dapat dipengaruhi oleh:

1. Attenuation (Pelemahan Sinyal)

Sinyal radar melemah saat melewati hujan lebat. Akibatnya:

- ❖ dBZ yang terukur bisa lebih kecil dari kondisi sebenarnya.

2. Beam Blockage

Beam radar terhalang oleh:

- ❖ Gunung
- ❖ Bukit
- ❖ Gedung tinggi

Akibatnya sebagian energi tidak mencapai target.

3. Miscalibration

Kalibrasi radar tidak tepat.

Akibatnya seluruh nilai dBZ bisa:

- ❖ Terlalu tinggi
- ❖ Terlalu rendah

4. Noise Bias

Gangguan elektronik pada receiver radar.

Akibatnya muncul pantulan lemah yang sebenarnya bukan berasal dari target meteorologis.

Kesimpulan

Slide ini menjelaskan dua hal penting:

1. Air cair memantulkan radar jauh lebih kuat daripada es karena memiliki nilai $|K|^2$ yang lebih besar.

2. Ukuran tetes hujan sangat dominan dalam menentukan reflektivitas radar, karena reflektivitas berbanding dengan pangkat enam diameter tetes (D^6). Oleh karena itu, satu tetes besar dapat menghasilkan pantulan ribuan kali lebih kuat daripada satu tetes kecil, meskipun volume airnya tidak berbeda sebesar itu. Ini merupakan dasar mengapa radar mengukur **reflektivitas (dBZ)**, bukan langsung curah hujan.

RADAR EQUATION

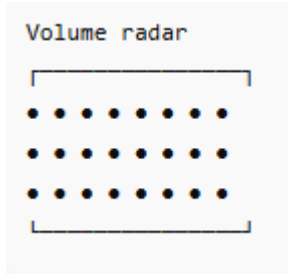
Asumsi dasar yang digunakan dalam Persamaan Radar Cuaca (Radar Equation).

- ❑ Persamaan radar yang kita gunakan untuk menghitung reflektivitas (Z) sebenarnya dibuat dengan beberapa penyederhanaan.
- ❑ Di dunia nyata, asumsi-asumsi ini tidak selalu terpenuhi 100%, sehingga bisa muncul error atau bias pada pengukuran radar.

1. Target terdiri dari sangat banyak tetes air kecil

Radar mengasumsikan bahwa volume yang diamati berisi sangat banyak partikel hujan.

Contoh:



Bukan hanya satu atau dua tetes. Karena radar cuaca mengukur **target volume**, bukan target tunggal.

2. Ukuran partikel jauh lebih kecil daripada panjang gelombang radar

Radar menggunakan **Teori Hamburan Rayleigh (Rayleigh Scattering)**.

Syaratnya:

$$D \ll \lambda$$

dengan:

- D = diameter partikel
- λ = panjang gelombang radar

Contoh Radar S-Band:

$$\lambda \approx 10 \text{ cm}$$

Tetes hujan:

$$D \approx 1 - 5 \text{ mm}$$

Karena tetes hujan jauh lebih kecil daripada 10 cm, asumsi Rayleigh masih berlaku.

Jika Tidak Terpenuhi?

Misalnya hujan es (hail):

Diameter hail:

$$D = 3 - 5 \text{ cm}$$

Sudah mendekati panjang gelombang radar.

Maka:

- ❖ Hamburan Rayleigh tidak lagi akurat.
- ❖ Terjadi hamburan Mie (Mie Scattering).
- ❖ Nilai dBZ bisa menjadi sangat tinggi.

RADAR EQUATION

3. Tetes hujan tersebar merata dalam volume radar

Radar mengasumsikan bahwa distribusi hujan di dalam satu volume radar homogen. Misalnya:



Bukan:



Kenyataannya

Dalam awan konvektif:

- ❖ Ada daerah hujan sangat lebat.
- ❖ Ada daerah hampir tidak ada hujan.

Distribusi tidak merata.

Akibatnya:

Reflektivitas yang dihitung radar merupakan **rata-rata volume**.

4. Semua partikel memiliki faktor dielektrik yang sama

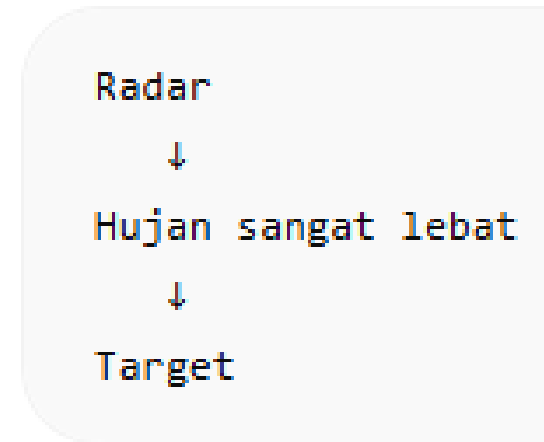
Radar menganggap semua partikel dalam volume tersebut adalah: Air cair semuanya atau Es semuanya

5. Tidak ada pelemahan sinyal (attenuation)

Radar mengasumsikan sinyal tidak melemah saat berjalan menuju target.

Kenyataannya

Saat hujan lebat:



Sebagian energi sudah diserap hujan sebelum mencapai target.

Akibatnya:

- ❖ Target terlihat lebih lemah.
- ❖ dBZ menjadi terlalu rendah.

Fenomena ini sangat penting pada:

- ❖ Radar X-Band
- ❖ Radar C-Band

Lebih kecil pada:

- ❖ Radar S-Band

Kenyataannya

Di sekitar level 0°C sering terdapat:

Air cair, Es, Salju basah, Graupel dalam satu volume radar yang sama. Akibatnya asumsi ini tidak selalu benar.

RADAR EQUATION

6. Multiple Scattering Diabaikan

Radar menganggap gelombang hanya:

Radar → Tetes → Radar

Dalam satu kali pantulan.

Kenyataannya

Pada hujan sangat lebat:



Energi bisa dipantulkan berkali-kali antar partikel. Disebut:

Multiple Scattering

Akibatnya:

- ❖ Pengukuran menjadi lebih rumit.
- ❖ Persamaan radar sederhana tidak lagi sepenuhnya akurat.

Ringkasan

Asumsi	Maksud
Banyak tetes kecil	Radar mengukur volume berisi banyak partikel
$D \ll \lambda$	Berlaku teori Rayleigh
Distribusi merata	Hujan dianggap homogen dalam satu volume
Faktor dielektrik sama	Semua partikel dianggap jenis yang sama
Tidak ada attenuation	Sinyal dianggap tidak melemah
Multiple scattering diabaikan	Hanya satu kali pantulan dianggap terjadi

Kesimpulan

Persamaan Radar Meteorologi adalah model yang disederhanakan. Agar persamaan dapat digunakan, maka :

- ❖ Radar mengasumsikan partikel hujan berukuran kecil, tersebar merata, memiliki sifat fisik yang sama, tidak terjadi pelemahan sinyal, dan tidak ada pantulan ganda antar partikel.
- ❖ Dalam kondisi cuaca ekstrem (hujan sangat lebat, hail, bright band, atau attenuation kuat), beberapa asumsi ini tidak terpenuhi sehingga hasil radar dapat mengandung kesalahan