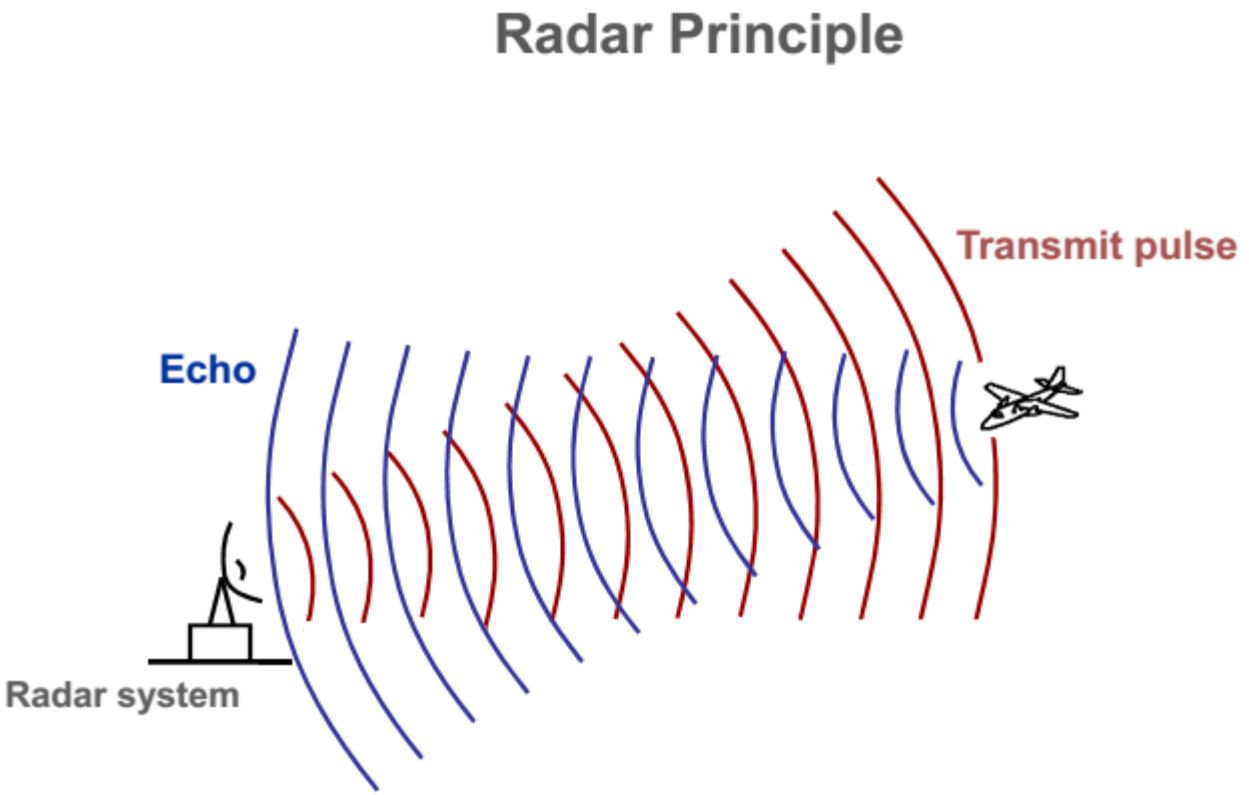
مباحث ویژه
(پردازش سیگنال های راداری)

معرفی رادار

نیم سال دوم ۰۵-۰۴

معرفی رادار

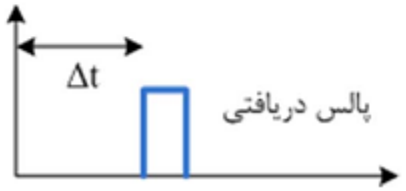
- RADAR: RAdio Detection And Ranging



اندازه گیری برد

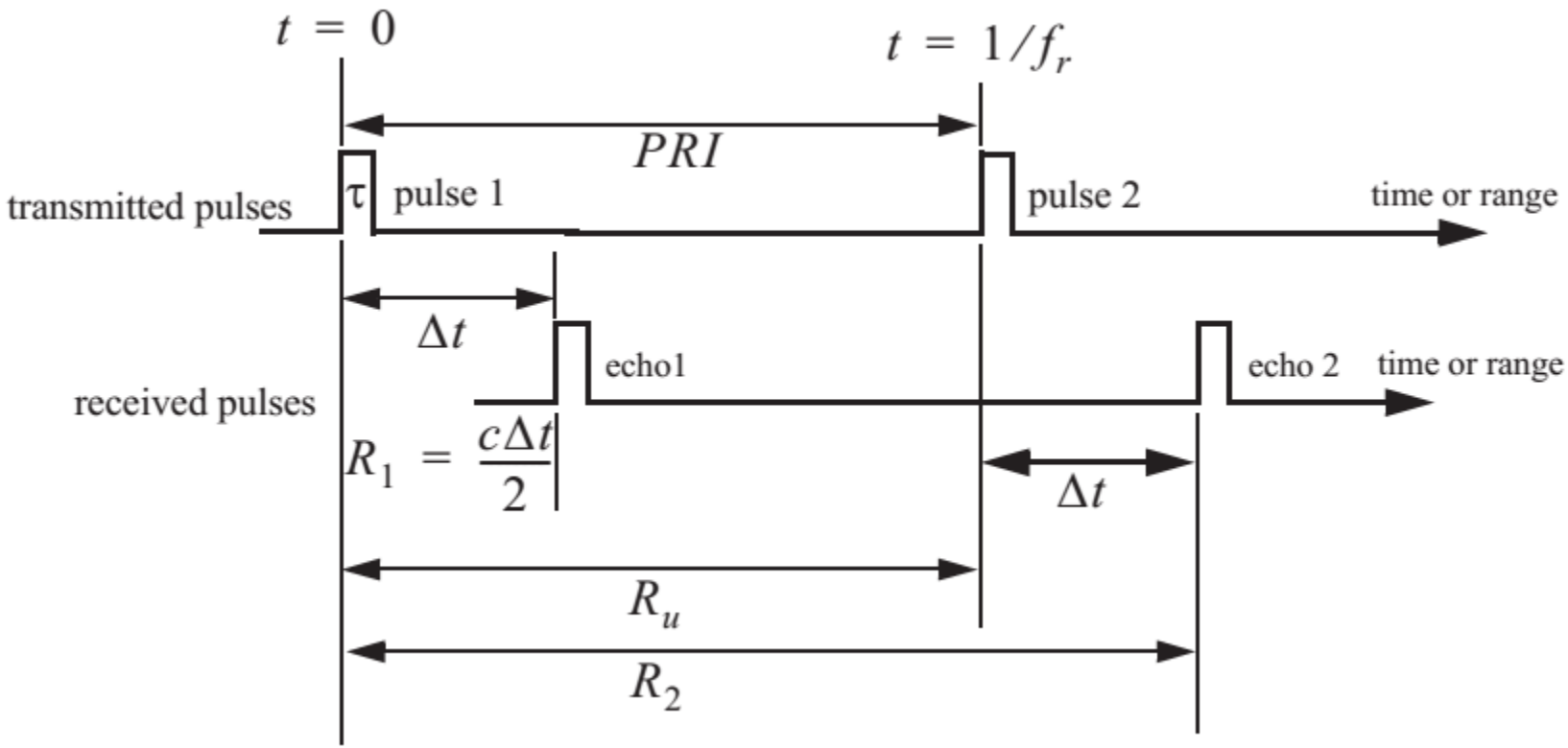
- اگر راداری بخواهد تعیین فاصله کند، یک **پالس رادیویی** ارسال می کند.
- برد هدف ($\mathbb{R}$) با اندازه گیری مدت زمانی که طول می کشد تا پالس **مسیر دو طرفه** بین رادار و هدف را طی کند (Δt) بدست می آید.
- با توجه به اینکه امواج رادیویی با سرعت نور ($c=3\times10^8$ m/s) حرکت می کنند، داریم:

$$2R = \Delta t.\,c \longrightarrow \boxed{R = \frac{c\Delta t}{2}}$$



برد بدون ابهام

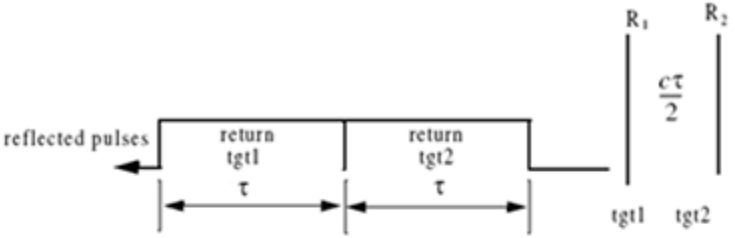
- تعریف: بیشینه برد قابل اندازه گیری یک هدف بدون ابهام



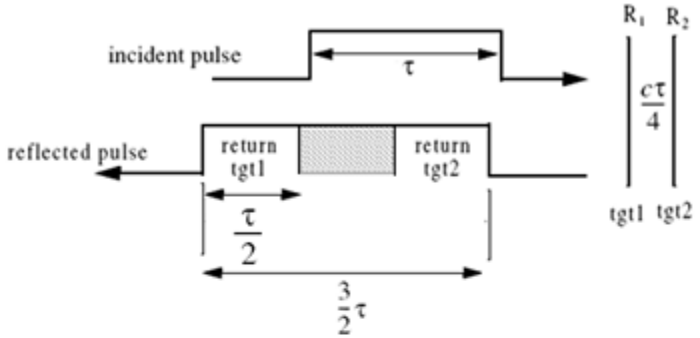
$$R_u = (cT)/2 = c/(2f_r)\,.$$

حد تفکیک در برد

- تعریف: کمترین فاصله دو شیء مجزا به طوری که به وسیله اندازه گیری برد قابل تفکیک باشند.



حالت دوم: اختلاف برد دو هدف $\frac{c\tau}{2}$ متناظر با اختلاف زمانی τ



حالت اول: اختلاف برد دو هدف $\frac{c\tau}{4}$ متناظر با اختلاف زمانی $\tau/2$

- بنابراین قدرت تفکیک رادار برابر است با

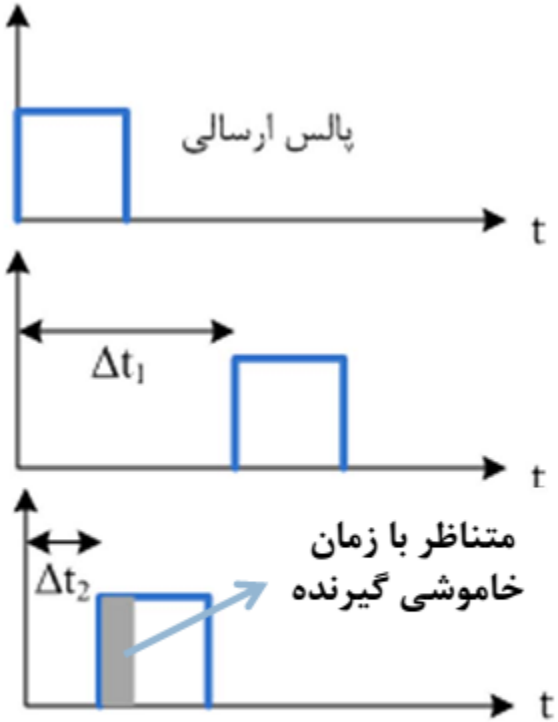
$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B}$$

پهنای باند

- برای افزایش قدرت تفکیک رادار ← کاهش عرض پالس ← کاهش توان متوسط ارسالی و افزایش پهنای باند
  - امکان دستیابی به قدرت تفکیک بالا و در عین حال حفظ شدن توان متوسط ارسالی با استفاده از **تکنیک های فشرده سازی پالس**

کمینه برد

- کمترین برد قابل اندازه گیری هدف



$\Delta t_1 > \tau$

پالس دریافتی از هدفی در فاصله

$$R_1 = \frac{c\Delta t_1}{2}$$

$\Delta t_1 < \tau$

پالس دریافتی از هدفی در فاصله

$$R_1 = \frac{c\Delta t_2}{2}$$

- عدم دریافت کامل پالس های بازگشتی از اهدافی در فواصل کمتر از $R = \frac{c\tau}{2}$ به علت خاموشی گیرنده.

جمع بندی روابط برد

- عامل مهم در تعیین PRI
  - حداکثر برد مورد نیاز برای اندازه گیری یا حداکثر برد بدون ابهام

$$R_u = c\frac{T}{2} = \frac{c}{2f_r}$$

- عوامل مهم در تعیین پهنای پالس
  - قدرت تفکیک برد مورد نیاز

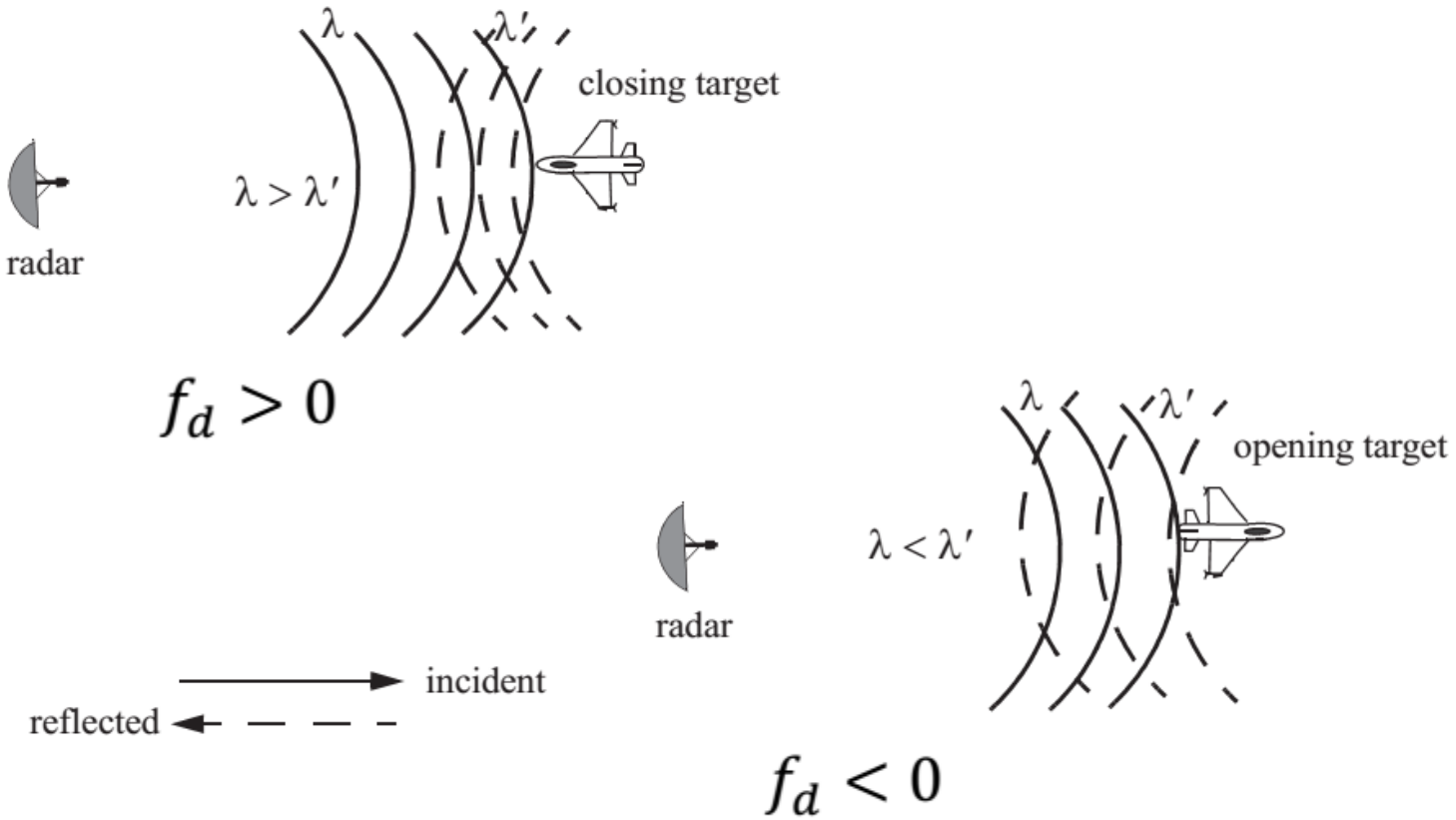
$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B}$$

  - حداقل برد مورد نیاز برای اندازه گیری

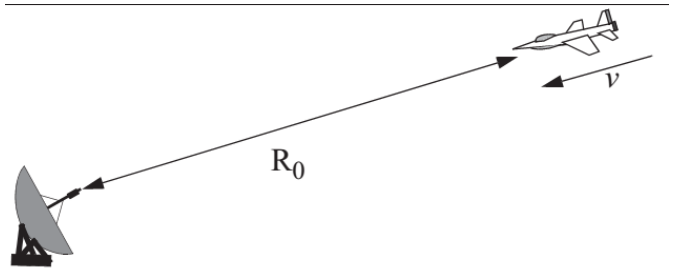
$$\boldsymbol{R_{min} = \frac{c\tau}{2}}$$

اثر داپلر

- تغییر فرکانس سیگنال برگشتی به دلیل سرعت نسبی بین هدف و رادار
- فرکانس داپلر: اختلاف فرکانس ارسال و دریافت

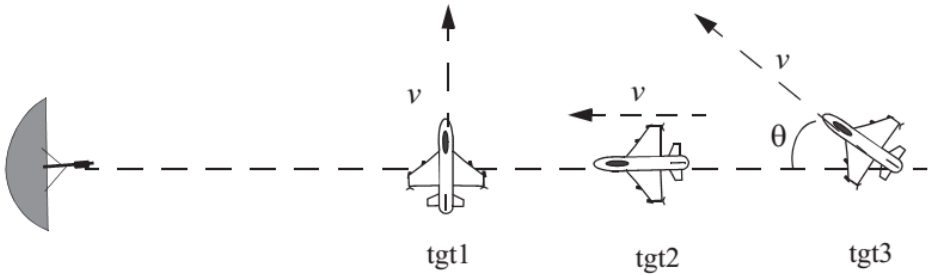


اندازه گیری سرعت نسبی



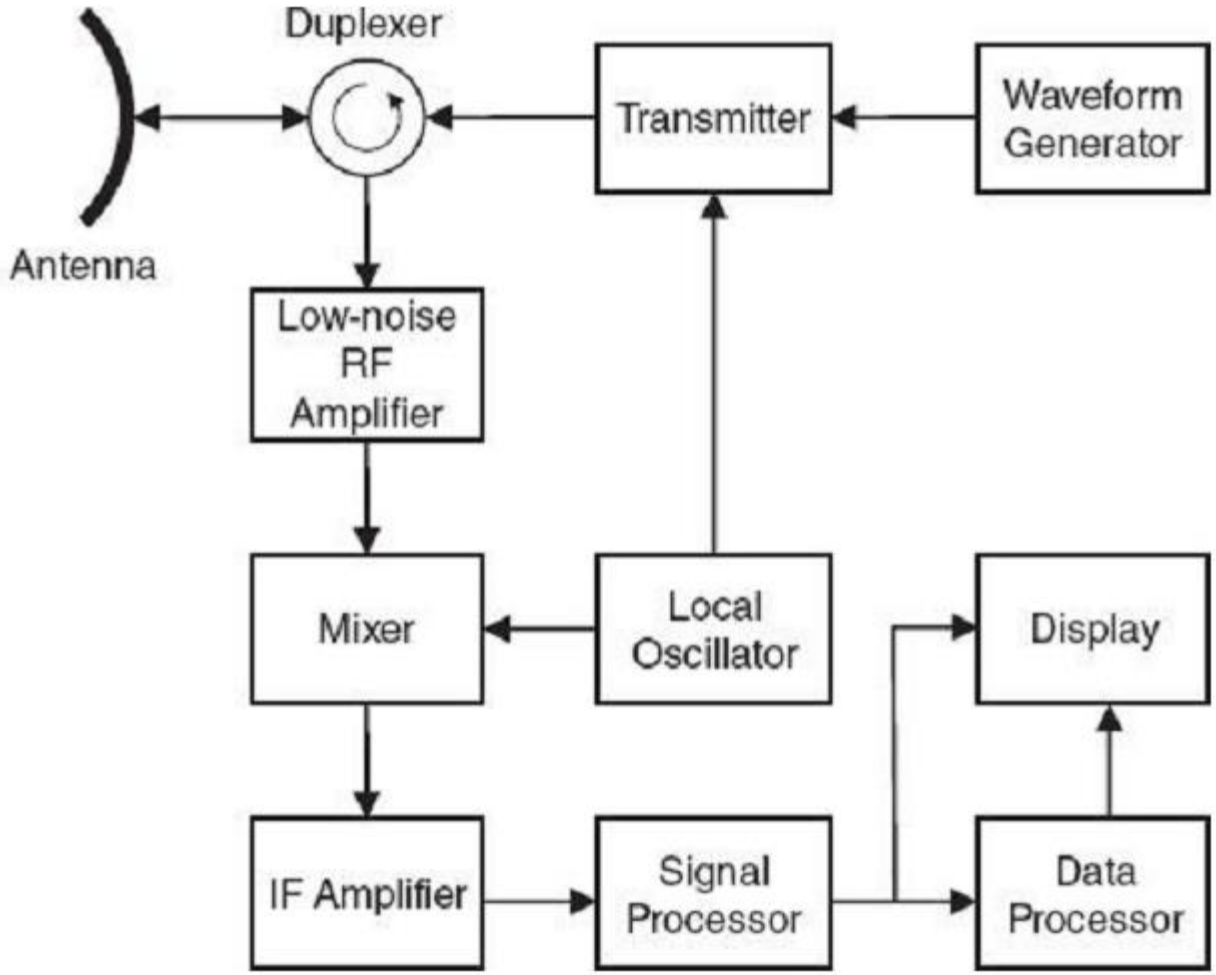
$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 = \frac{2v}{\lambda}$$

- نکته مهم: **v** در فرمول بالا، سرعت نسبی بین هدف و رادار است.
- برای حالت زاویه دار گاه اینطور بیان می شود:



$$f_d = \frac{2v}{\lambda}\cos\theta$$

سامانه رادار پالسی تک پایه



معادله رادار

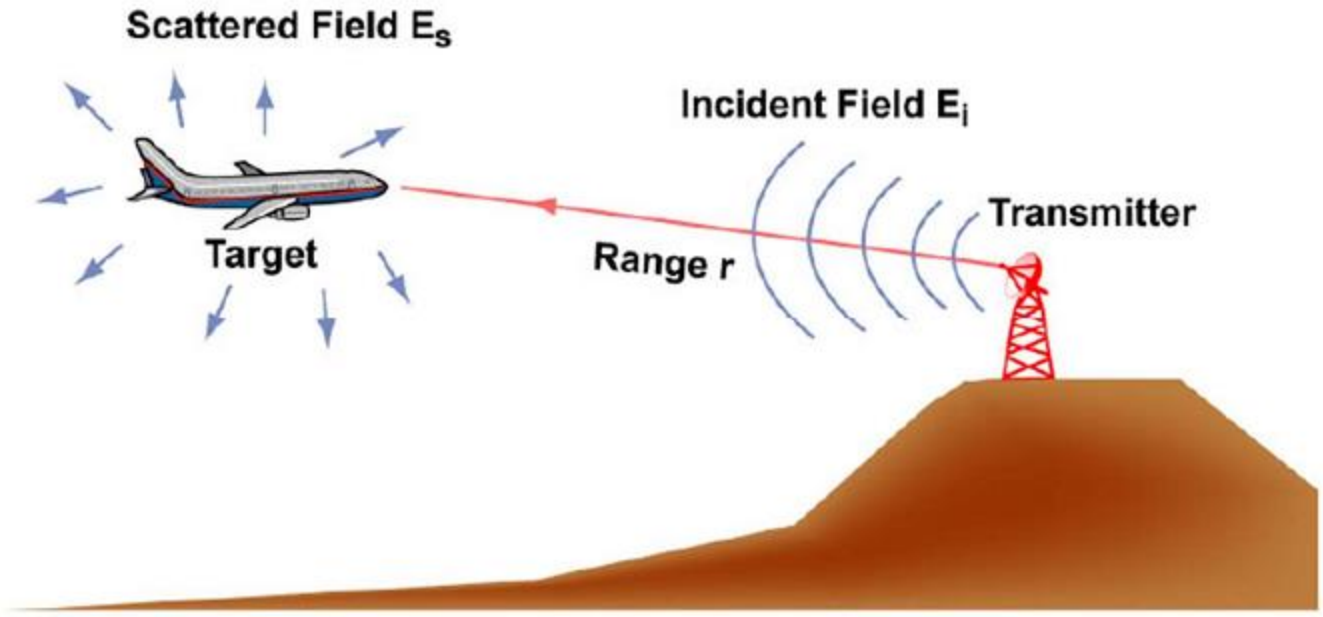
- بیان کننده نسبت سیگنال به نویز در خروجی گیرنده:

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B F_n L}$$

- یک رادار در باند C دارای پارامترهای زیر است:
  - توان پیک ارسالی: $P_t = 1.5\ \text{MW}$
  - فرکانس کار: $f_0 = 5.6\ \text{GHz}$
  - بهره آنتن: $G = 45\ \text{dB}$
  - عدد نویز گیرنده: $3\ \text{dB}$
  - پهنای پالس: $\tau = 0.2\ \mu\text{s}$
  - حداقل SNR قابل قبول: $20\ \text{dB}$
  - سطح مقطع راداری: $\sigma = 0.1\ \text{m}^2$
  - دمای نویز آنتن: $290^{\circ K}$
- حداکثر برد رادار را محاسبه کنید.

سطح مقطع راداری

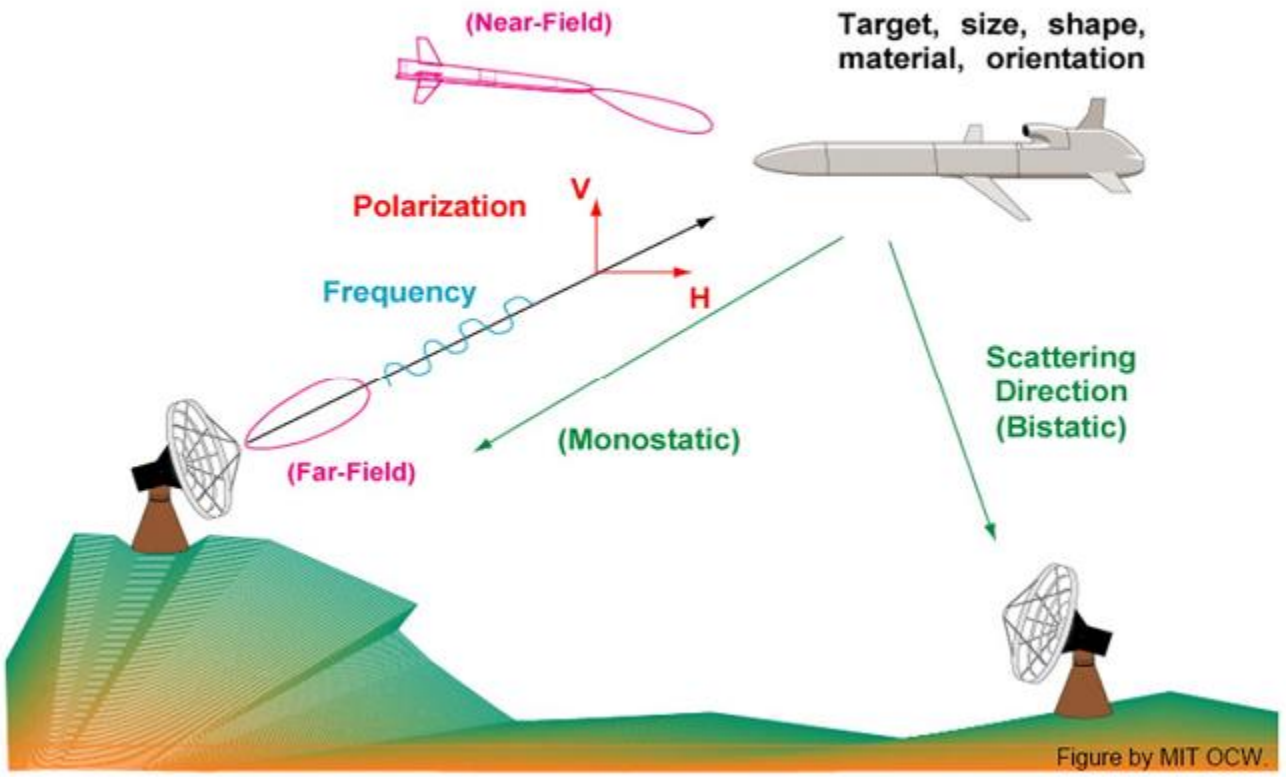
- **سطح مقطع راداری**، یک ویژگیِ هدف پراکنده‌ساز است که در معادله رادار برای نشان دادن اندازه سیگنال بازگشتی از هدف به رادار در نظر گرفته می شود.



$$\sigma = \frac{\text{Power reflected back from target to the radar}}{\text{Power density incident on the target}}$$

سطح مقطع راداری

- عوامل مؤثر بر سطح مقطع راداری



مسطح مقطع راداری کره

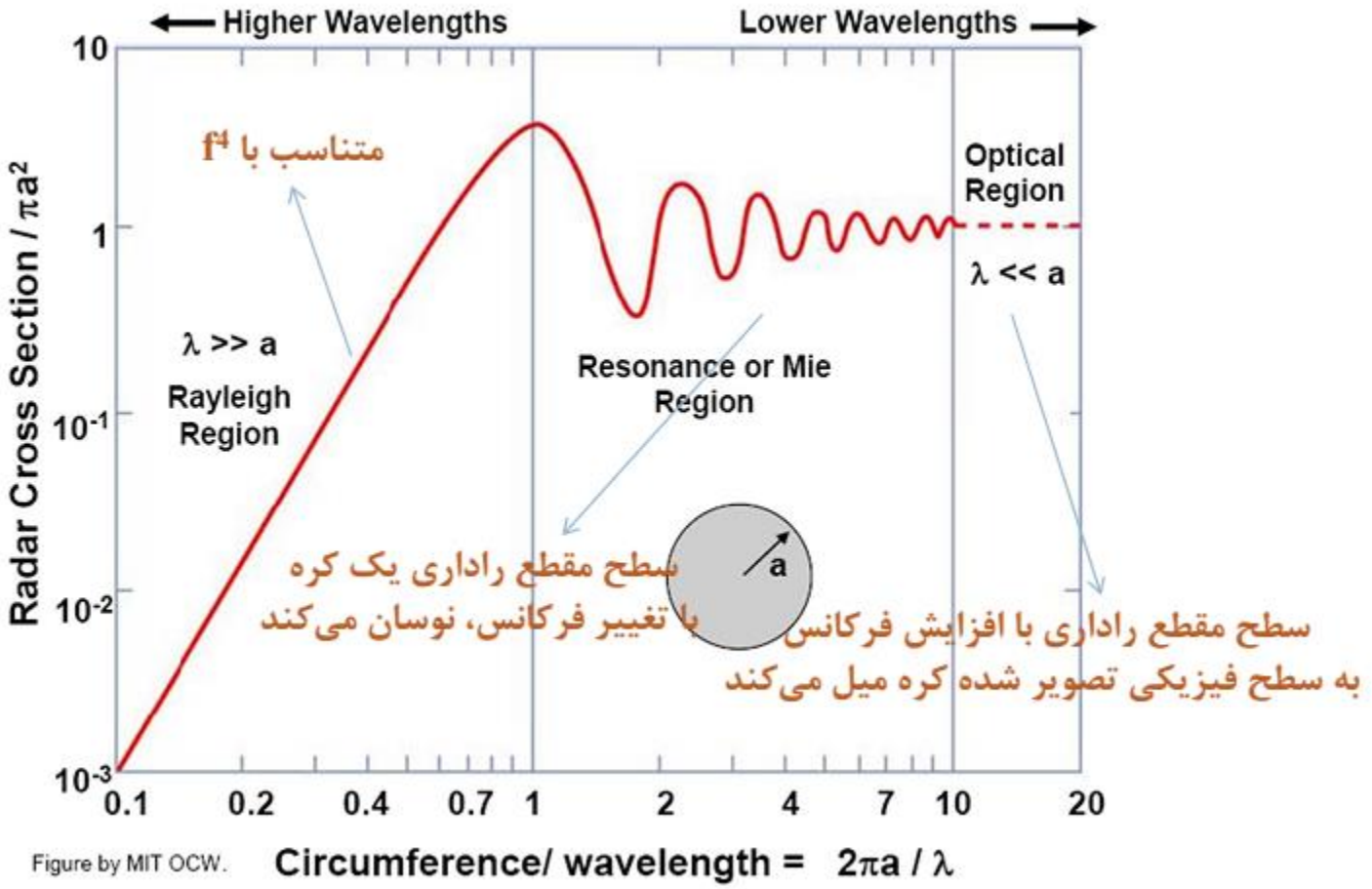
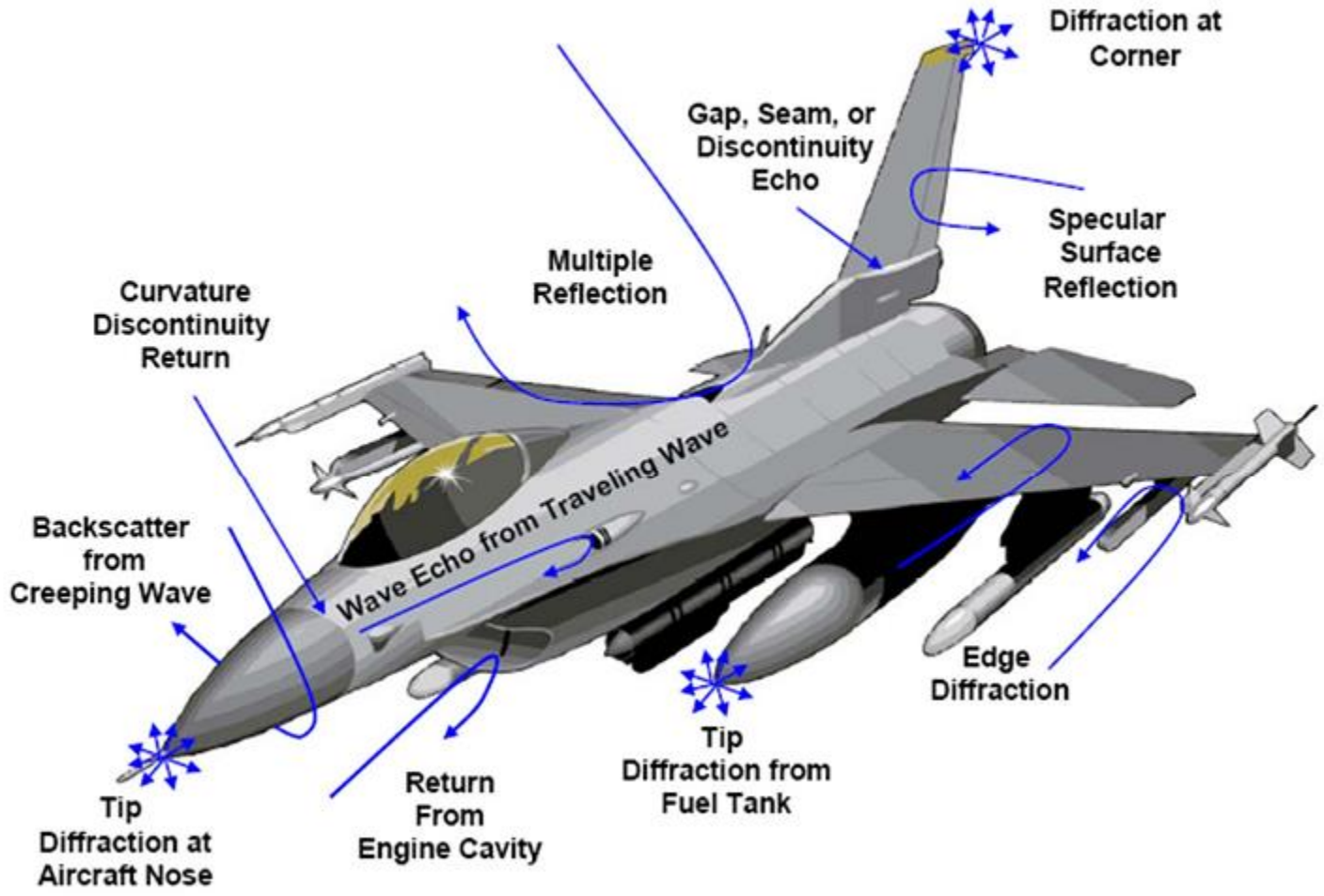


Figure by MIT OCW.

سطح مقطع راداری منعکس کننده گوشه ای

- در حالت برخورد عمودی، سطح مقطع راداری یک صفحه مسطح با مساحت A در ناحیه نوری برابر با $\frac{4\pi A^2}{\lambda^2}$ است.
  - سطح مقطع راداری با تغییر زاویه دید از حالت عمود به سرعت کاهش می‌یابد.
- رابطه سطح مقطع راداری یک **منعکس‌کننده دو سطحی** یا **سه سطحی** با مساحت تصویر شده A نیز مشابه یک صفحه مسطح است با این تفاوت که در یک زاویه دید وسیعتری برقرار است.

سطح مقطع راداری اجسام پیچیده

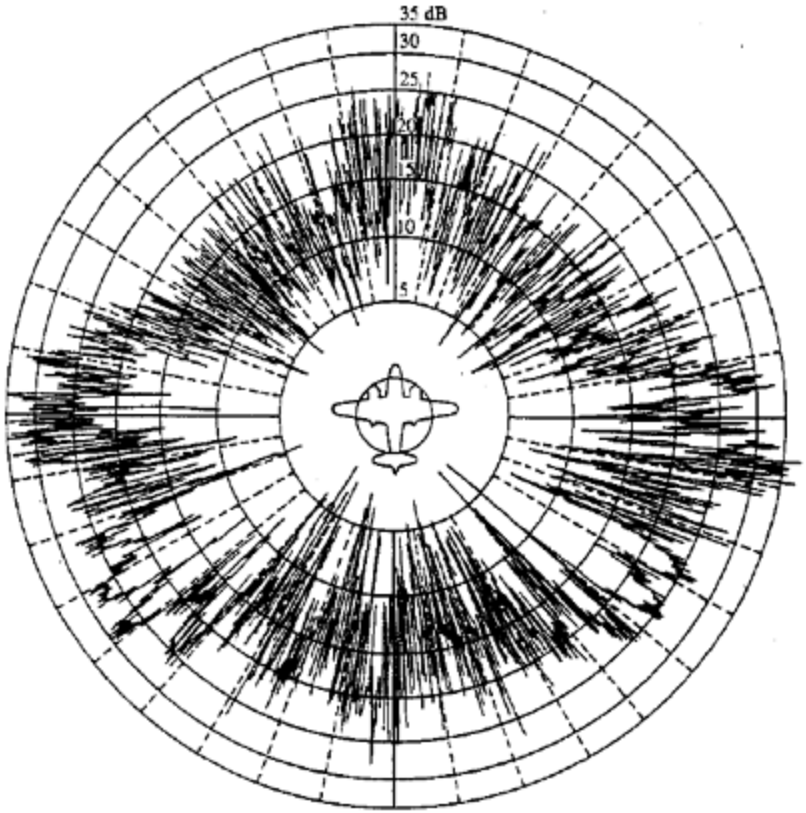


سطح مقطع راداری اجسام پیچیده

- سطح مقطع راداری اجسام پیچیده نظیر هواپیما، موشک، کشتی، وسایل نقلیه زمینی، ساختمان و.. به طور قابل ملاحظه‌ای با زاویه دید و فرکانس تغییر می‌کند.
- این تغییرات ناشی از پراکنده‌سازهای منفردی است که جسم پیچیده را تشکیل می‌دهند.
- هر پراکنده‌ساز یک سیگنال بازگشتی با دامنه و فاز مشخص ایجاد می‌کند. این سیگنال‌های بازگشتی در رادار ترکیب شده و سیگنال نهایی را شکل می‌دهند.

سطح مقطع راداری اجسام پیچیده

- سطح مقطع راداری یک هواپیمای بمب‌افکن متوسط دو موتوره
  - تا 15 dB تغییرات در سطح مقطع راداری با تغییر زاویه دید به اندازه 1/3 درجه



سطح مقطع راداری اجسام پیچیده

	Square meters
Conventional winged missile	0.1
Small, single engine aircraft, or jet fighter	1
Four passenger jet	2
Large fighter	6
Medium jet airliner	40
Jumbo jet	100
Helicopter	3
Small open boat	0.02
Small pleasure boat (20-30 ft)	2
Cabin cruiser (40-50 ft)	10
Ship (5,000 tons displacement, L Band)	10,000
Automobile / Small truck	100 - 200
Bicycle	2
Man	1
Birds (large -> medium)	10^{-2} - 10^{-3}
Insects (locust -> fly)	10^{-4} - 10^{-5}

تغییرات سطح مقطع راداری

- یک روش سرراست برای در نظر گرفتن تغییرات سطح مقطع راداری در معادله رادار، انتخاب یک مقدار کوچک برای سطح مقطع راداری است که تقریباً در تمام زمان ها مقدار واقعی از آن بیشتر است.
  - این روش دقیق نیست ولی در عوض بسیار ساده است.
- روش دیگری که معمولاً بیشتر استفاده می‌شود، بر اساس در نظر گرفتن تابع چگالی احتمالِ تغییرات سطح مقطع راداری و همچنین لحاظ کردن همبستگی سطح مقطع راداری از یک پالس به پالس دیگر است.
- به این منظور می‌توان از چهار مدل آماری ارائه شده توسط پیتر سورلینگ استفاده کرد.

اهداف گسترده

- در رادار روزنه مصنوعی، هدف تصویربرداری از سطح زمین است، بنابراین کلاتر زمین خود هدف محسوب می شود.
- به چنین اهدافی که گستردگی آنها در حد چندین سلول حد تفکیک است و نمی توان آنها را به صورت هدف نقطه ای مدل کرد، هدف گسترده گفته می شود.
- چون نمی توان اثر همه پراکنده سازهای منفرد موجود در هدف گسترده را لحاظ کرد، بنابراین در چنین مواردی از رفتار آماری استفاده می شود.
- در هدف گسترده به صورت کلاتر سطحی، از پارامتری به نام ضریب پراکندگی استفاده می شود.

کلاتر سطحی

- دامنه بازگشتی از یک کلاتر سطحی متناسب با مساحت ناحیه روشن شده است.
- برای توصیف کلاتر سطحی، مستقل از مساحت ناحیه روشن شده، معمولاً از پارامتر **ضریب پراکندگی** استفاده می‌شود:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma_c}{A_c}$$

σ_c: سطح مقطع راداری کلاتر در ناحیه ای به مساحت A_c

σ^0: یک پارامتر بدون بعد که معمولاً برحسب dB بیان می‌شود

- برای توصیف کلاتر حجمی از **ضریب بازتاب پذیری** استفاده می شود:

$$\eta = \frac{\sigma_c}{V_c}$$

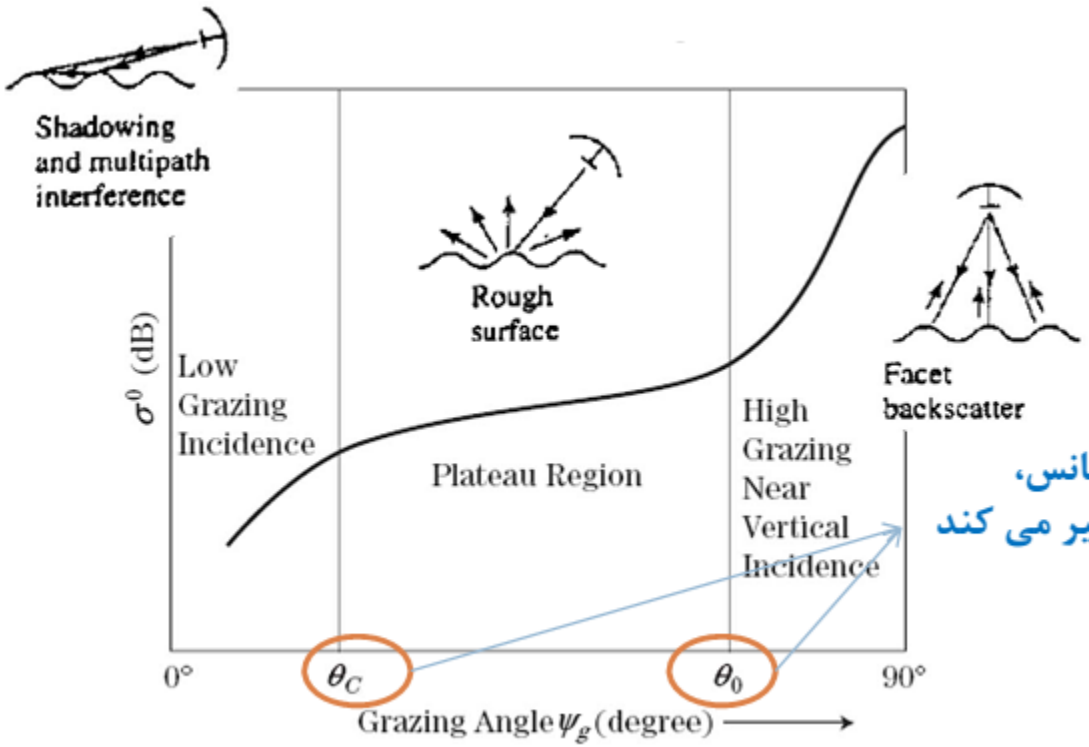
σ_c: سطح مقطع راداری کلاتر در ناحیه ای به حجم V_c

η: معمولاً برحسب dB/m بیان می‌شود

ضریب پراکندگی

- به طور کلی چند پارامتر بر ضریب پراکندگی سطح تاثیرگذارند:
  - زاویه نشیب (grazing)
    - با افزایش زاویه نشیب، ضریب پراکندگی بیشتر می شود.
  - طول موج
    - به طور کلی با افزایش فرکانس، ضریب پراکندگی بیشتر می شود.
  - جنس و صافی سطح
    - برای زوایای نشیب کوچک، سطوح ناهموار ضریب پراکندگی بزرگتری نسبت به سطوح صاف دارند.
    - برای زوایای نشیب بزرگ، سطوح ناهموار ضریب پراکندگی کوچکتری نسبت به سطوح صاف دارند.
  - قطبش
    - ضریب بازتاب اشیای مختلف با توجه به شکل و جنس و ... به قطبش موج بستگی دارد.

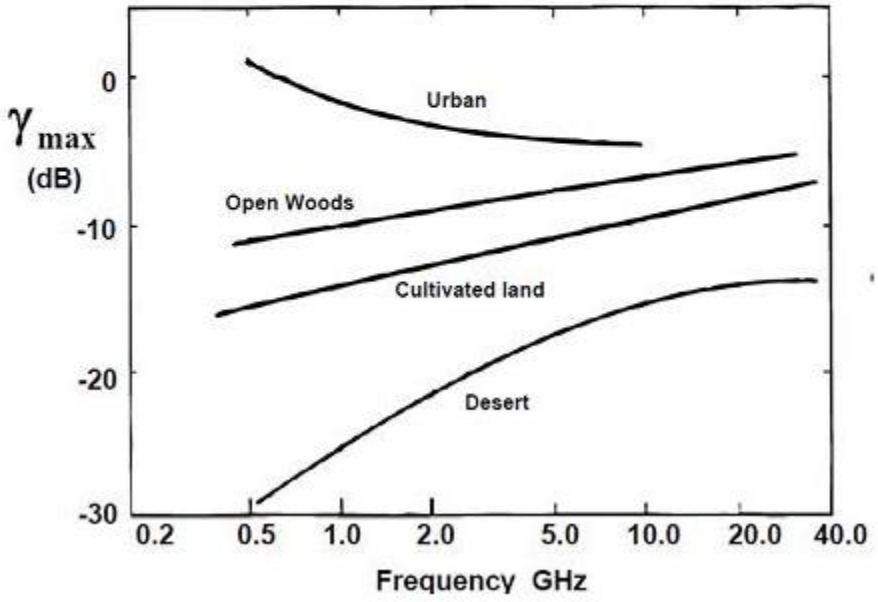
وابستگی ضریب پراکندگی به زاویه نشیب



مرز بین نواحی با فرکانس،
شرایط سطح و قطبش تغییر می کند

وابستگی ضریب پراکندگی به جنس سطح و فرکانس

- بسیاری از داده های اندازه گیری نشان می دهند که ضریب پراکندگی کلاتر زمین، به ازای **زویای گریزینگ متوسط**، تقریباً متناسب با $\sin\psi$ است.
  - بنابراین گاهی اوقات کلاتر زمین توسط پارامتر γ مشخص می شود.



$$\gamma = \frac{\sigma_0}{\sin\psi}$$

نمونه ای از تأثیر فرکانس

- The primary scatterers in a tree canopy are elements (leaves, branches, and stems) with a size on the order of the wavelength or larger and an orientation similar to that of the incoming signal polarization.
- Elements smaller than the wavelength produce little backscatter but can attenuate the signal

قطبش (polarization)

- قطبش یک موج مسطح یکنواخت رفتار بردار شدت میدان الکتریکی را در یک نقطه از فضا در زمان‌های مختلف توصیف می‌کند.
- یک موج مسطح یکنواخت را که در جهت $+z$ حرکت می‌کند به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\boldsymbol{E}(z) = \boldsymbol{E_0} e^{-jkz}$$

$$\boldsymbol{E_0} = E_{0x}\boldsymbol{a_x} + E_{0y}\boldsymbol{a_y}$$

- بسته به رابطه بین مولفه‌های X و Y شدت میدان الکتریکی قطبش‌های مختلف خواهیم داشت.

قطبش خطی

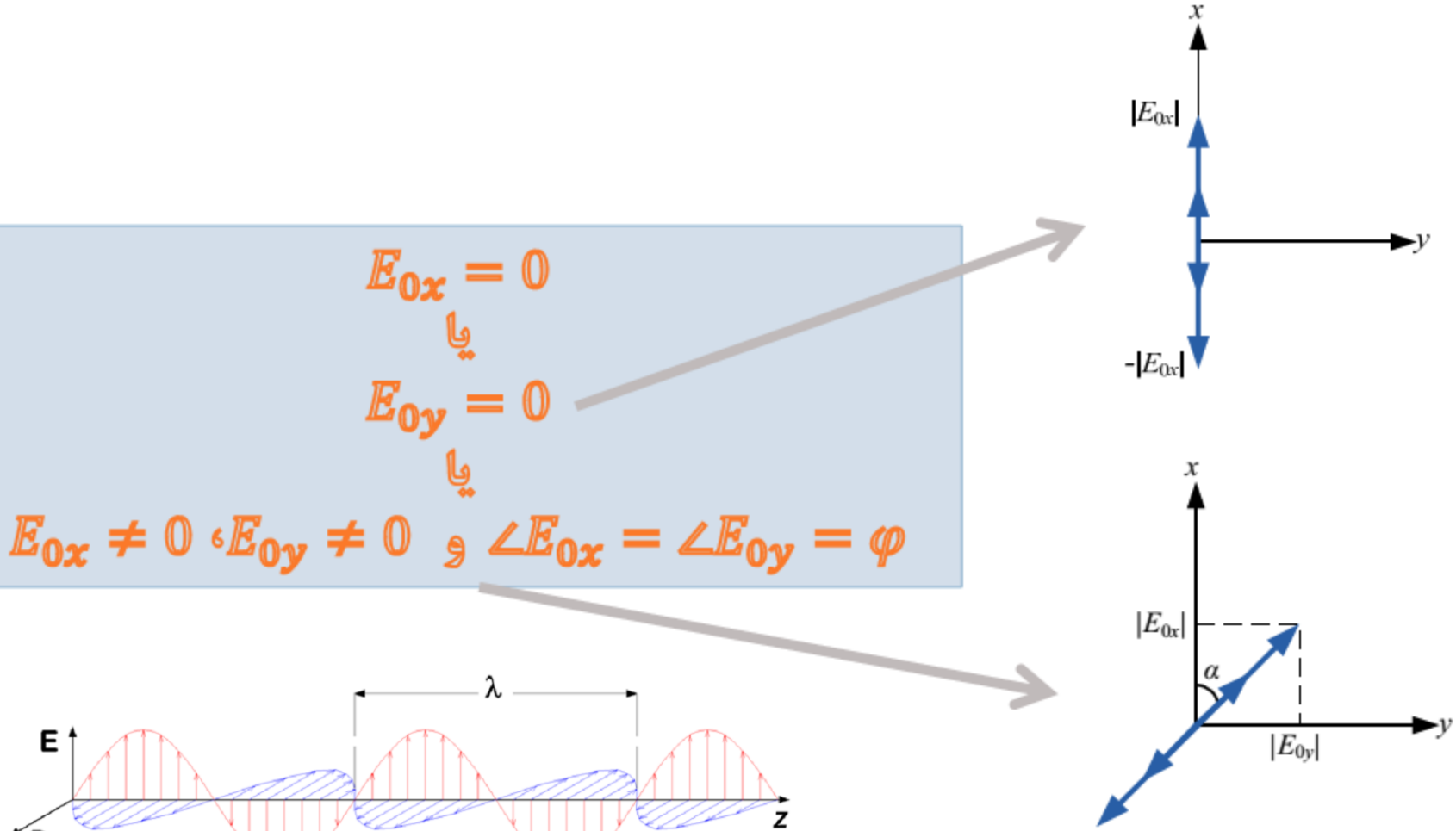
$$E_{0x} = 0$$

یا

$$E_{0y} = 0$$

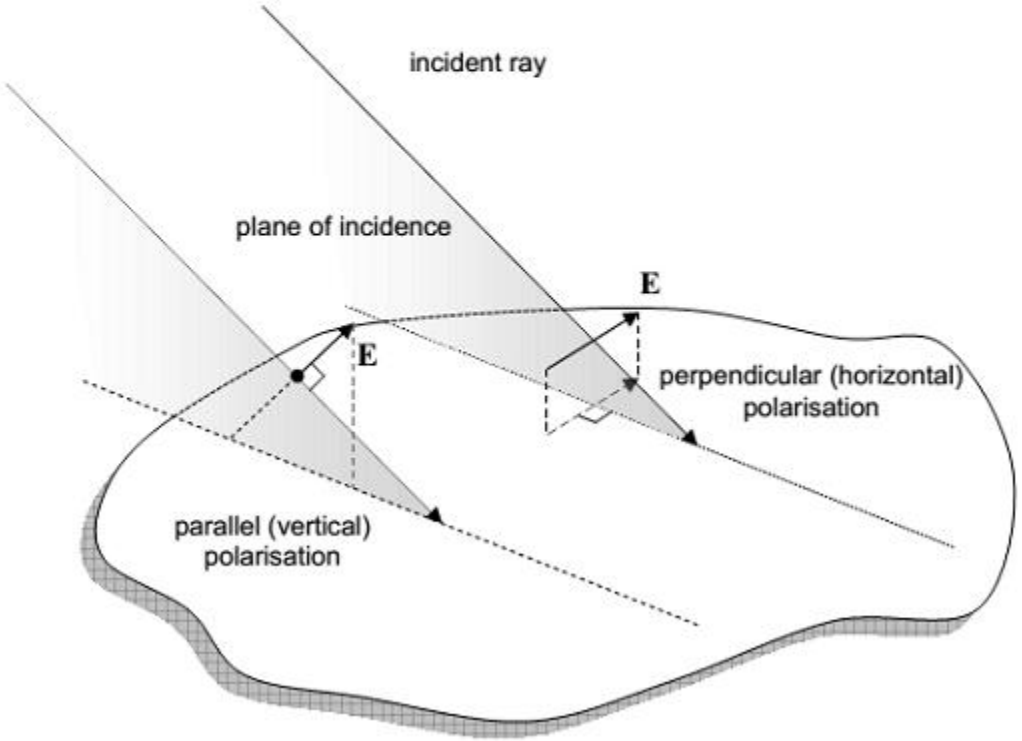
یا

$$E_{0x} \neq 0 \text{ ،} E_{0y} \neq 0 \text{ و } \angle E_{0x} = \angle E_{0y} = \varphi$$



قطبش خطی

- قطبش افقی: میدان الکتریکی عمود بر صفحه برخورد
- قطبش عمودی: میدان الکتریکی موازی با صفحه برخورد
- صفحه برخورد: صفحه شامل بردار پرتو و عمود بر سطح

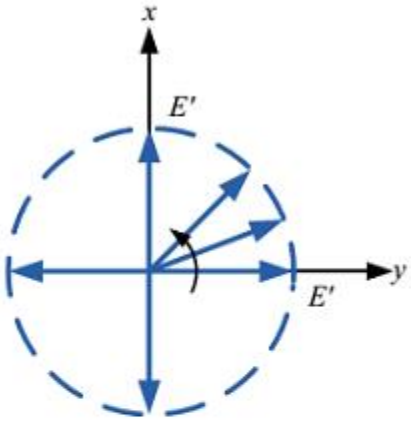


قطبش دایروی

- قطبش دایروی:

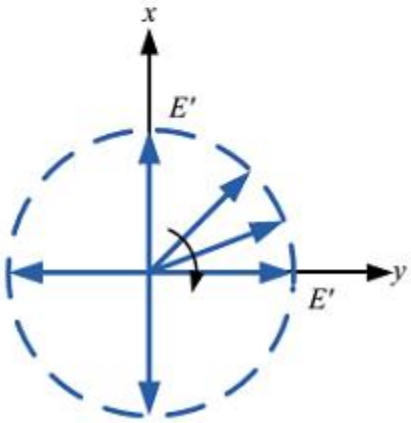
$$|E_{0x}| = |E_{0y}| = E'$$
و
$$\angle E_{0y} = \angle E_{0x} + 90°$$

دایروی چپگرد



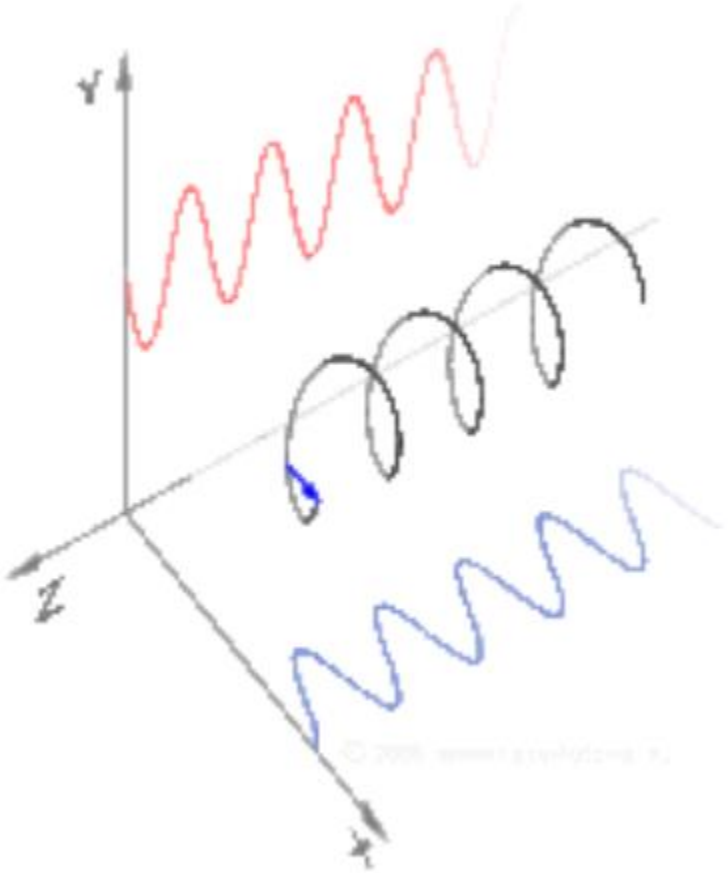
$$|E_{0x}| = |E_{0y}| = E'$$
و
$$\angle E_{0y} = \angle E_{0x} - 90°$$

دایروی راستگرد



قطبش دایروی

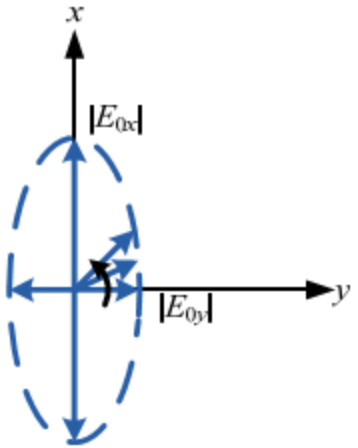
- قطبش دایروی



قطبش بیضوی

$$|E_{0x}| \neq |E_{0y}|$$
و
$$\angle E_{0y} = \angle E_{0x} \pm 90°$$

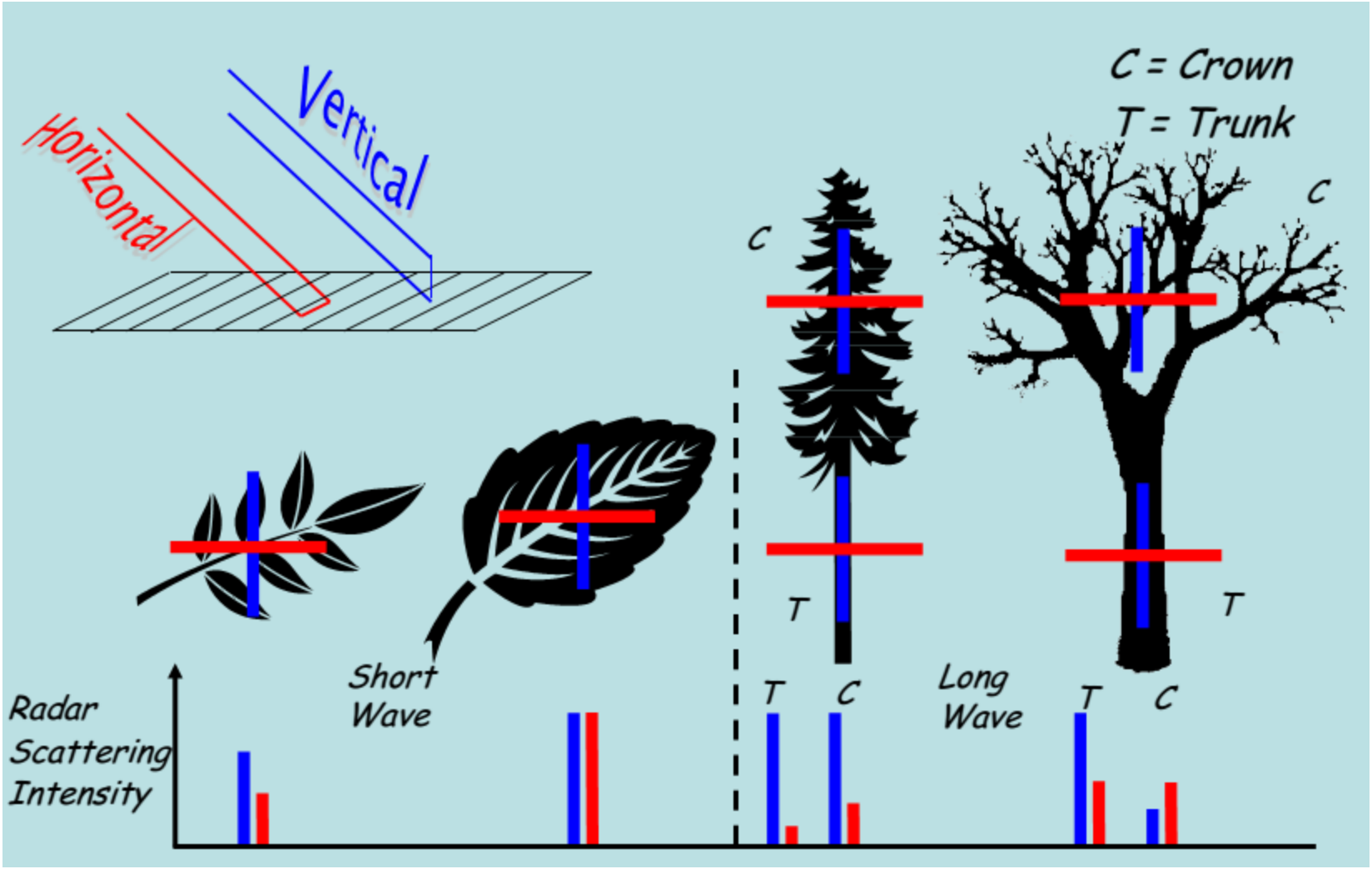
بیضوی قائم



$$|E_{0x}| \neq |E_{0y}|$$
و
$$\angle E_{0y} \neq \angle E_{0x} \pm 90°$$

بیضوی مایل

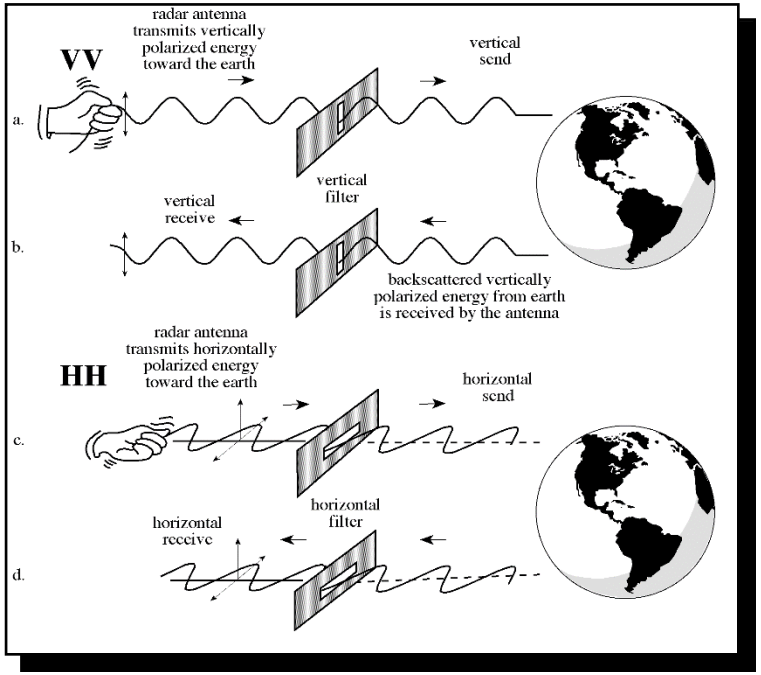
نمونه ای از تاثیر قطبش



استفاده از قطبش

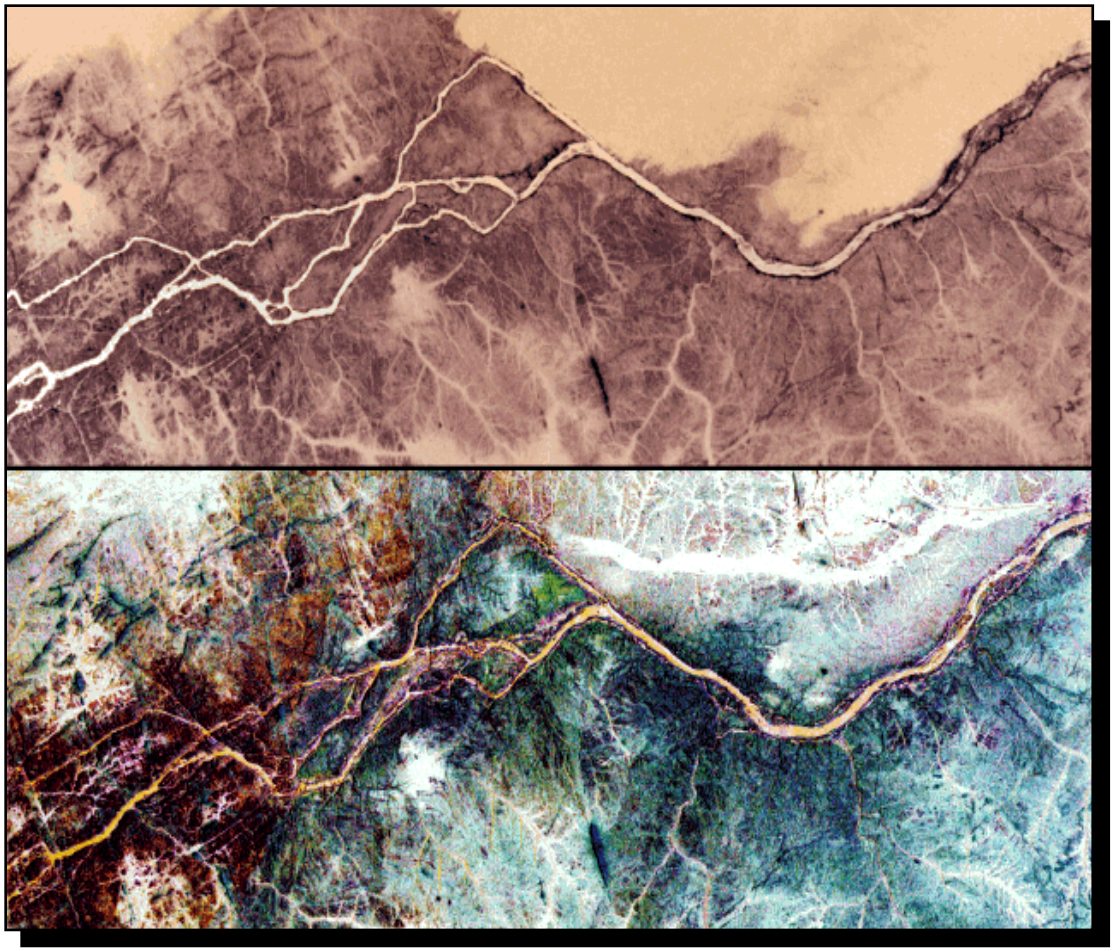
Polarimetric SAR(PolSAR)

- استفاده از **قطبش های مختلف** موج هنگام ارسال و دریافت جهت استخراج ویژگی های صحنه و تشکیل تصاویر رنگی با رنگ مجازی
- قطبش های مرسوم مورد استفاده: HH، VV، HV و VH



نمونه ای از استفاده از قطبش

Nile River
Sudan



Space Shuttle Color-Infrared Photograph

SIR-C Color Composite:
- Red = C-band HV
- Green = L-band HV
- Blue = L-band HH

فشرده سازی پالس

- قدرت تفکیک بالا در اندازه گیری برد، که می تواند توسط پالس های باریک حاصل شود، در بسیاری از کاربردهای راداری از اهمیت زیادی برخوردار است.
- یک محدودیت بزرگ در دستیابی به بردهای بلند با استفاده از پالس های باریک، نیاز به پیک توان بالا به منظور رسیدن به انرژی کافی است.
- در واقع در یک پالس مدوله نشده، ارتباط معکوسی بین انرژی و قدرت تفکیک وجود دارد.
  - کاهش پهنای پالس ⟸ افزایش قدرت تفکیک ⟸ کاهش انرژی

فشرده سازی پالس

- به عنوان مثال در یک رادار مراقبت هوایی برد متوسط
  - پهنای پالس: $1\ \mu s$
  - پیک توان ارسالی: $1\ MW$

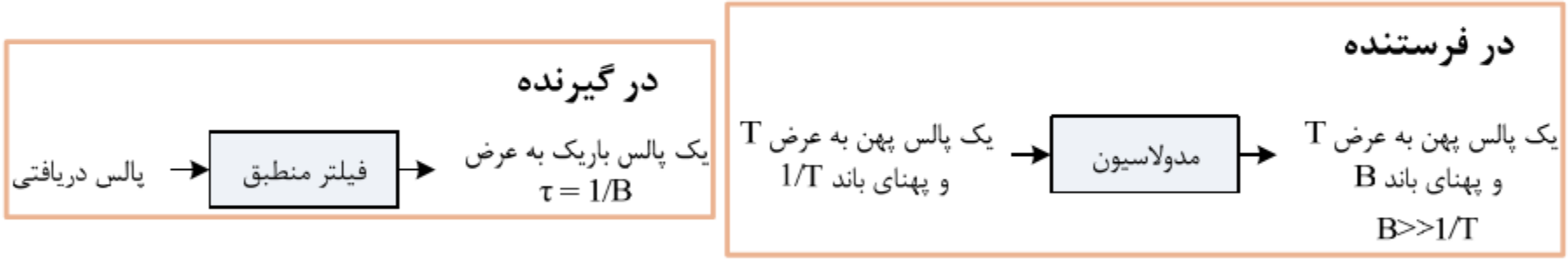
  ⟸

  انرژی هر پالس: $1\ J$

  قدرت تفکیک برد: $150\ m$
- اگر بخواهیم که قدرت تفکیک رادار فوق به $15\ cm$ کاهش یابد
  - پهنای پالس: $1\ ns$
  - پیک توان ارسالی: $1\ GW$
- پالس باریک دارای پهنای باند بزرگی است.
  - یک پالس پهن نیز می تواند همان پهنای باند پالس باریک را داشته باشد، اگر مدولاسیونی (فرکانس یا فاز) به آن اعمال شود.

فشرده سازی پالس

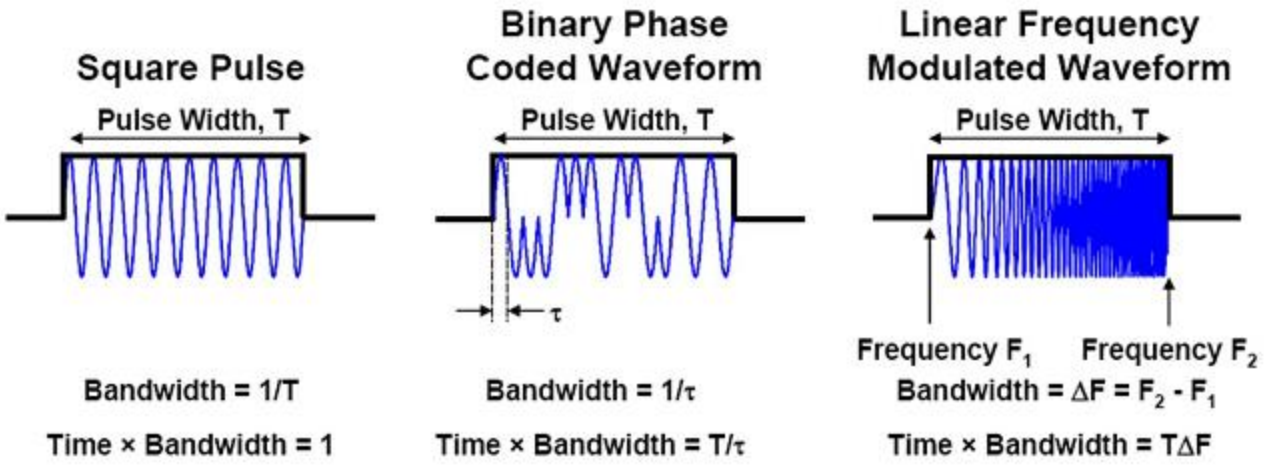
- پالس پهنِ مدوله شده با پهنای باند افزایش یافته ی B، توسط فیلتر منطبق در گیرنده فشرده شده و به پهنای 1/B می رسد.
- به این فرآیند **فشرده سازی پالس** (Pulse Compression) می گویند.
- فرآیند فشرده سازی پالس را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:



- با استفاده از فشرده سازی پالس می توان به صورت همزمان به انرژی پالس پهن و قدرت تفکیک پالس باریک بدون نیاز به توان پیک بالا دست یافت.

فشرده سازی پالس

- انواع شکل موج های متداول در فشرده سازی پالس
  - مدولاسیون خطی فرکانس (LFM)
  - شکل موج های کد شده فازی
    - دوفازی
    - چندفازی



فشرده سازی پالس

- نسبت پهنای پالس عریض (T) به پهنای پالس فشرده شده (τ) را **نسبت فشرده سازی** گویند.

$$\text{Pulse compression ratio} = \frac{T}{\tau}$$

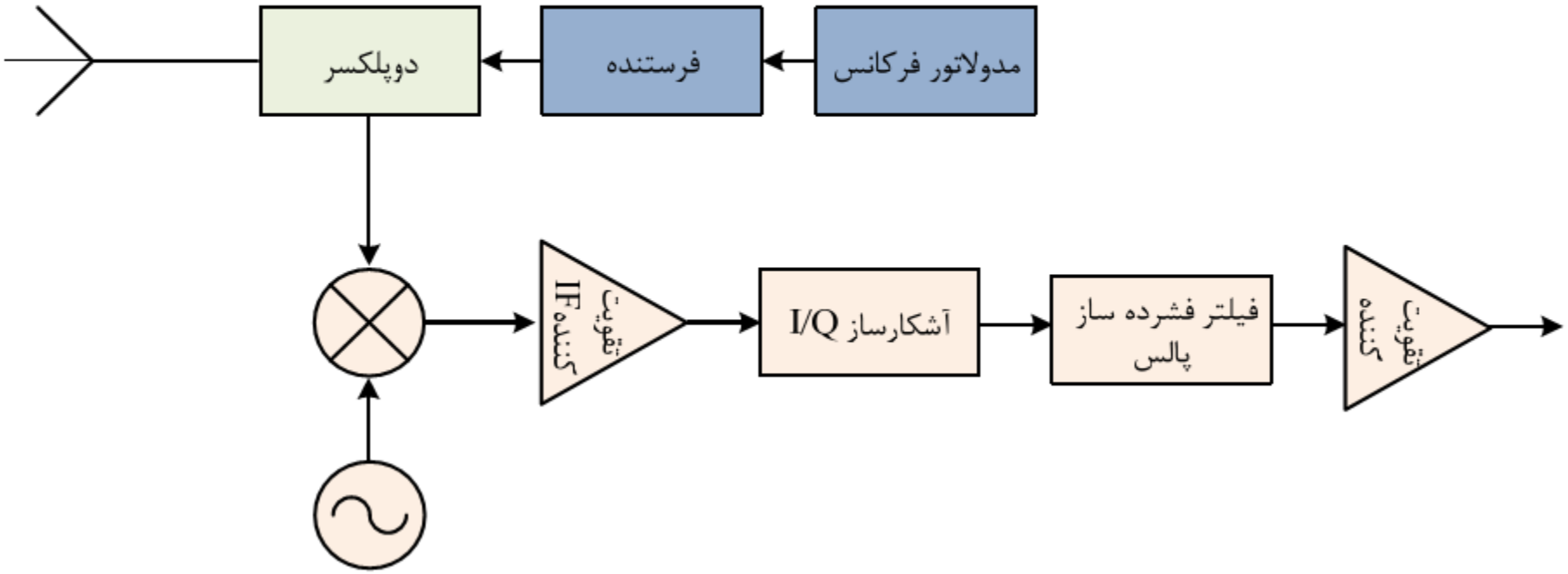
- از آنجا که $B \approx 1/\tau$ بنابراین

$$\text{Pulse compression ratio} \approx BT$$

- در سیستم های عملی، نسبت فشرده سازی پالس می تواند بین 10 تا بیش از 10^5 باشد.

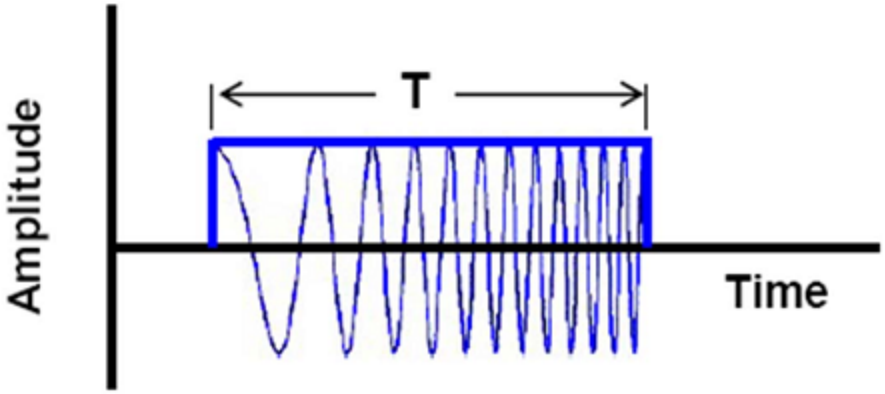
فشرده سازی پالس

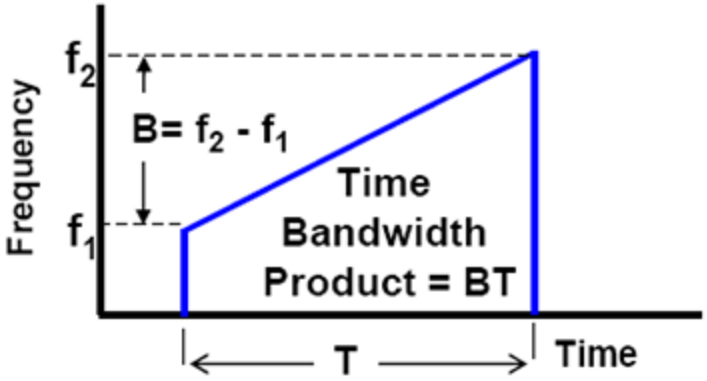
- بلوک دیاگرام کلی رادار با قابلیت فشرده سازی پالس



فشرده سازی پالس

- شکل موج ارسالی (up-chirp)





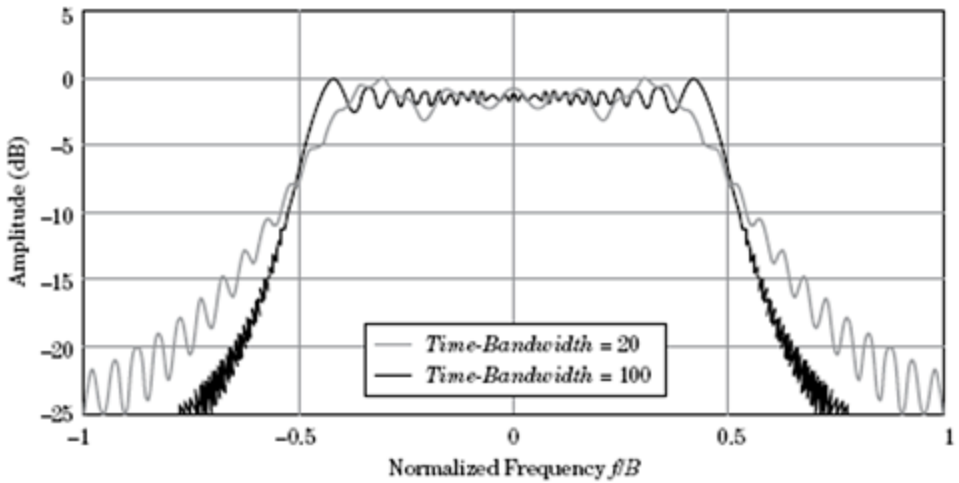
$$S_{RF}(t) = \sin\left[2\pi f_0 t + \pi \frac{B}{T} t^2\right] \qquad -\frac{T}{2} \le t \le \frac{T}{2}$$

فشرده سازی پالس

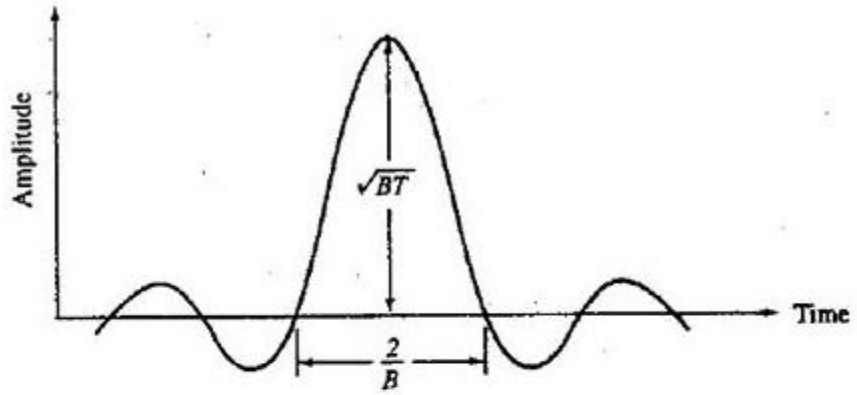
- طیف شکل موج ارسالی (up-chirp)

$$S(\omega) \simeq \left|X(\omega)\right| e^{\left(-j\frac{1}{4\pi}\frac{T}{B}\omega^2\right)} e^{j\frac{\pi}{4}} \qquad BT > 10$$

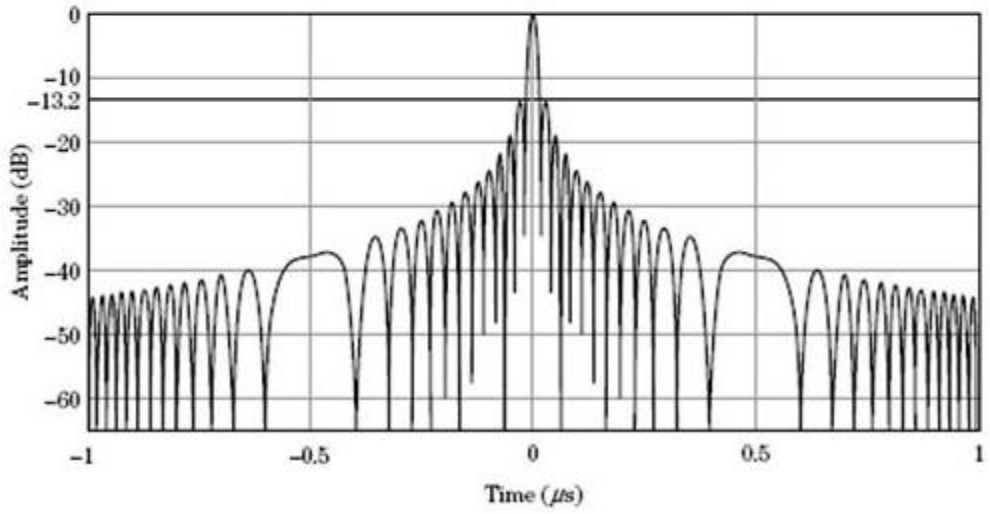
$$\left|X(\omega)\right| \simeq \begin{cases} 1 & -\pi B \le \omega \le \pi B \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$



فشرده سازی پالس



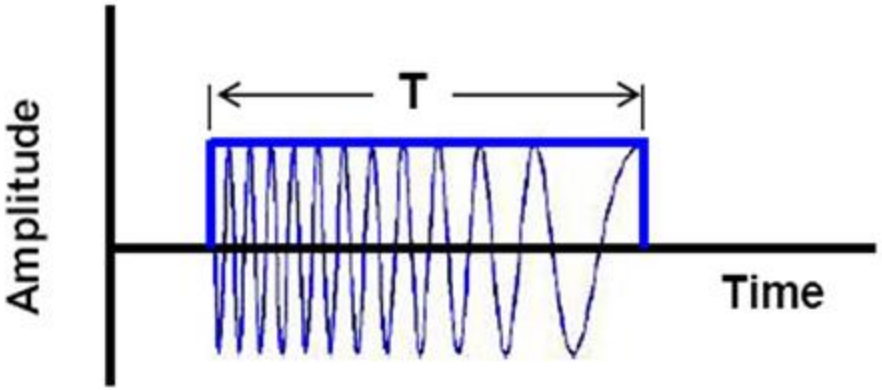
- خروجی فیلتر منطبق

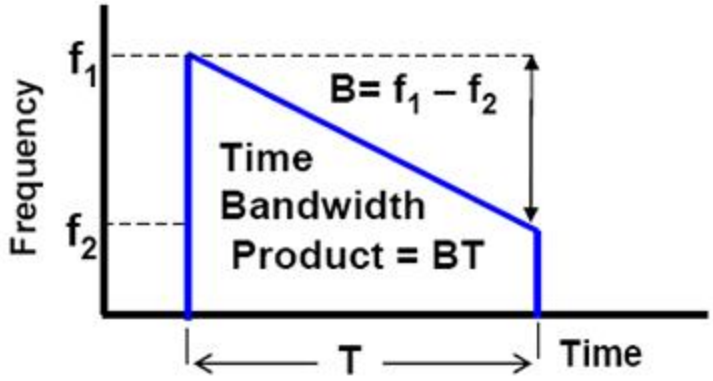


- خروجی فیلتر منطبق به یک پالس LFM با پهنای باند 50 MHz و عرض 1 µs

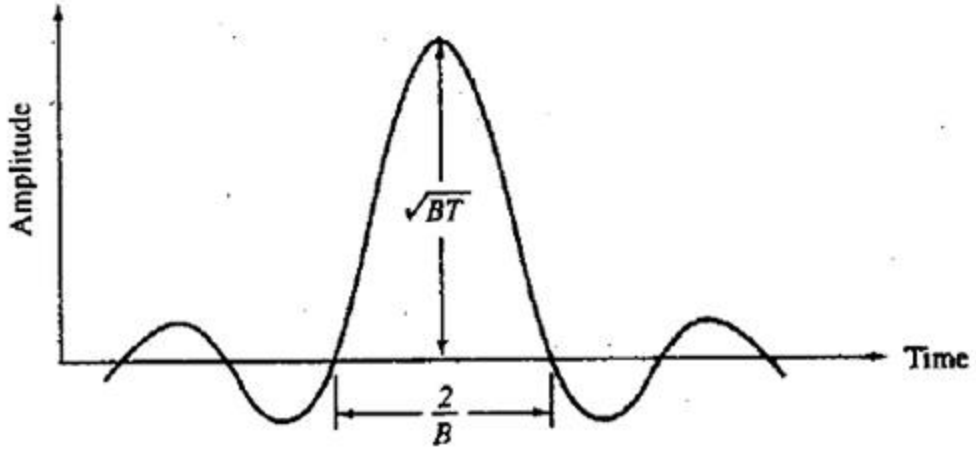
فشرده سازی پالس

- شکل موج ارسالی (down-chirp)





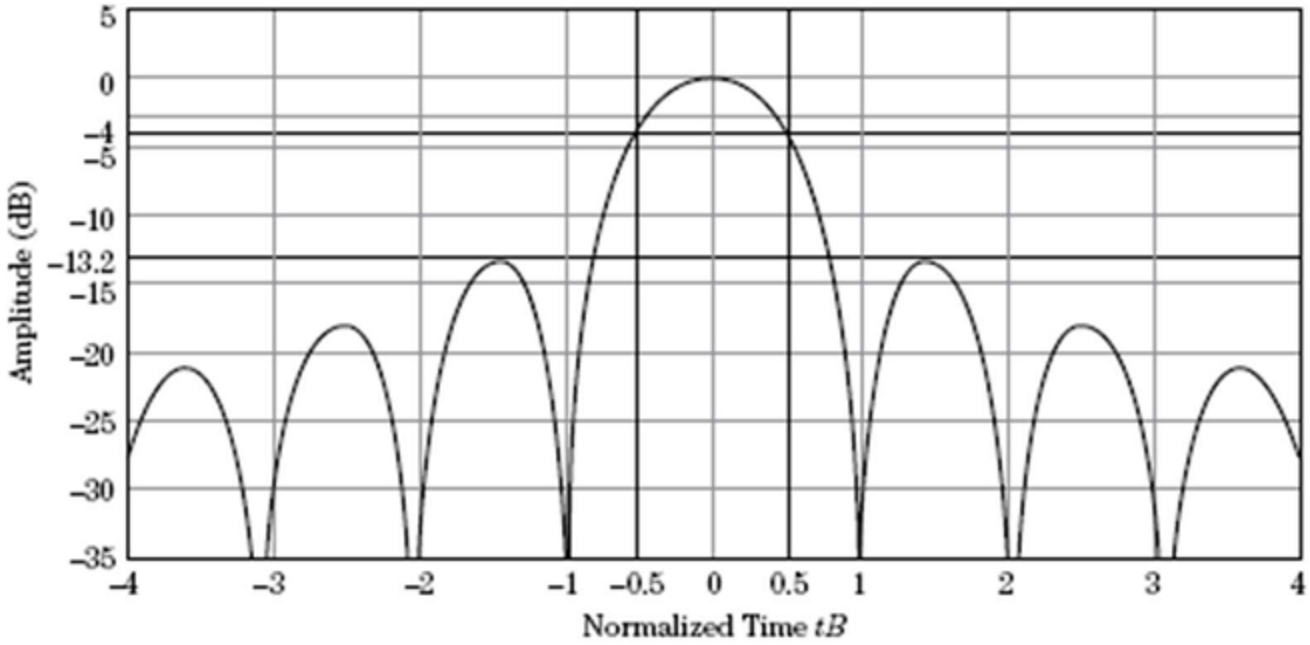
- خروجی فیلتر منطبق



فشرده سازی پالس

- فاصله بین پیک و اولین صفر در خروجی فیلتر منطبق

$$\delta t \simeq \frac{1}{B} \Rightarrow \delta R \simeq \frac{c\delta t}{2} = \frac{c}{2B}$$



فشرده سازی پالس

- خروجی فیلتر منطبق هنگامیکه ورودی آن پالس LFM باشد، دارای سطح گلبرگ جانبی نسبتاً بزرگی به اندازه 13.2 dB- است.
  - احتمال تشخیص اشتباه
  - احتمال پوشش اهداف ضعیف مجاور
- با وزن دهی دامنه پالس پهن ارسالی، در بازه زمانی T، می توان سطح گلبرگ های جانبی را کاهش داد.
  - مشابه tapering دامنه در آرایه ها یا استفاده از پنجره در فیلترهای داپلر
  - اما غالباً این روش در رادارهای توان بالا قابل استفاده نیست. زیرا فرستنده های توان بالا معمولاً در حالت اشباع عمل می کنند و در نتیجه امکان ارسال پالس هایی با دامنه متغیر در آن ها وجود ندارد.

فشرده سازی پالس

- بنابراین کاهش سطح گلبرگ های جانبی را با اعمال وزن دهی دامنه به فیلتر فشرده سازی پالس انجام می دهند.
  - از آنجا که فیلتر فشرده سازی پالس یک فیلتر منطبق است، اعمال وزن دهی دامنه به آن باعث ایجاد عدم تطبیق شده و در نتیجه SNR کاهش می یابد.
- مشخصات وزن دهی های مختلف برای کاهش سطح گلبرگ جانبی

Weighting Function	Peak sidelobe dB	Loss dB	Mainbeam width (relative)
Uniform	−13.2	0	1.0
$0.33 + 0.66\cos^2(\pi f/B)$	−25.7	0.55	1.23
$\cos^2(\pi f/B)$	−31.7	1.76	1.65
$0.16 + 0.84\cos^2(\pi f/B)$	−34.0	1.0	1.4
Taylor ($\bar{n} = 6$)	−40.0	1.2	1.4
$0.08 + 0.92\cos^2(\pi f/B)$ (Hamming)	−42.8	1.34	1.5