



# اصول و سیستم های رادار (بخش هفتم)

نیم سال دوم ۹۸-۹۹

رادارهای MTI و پالس داپلر

- مقدمه
- فرکانس داپلر در رادارهای پالسی
  - یادآوری: تبدیل فوریه
  - بررسی طیف فرکانسی قطار پالس
  - علت استفاده از چندین پالس
  - ماتریس داده های رادار
  - قطار پالس همدوس
  - طیف برد-داپلر برای رادارهای ثابت
  - طیف برد-داپلر برای رادارهای متحرک
- رادار MTI
- رادار پالس داپلر

- می توان از **پدیده داپلر** در رادارهای پالسی نیز مشابه رادارهای موج پیوسته برای تعیین سرعت نسبی هدف و یا جداسازی اهداف متحرک مطلوب از اهداف ثابت نامطلوب (کلاتر) استفاده کرد.
- رادار پالسی که از فرکانس داپلر برای آشکارسازی اهداف متحرک استفاده می کند را به دو دسته رادار **MTI (Moving Target Indicator)** و رادار **پالس داپلر** تقسیم می کنند.
- فرکانس تکرار پالس در رادارهای MTI به حدی پایین است که این رادارها هیچگونه ابهامی در برد نخواهند داشت. در مقابل در حوزه داپلر دارای ابهام خواهند بود.
- بالعکس رادارهای پالس داپلر دارای فرکانس تکرار پالس بزرگی بوده که از ابهام در حوزه داپلر اجتناب شود ولی در مقابل دارای ابهام در برد می باشند.

□ تبدیل فوریه تابع  $x(t)$

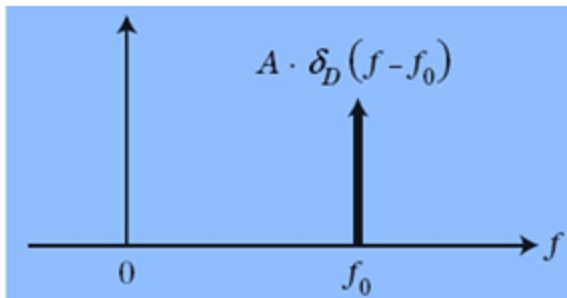
$$X(\omega) = \mathfrak{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad X(f) = \mathfrak{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

□ تبدیل فوریه معکوس

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df$$

□ تبدیل فوریه تابع  $x(t) = A \exp(j2\pi f_0 t)$

$$\begin{aligned} X(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} (Ae^{+j2\pi f_0 t})e^{-j2\pi ft} dt = A \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi(f-f_0)t} dt \\ &= A \cdot \delta_D(f - f_0) \end{aligned}$$



$$x(t) * y(t) \xrightarrow{\mathfrak{F}} X(f) \cdot Y(f)$$

$$x(t) \cdot y(t) \xrightarrow{\mathfrak{F}} X(f) * Y(f)$$

$$x(t) \xrightarrow{\mathfrak{F}} X(f) \Rightarrow x(t)e^{j2\pi f_0 t} \xrightarrow{\mathfrak{F}} X(f - f_0)$$

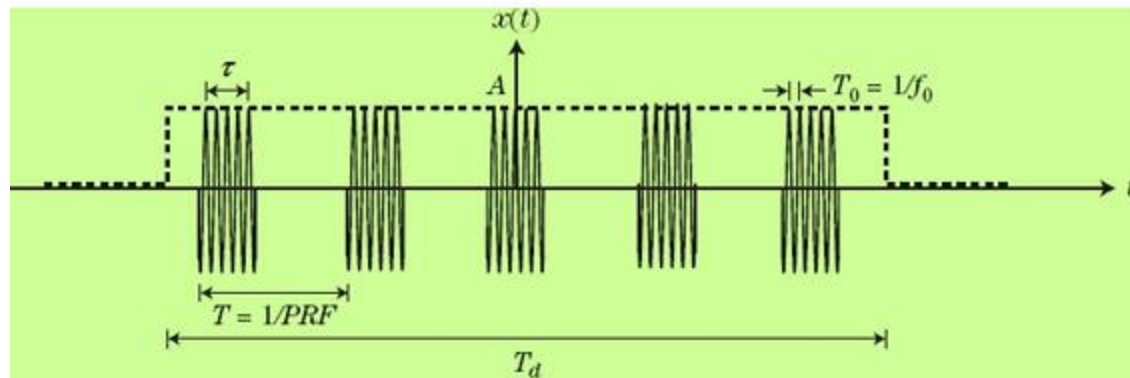
$$X(f) \cdot \delta_D(f - f_0) = X(f_0) \cdot \delta_D(f - f_0)$$

$$X(f) * \delta_D(f - f_0) = X(f - f_0)$$

□ در رادارهای MTI و پالس داپلر، از اختلاف فرکانس داپلر اهداف و کلاتر (به دلیل اختلاف سرعت آن‌ها نسبت به رادار) برای کاهش سطح تداخل و در نتیجه افزایش احتمال آشکارسازی و دقت اندازه‌گیری استفاده می‌کنند.

□ بنابراین لازم است که طیف فرکانسی قطار پالس را برای اهداف ثابت و متحرک بررسی کنیم.

□ یک قطار پالس RF را می‌توان توسط ۴ مقیاس زمانی توصیف کرد



□ دوره موج RF

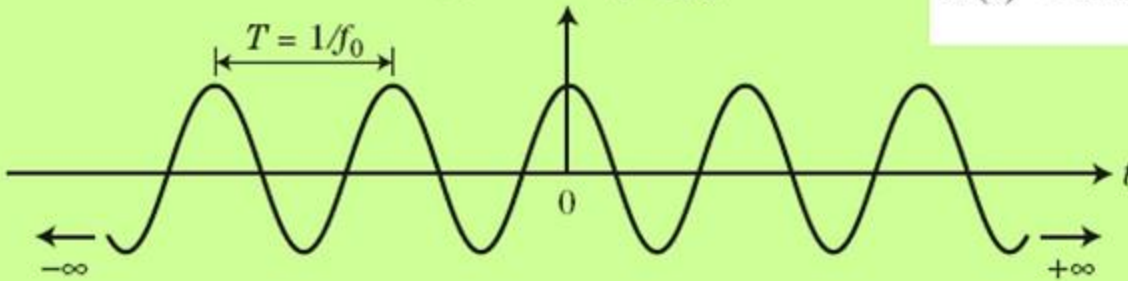
□ عرض پالس

□ دوره تکرار پالس

□ بازه پردازش همدوس

$$x(t) = A \cos(2\pi f_0 t)$$

$$x(t) = A \cos(2\pi f_0 t) = \frac{A}{2} \{e^{j2\pi f_0 t} + e^{-j2\pi f_0 t}\}$$

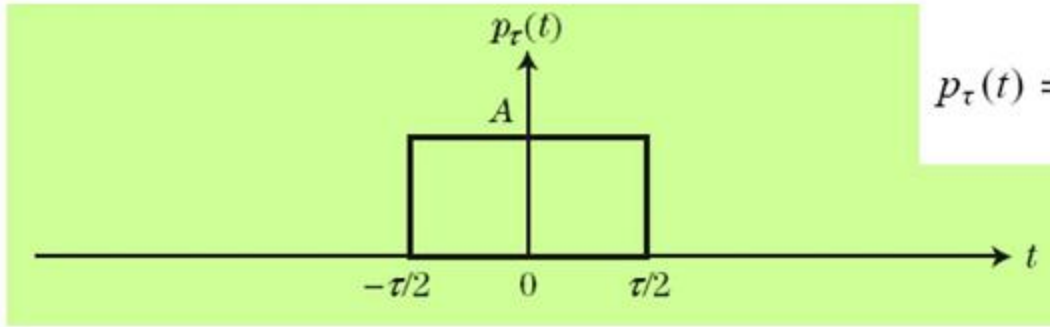


$$\frac{A}{2} \delta_D(f - f_0)$$

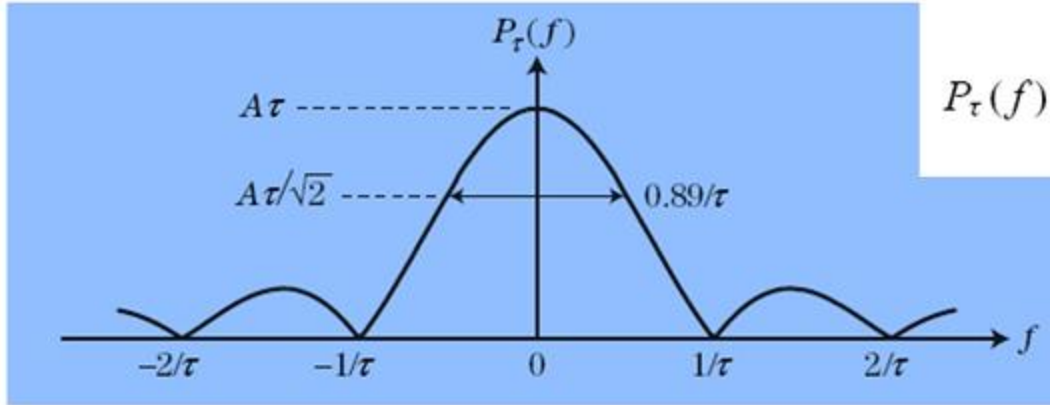
$$\frac{A}{2} \delta_D(f - f_0)$$

$$X(f) = \frac{A}{2} [\delta_D(f - f_0) + \delta_D(f + f_0)]$$



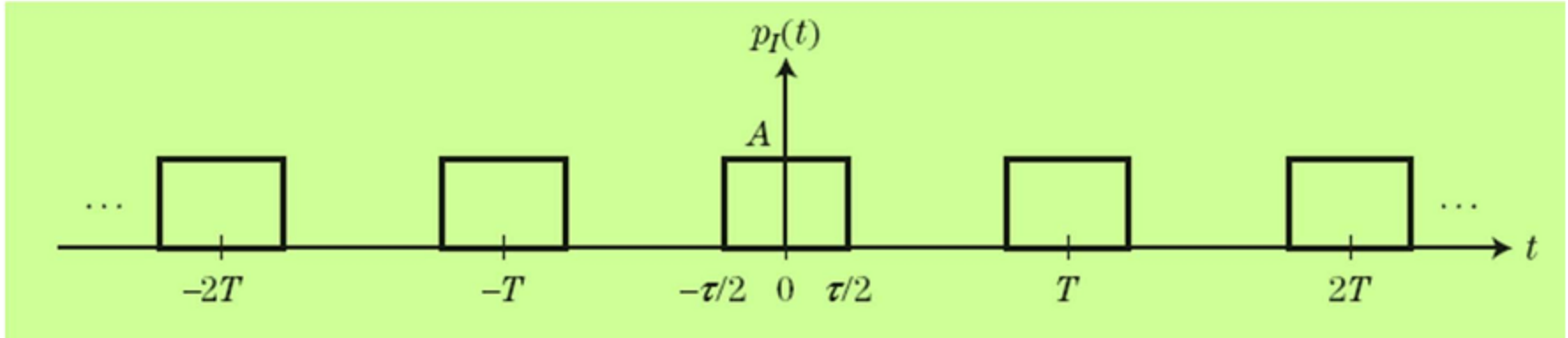


$$p_{\tau}(t) = \begin{cases} A, & -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$



$$\begin{aligned} P_{\tau}(f) &= \int_{-\tau/2}^{+\tau/2} A e^{-j2\pi f t} dt \\ &= \frac{A}{\pi f} \sin(\pi f \tau) = A\tau \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau} \\ &\equiv A\tau \operatorname{sinc}(\pi f \tau) \quad \left( \operatorname{sinc}(z) \equiv \frac{\sin(\pi z)}{\pi z} \right) \end{aligned}$$



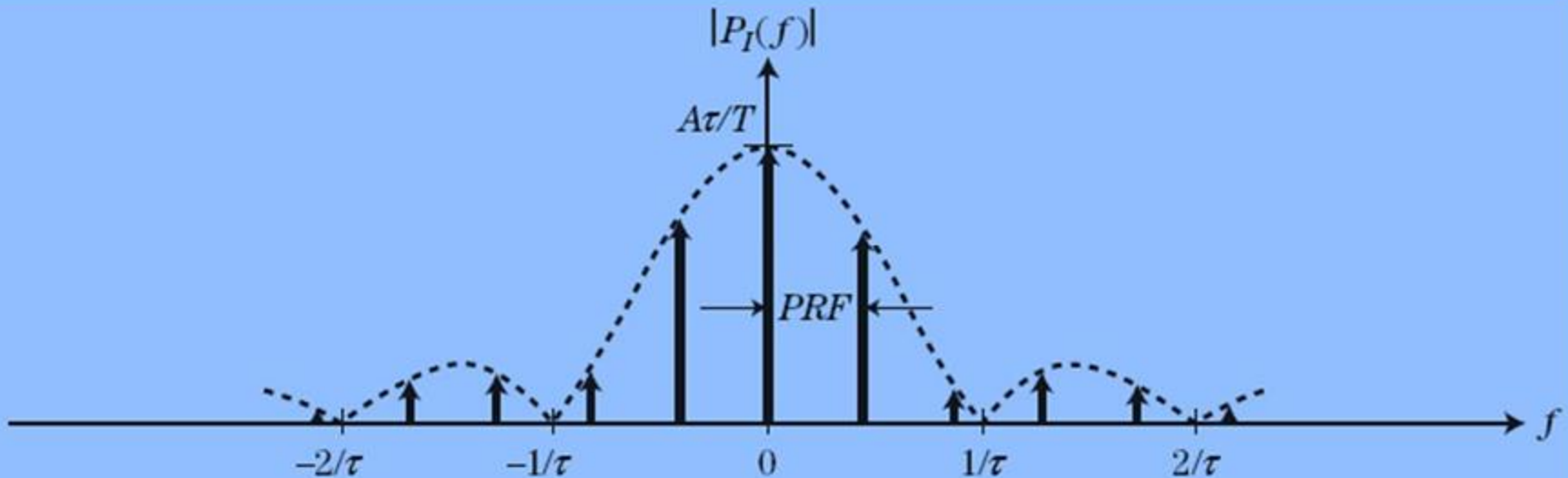


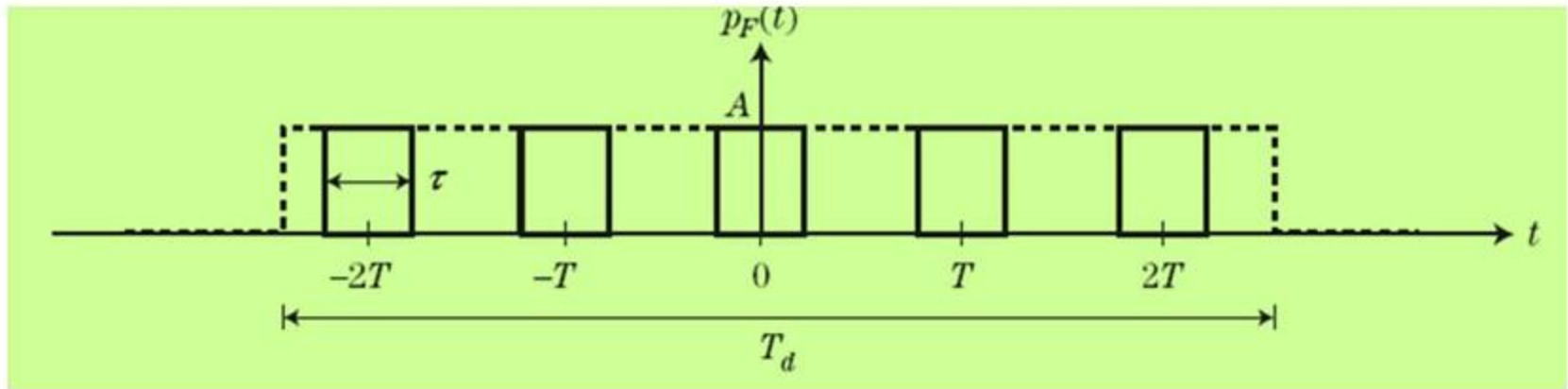
$$p_I(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p_{\tau}(t - n \cdot T) = p_{\tau}(t) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta_D(t - n \cdot T)$$

$$\mathcal{S} \left( \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta_D(t - n \cdot T) \right) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta_D \left( f - k \cdot \frac{1}{T} \right) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta_D(f - k \cdot PRF)$$

$$P_I(f) = \{A\tau \text{sinc}(\pi f\tau)\} \cdot \left\{ \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta_D(f - k \cdot PRF) \right\}$$

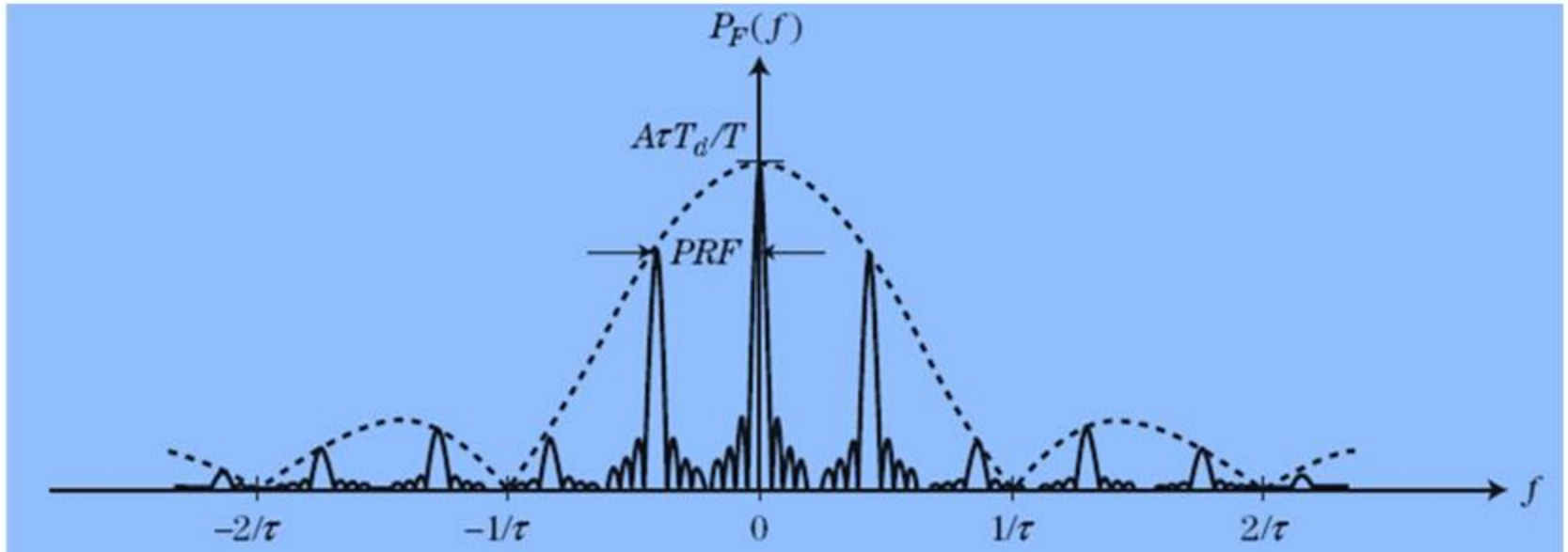
$$P_I(f) = \frac{A\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi \tau k \cdot PRF) \cdot \delta_D(f - k \cdot PRF)$$

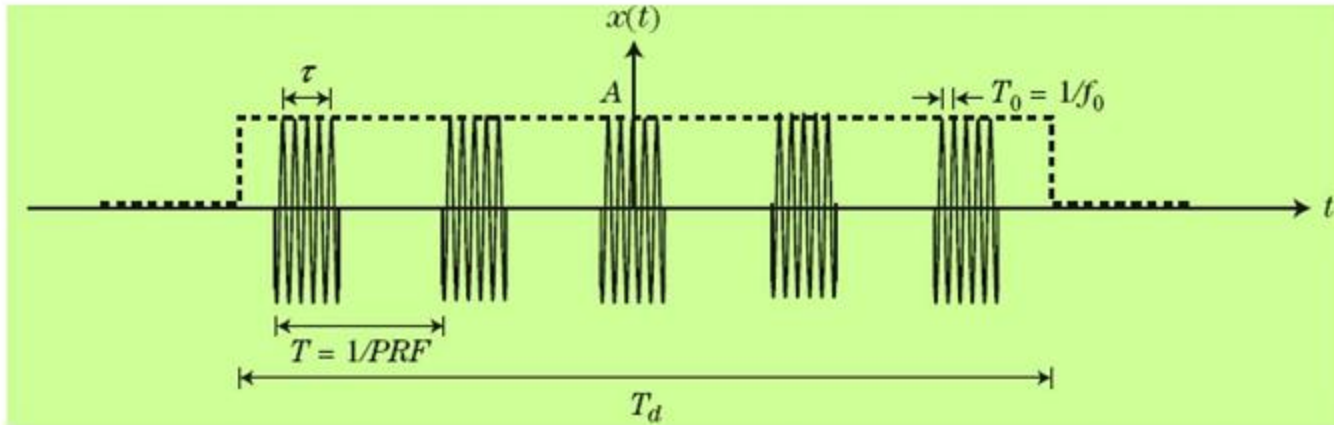




$$p_F(t) = p_I(t) \cdot p_{T_d}(t), \quad p_{T_d}(t) = \begin{cases} 1, & -\frac{T_d}{2} \leq t \leq \frac{T_d}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

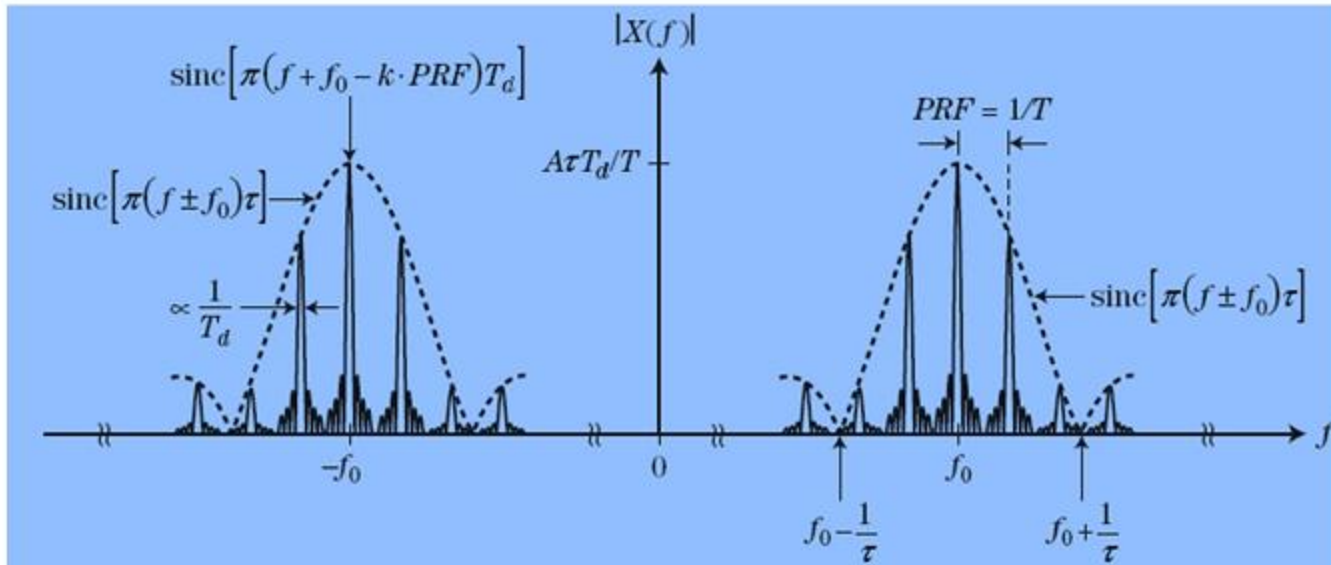
$$\begin{aligned}
 P_F(f) &= T_d \text{sinc}(\pi f T_d) * P_F(f) \\
 &= T_d \text{sinc}(\pi f T_d) * \left\{ \frac{A\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi \tau k \cdot PRF) \cdot \delta_D(f - k \cdot PRF) \right\} \\
 &= \frac{AT_d\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi \tau k \cdot PRF) \text{sinc}[\pi(f - k \cdot PRF)T_d]
 \end{aligned}$$





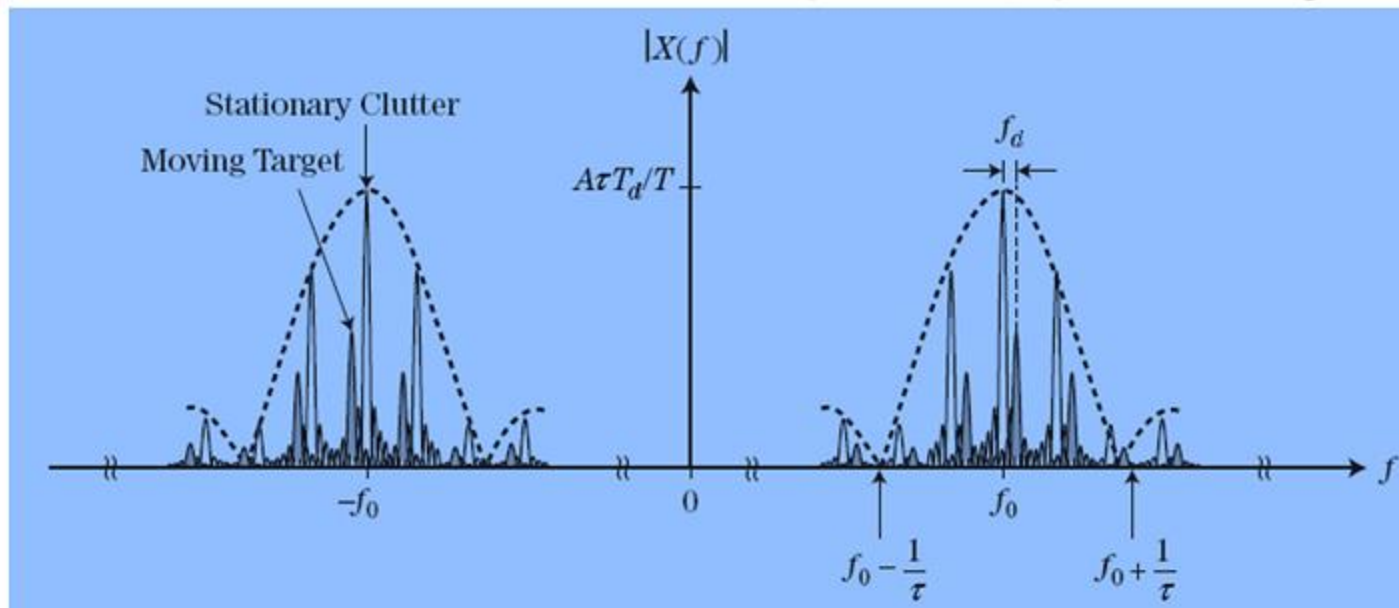
$$x(t) = p_F(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t)$$

$$\begin{aligned}
 X(f) &= \frac{1}{2} \{ P_F(f - f_0) + P_F(f + f_0) \} \\
 &= \frac{A T_d \tau}{T} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi \tau k \cdot PRF) \text{sinc}[\pi(f - f_0 - k \cdot PRF) T_d] \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi \tau k \cdot PRF) \text{sinc}[\pi(f + f_0 - k \cdot PRF) T_d] \right\}
 \end{aligned}$$



□ طیف قطار پالس دریافتی توسط یک رادار ثابت ناشی از یک هدف ثابت (کلاتر) و یک هدف متحرک

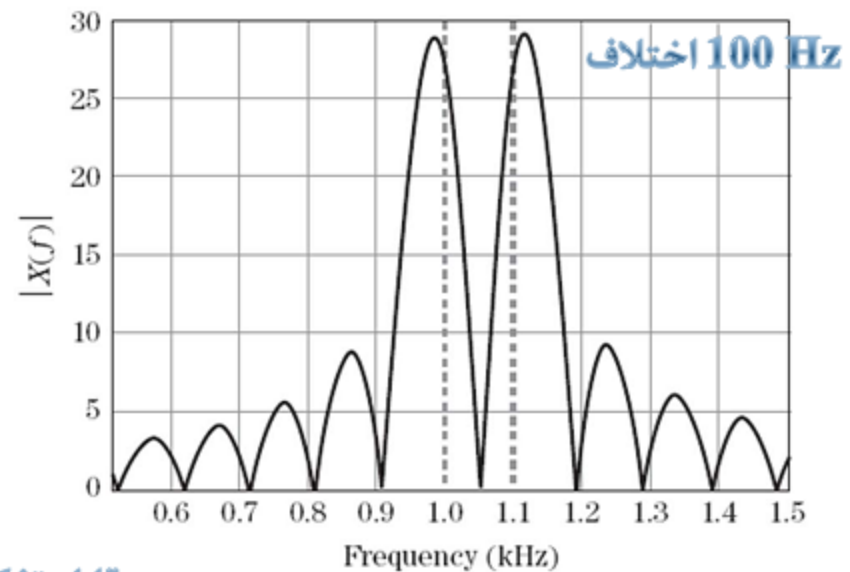
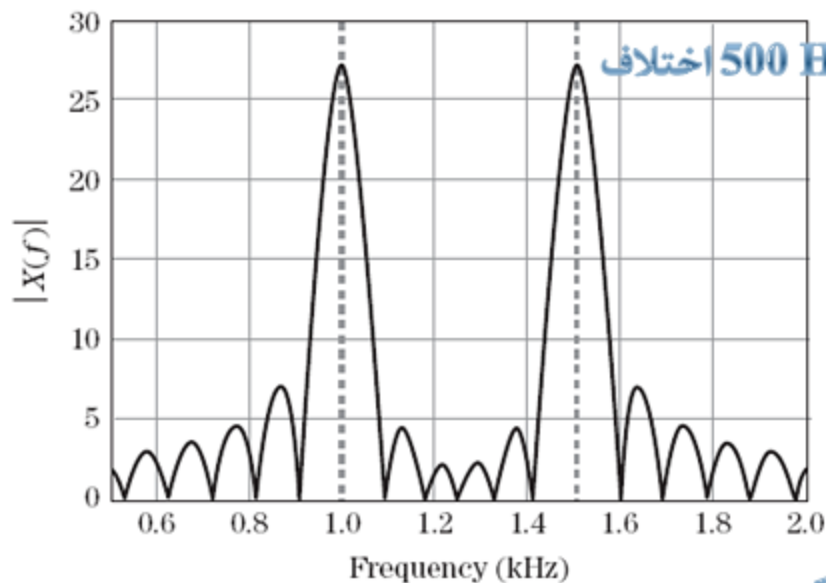
□ اساسی عملکرد رادار MTI: جدا شدن کلاتر ثابت از اهداف متحرک و امکان حذف کلاتر توسط فیلترینگ مناسب



□ کمترین اختلاف بین فرکانس داپلر دو هدف به گونه ای که بتوان آن ها را به صورت مجزا تشخیص داد.

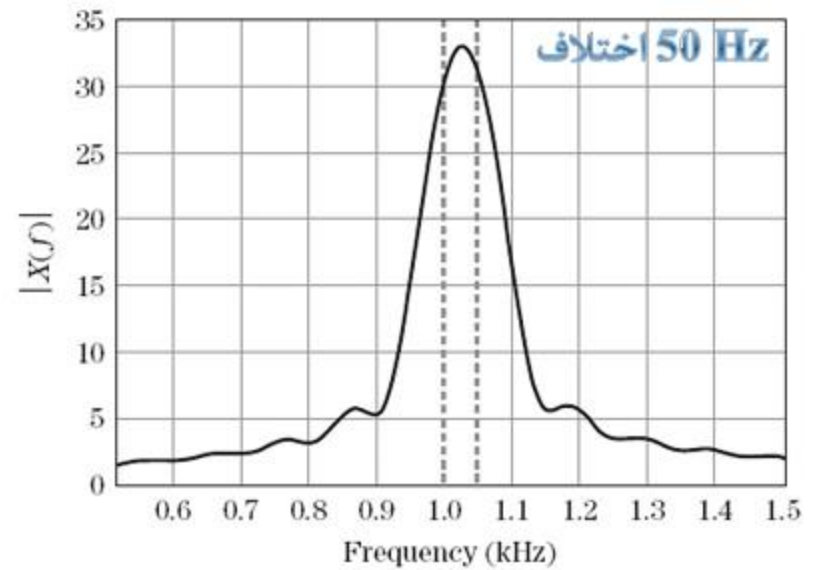
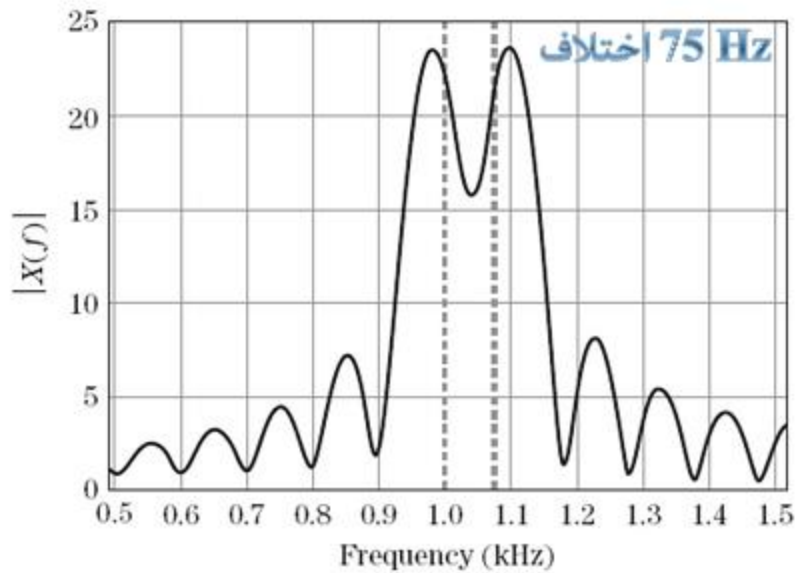
□ نصف پهنای بیم صفر تا صفر خطوط طیفی

□ مثال: طیف دو قطار پالس با  $T_D = 10 \text{ ms}$  و با فرکانس های داپلر مختلف



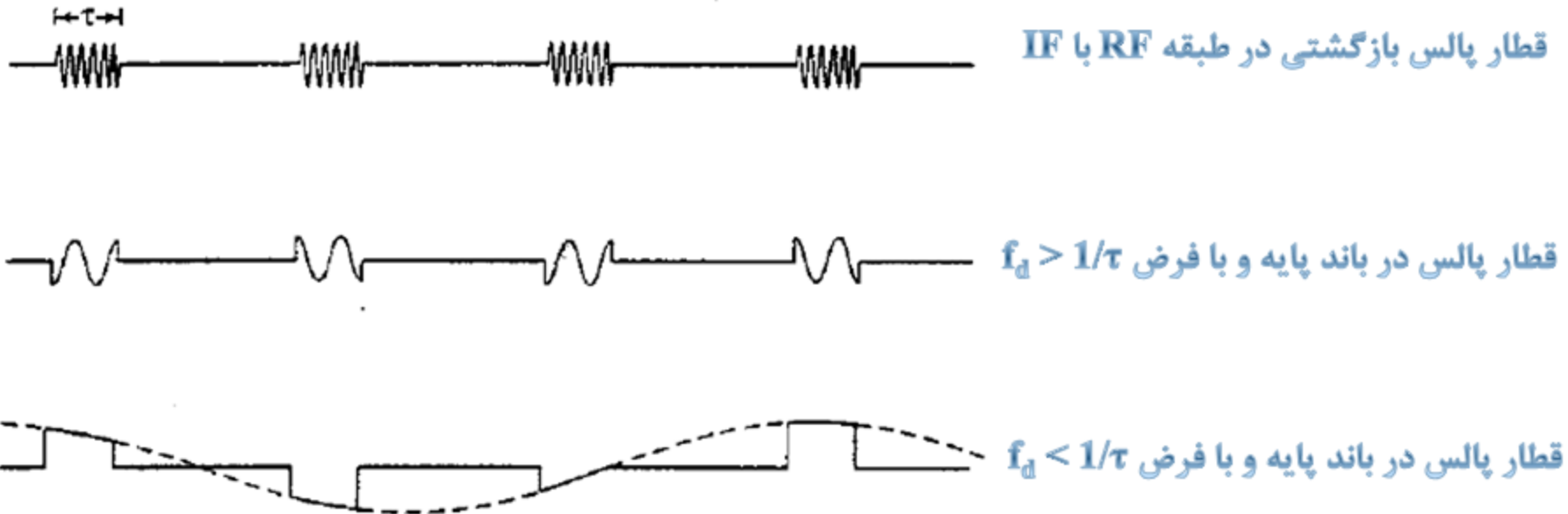
قابل تفکیک





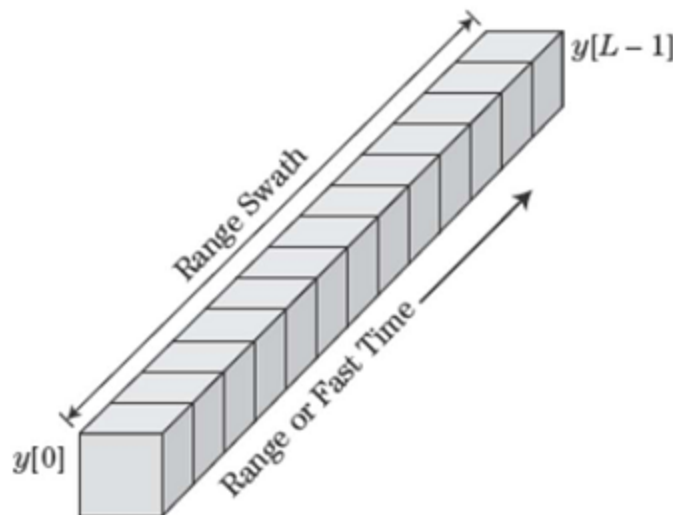
غیر قابل تفکیک

□ عدم امکان تعیین فرکانس داپلر توسط یک پالس



□ امکان استفاده از تجمیع همدوس برای افزایش احتمال آشکارسازی

- تأخیر زمانی را می توان با نمونه برداری از خروجی گیرنده پس از ارسال پالس بدست آورد.
- فاصله زمانی بین نمونه ها از قدرت تفکیک زمانی پالس رادار کوچکتر است.
- داده نمونه برداری شده در یک بردار که با عنوان سلول های برد، گیت های برد یا نمونه های **زمان سریع** نامیده می شود، ذخیره می گردند.



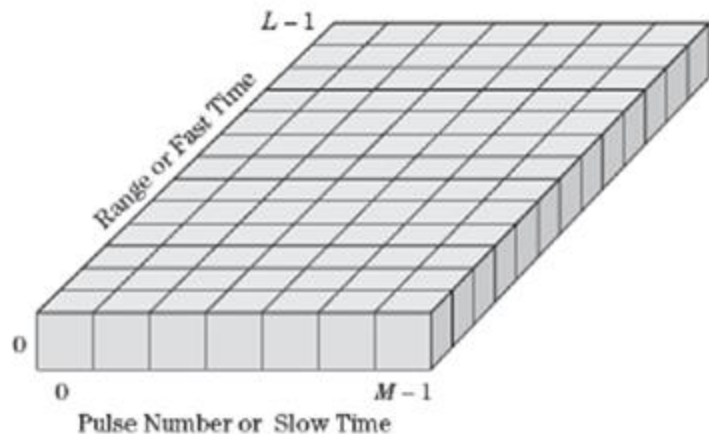
□ در راداری که  $M$  پالس در یک دوره زمانی ارسال می کند، برای هر پالس نمونه های زمان سریع ذخیره شده و در نتیجه یک ماتریس دو بعدی  $L * M$  خواهیم داشت.

□ فاصله زمانی بین نمونه ها در هر سطر برابر با PRI می باشد.

□ از آنجا که PRF بسیار کوچکتر از نرخ نمونه برداری می باشد، محور شماره پالس ها را محور **زمان آهسته** گویند.

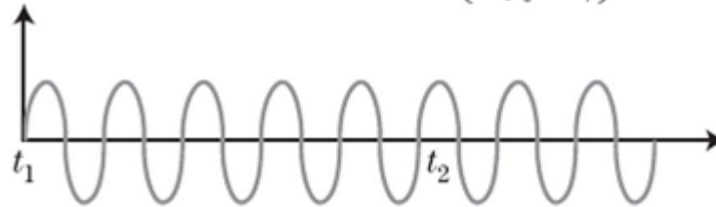
□ هر سطر معرف یک سری از اندازه گیری ها

از یک سلول مشخص با استفاده از  $M$  پالس متوالی است.

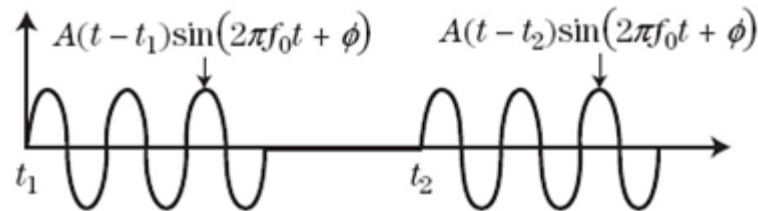


- برای اندازه گیری شیفیت داپلر با استفاده از چندین پالس، باید رابطه فازی مشخصی از یک پالس به پالس دیگر در دوره زمانی همدوس وجود داشته باشد.
- قطار پالسی که دارای این ویژگی است را **قطار پالس همدوس** و راداری که چنین قطار پالسی را تولید و از آن استفاده می کند، **رادار همدوس** گویند.
- قطار پالس همدوس را می توان با استفاده از یک اسیلاتور بسیار پایدار با انحراف فرکانسی کم تولید کرد.

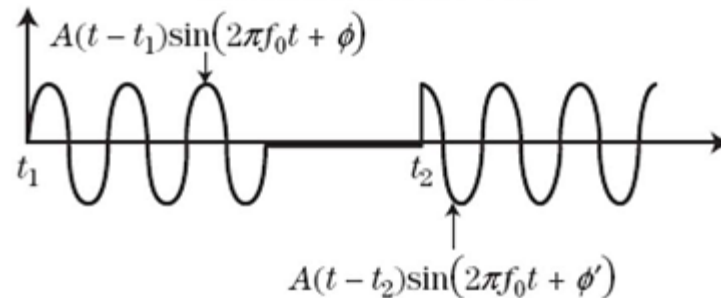
Reference Sinusoid  $\sin(2\pi f_0 t + \phi)$



Coherent Pulse Pair



Noncoherent Pulse Pair



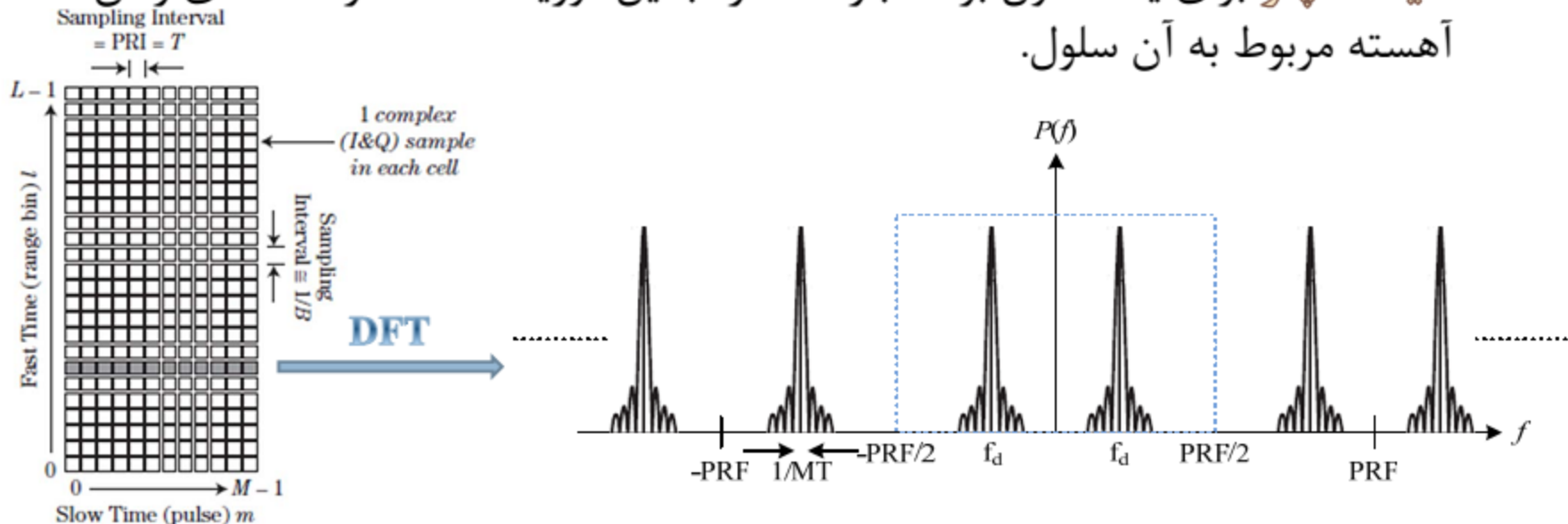
□ سه مؤلفه مهم در سیگنال خروجی یک رادار وجود دارد.

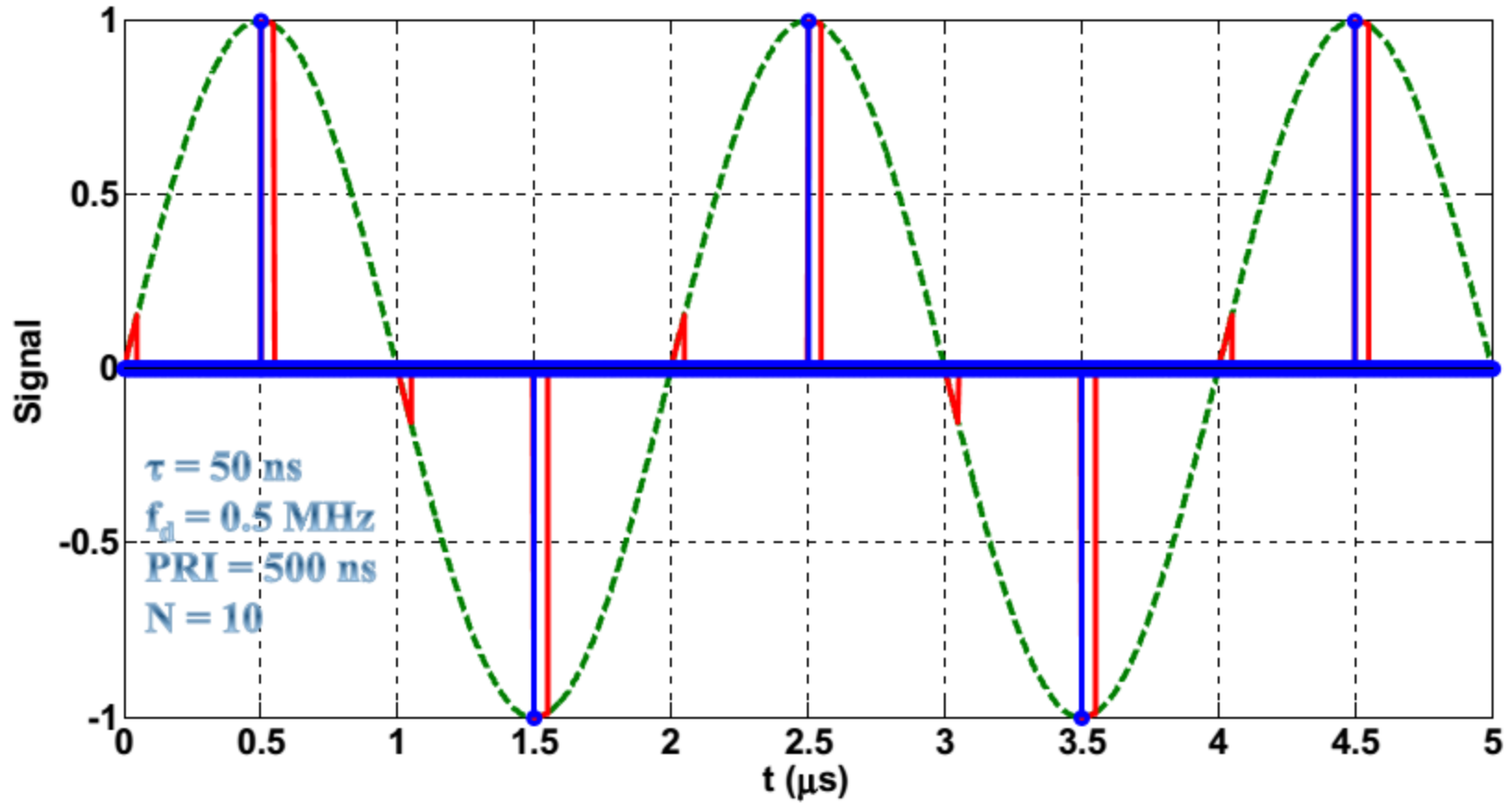
□ بازگشتی‌ها از یک یا چند هدف ثابت یا متحرک

□ نویز

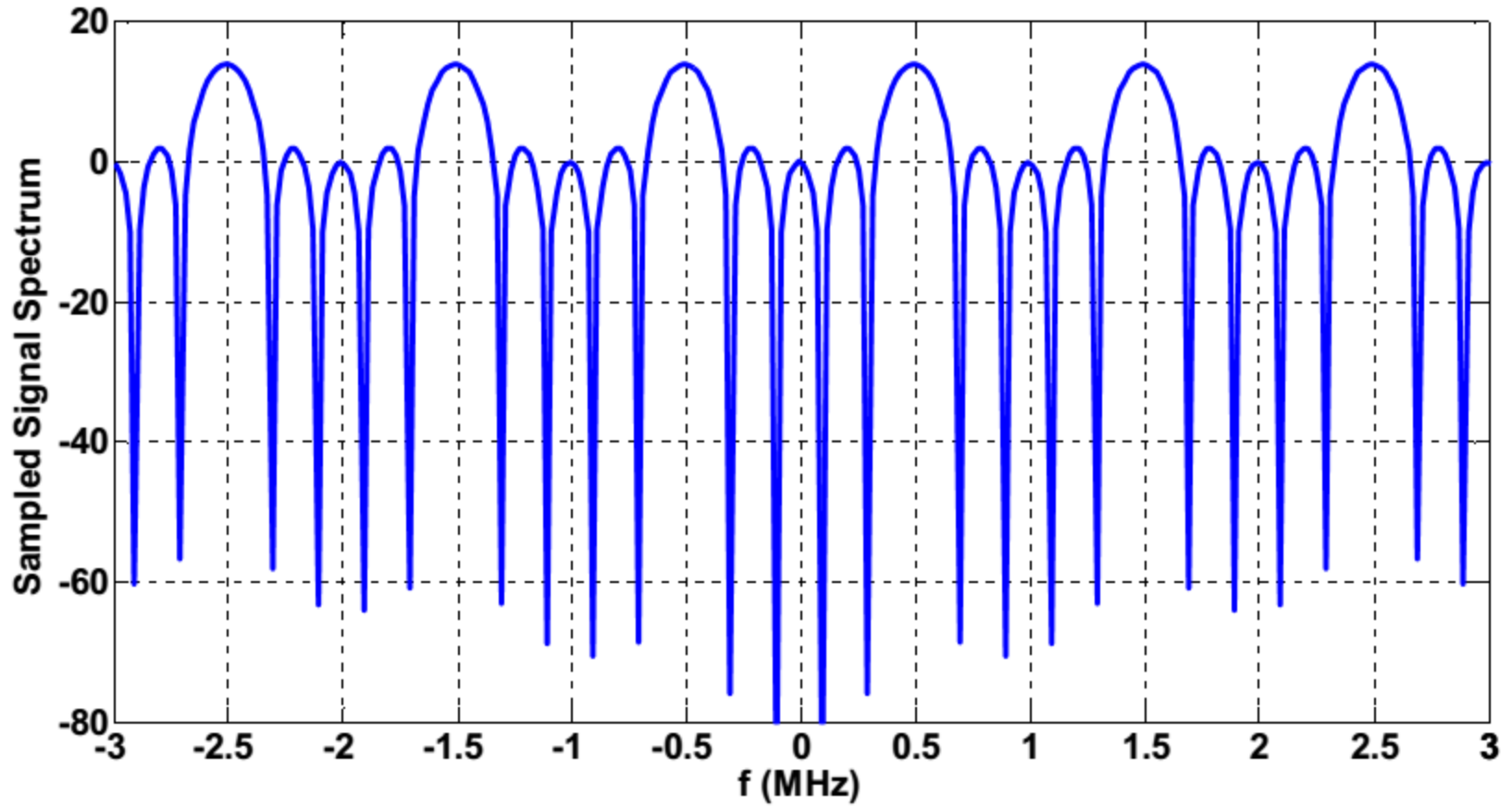
□ بازگشتی از کلاتر

□ **طیف داپلر** برای یک سلول برد، عبارتست از تبدیل فوریه گسسته از داده‌های زمان آهسته مربوط به آن سلول.





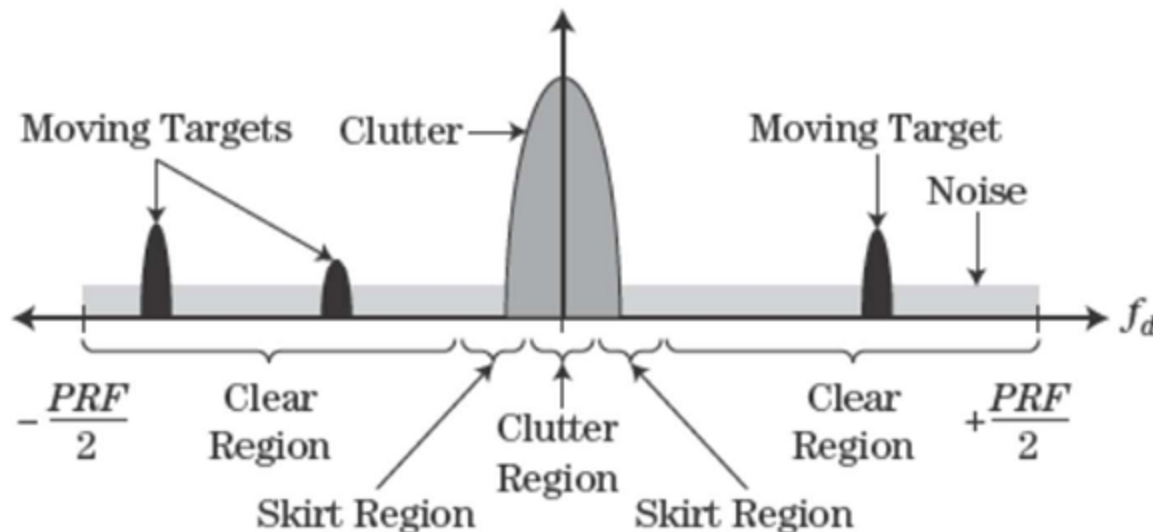




□ یک رادار ثابت همدوس را در نظر بگیرید.

□ جهت آنتن این رادار بخشی از فضا را به گونه ای روشن می کند که یک سلول بردِ خاص، شامل کلاتر زمین و سه هدف متحرک است.

□ طیف داپلر نوعی برای سلول برد اشاره شده در رادار فوق به صورت زیر است.



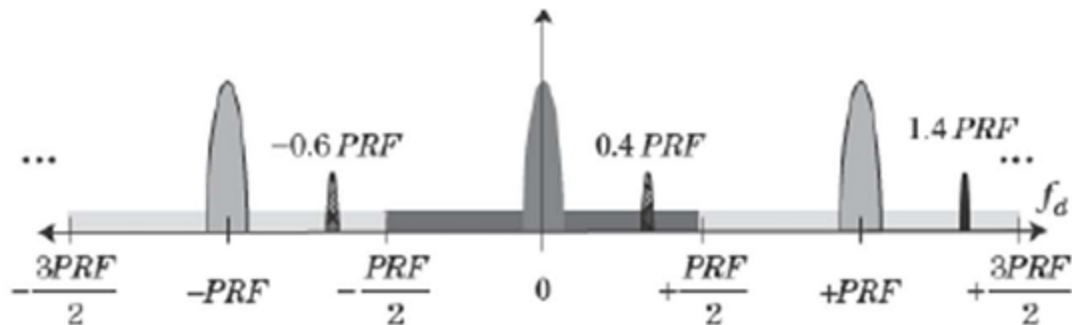
# طیف برد-داپلر برای یک رادار ثابت

□ طیف داپلر در حوزه فرکانس با دوره PRF متناوب است.

□ بنابراین اگر سرعت شعاعی هدف در بازه  $(-\lambda PRF/4, \lambda PRF/4)$  باشد، آنگاه شیفت داپلر در بازه  $(-PRF/2, PRF/2)$  قرار گرفته و در نتیجه فرکانس داپلر بدون ابهام قابل اندازه گیری است.

□ اما اگر اندازه شیفت داپلر ناشی از یک هدف بیش از  $PRF/2$  باشد، دچار ابهام می شویم.

□ به عنوان مثال طیف داپلر برای هدفی با شیفت داپلر  $1.4PRF$  به صورت زیر است.



# طیف برد-داپلر برای یک رادار ثابت

□ بنابراین بازه داپلر بدون ابهام برابر است با

$$f_{d_{ua}} = PRF$$

□ از طرفی برد بدون ابهام برابر است با

$$R_{ua} = \frac{c T}{2} = \frac{c}{2PRF}$$

□ بنابراین حاصلضرب برد بدون ابهام در بازه داپلر بدون ابهام برابر است

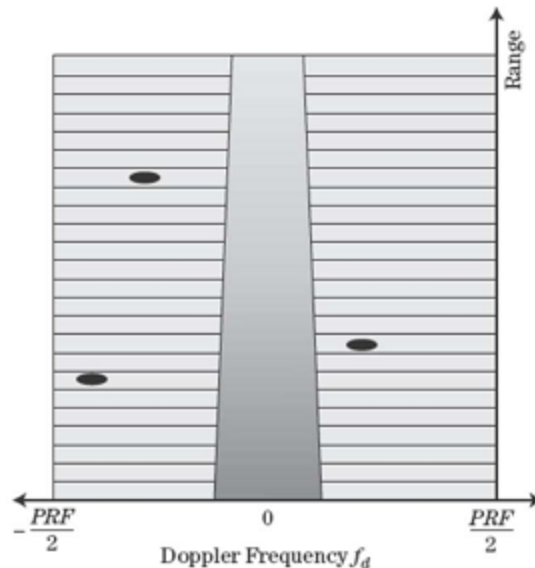
$$R_{ua} = \frac{c T}{2} = \frac{c}{2PRF}$$

با

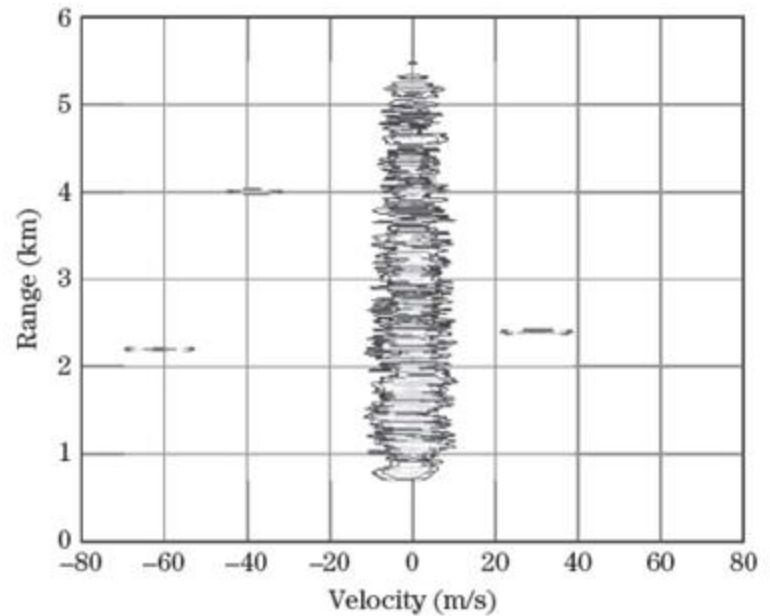
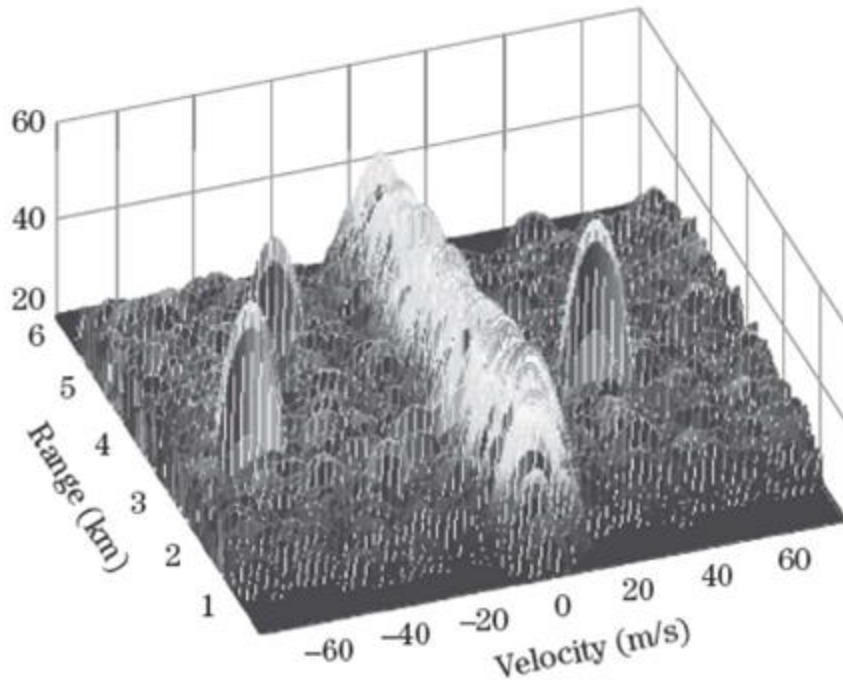
$$R_{ua} v_{ua} = \frac{\lambda c}{4}$$

# طیف برد-داپلر برای یک رادار ثابت

- در حالت کلی تعداد زیادی سلول برد داریم.
- اهداف می توانند در چندین سلول برد حضور داشته باشند.
- کلاتر نیز می تواند در چندین سلول برد توزیع شود.
- توزیع نوعی اهداف، نویز و کلاتر در صفحه برد-داپلر



□ طیف برد-داپلر برای یک رادار ثابت با فرکانس مرکزی 10 GHz



□ یک رادار متحرک نه تنها باعث ایجاد یک شیفت داپلر در بازگشتی از کلاتر ثابت می شود، بلکه پهنای باند آن را نیز افزایش می دهد.

□ این وضعیت در مورد رادارهای هوا به زمین صادق است.

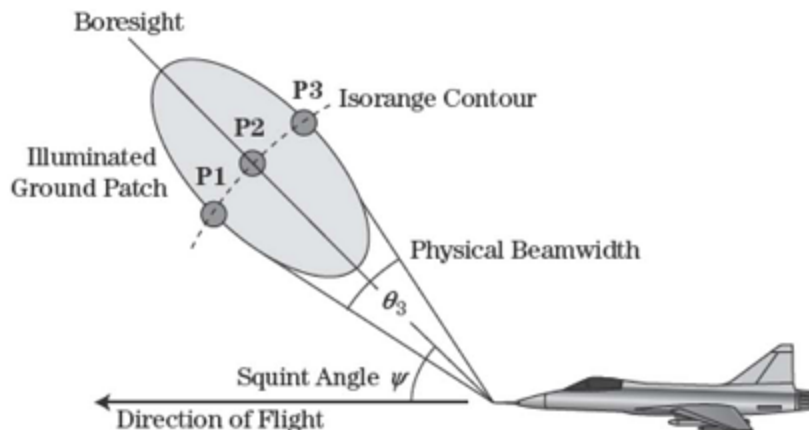
□ نحوه بدست آوردن افزایش پهنای باند به علت حرکت سکو

□ سه هدف نقطه ای P1، P2 و P3 را که در یک فاصله

نسبت به رادار قرار دارند در نظر بگیرید.

□ شیفت داپلر ناشی از هدف P2

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \psi = f_{MLC} \text{ Hz}$$



## طیف برد-داپلر برای یک رادار متحرک

□ اختلاف شیف داپلر ناشی از اهداف P1 و P3

$$\begin{aligned} B_{MLC} &= \frac{2v}{\lambda} \{ \cos(\psi - \theta_3/2) - \cos(\psi + \theta_3/2) \} \\ &= \frac{4v}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right) \sin\psi \end{aligned}$$

□ با فرض کوچک بودن پهنای بیم آنتن رادار

$$B_{MLC} \approx \frac{2v\theta_3}{\lambda} \sin\psi \text{ Hz}$$

□ در بدست آوردن این رابطه فرض شده است که

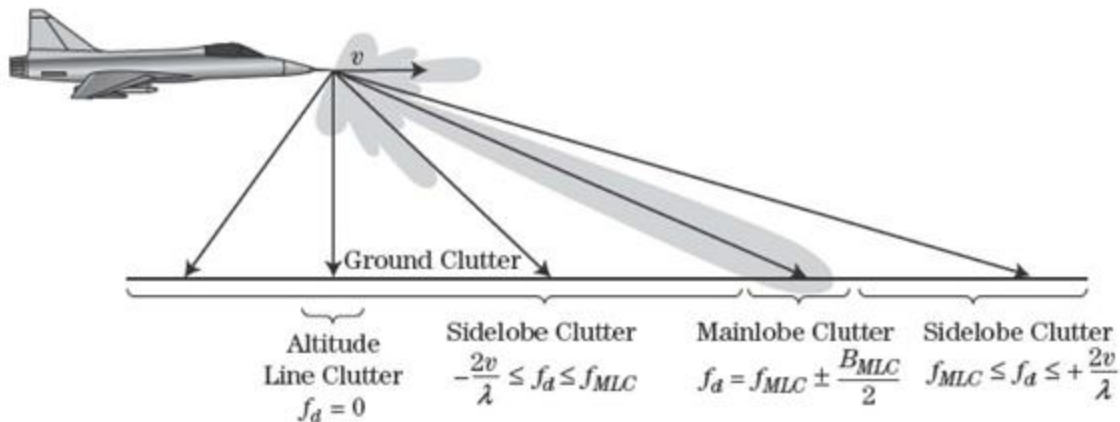
$$|\psi| > \theta_3/2$$

□ پهنای باند داپلر، مجموع پهنای باند ناشی از حرکت سکو و پهنای باند ذاتی بازگشتی از کلاتر مورد نظر است.



# طیف برد-داپلر برای یک رادار متحرک

هندسه مورد نظر برای محاسبه طیف داپلر در رادار متحرک □



طیف داپلر برای یک سلول برد در رادار همدوس متحرک □

