



# مباحث ویژه (پردازش سیگنال های راداری)

نیم سال دوم ۰۴-۰۵

الگوریتم **SPECAN**

- الگوریتم RDA برای پردازش داده های ماهواره های اولیه داده دقیقی بود، ولی بهنگام (real-time) نبود. بنابراین نیاز به الگوریتمی برای تشکیل تصویر با سرعت بیشتر حتی به قیمت از دست دادن حد تفکیک در سمت وجود داشت.
- از طرف دیگر در برخی کاربردها نیاز بود تصویربرداری در عرض نوار بیشتر ولی با دقتی کمتر از دقت ناشی از پویش کامل روزنه مصنوعی داشته باشیم. یعنی سکو یک نوار را با بخشی از روزنه مصنوعی داده برداری کند و بقیه زمان روزنه مصنوعی را برای داده برداری از یک نوار دیگر به موازات نوار فعلی صرف کند. (شیوه کارکرد ScanSAR)
- اینها انگیزه ای برای به کارگیری الگوریتم SPECTral ANalysis یا SPECAN بود.

- این الگوریتم نسبت به RDA دارای ویژگی های زیر است:
  - سرعت بیشتر
  - دقت کمتر
- مانند RDA دارای قابلیت «پردازش چند نما» (Multi-Look Processing)
- ویژگی اصلی الگوریتم SPECAN نحوه انجام فشرده سازی در سمت است.
- در این الگوریتم این عملیات به صورت «پردازش کششی» (stretch processing) صورت می گیرد که شامل deramp و FFT است.
- برای فشرده سازی یک سیگنال LFM، می توان به جای ضرب حوزه فرکانس و IFFT، این سیگنال را در حوزه زمان در یک سیگنال LFM با زمان شروع مرجع ضرب کرده و سپس FFT گرفت.

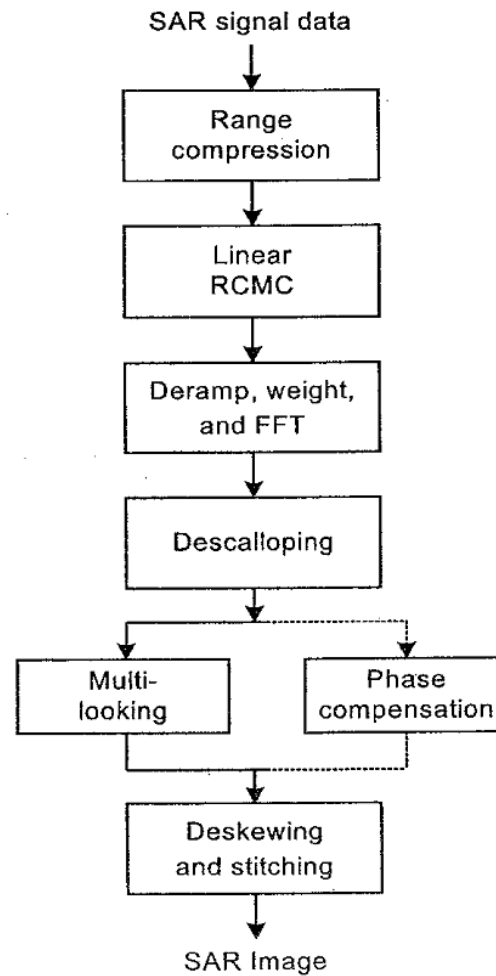


Figure 9.1: Overview of the SPECAN SAR processing algorithm.

## پردازش کششی

5

□ بررسی فشرده سازی در سمت: فرض کنیم پاسخ ضربه فیلتر منطبق در سمت به صورت زیر باشد:

$$h(\eta') = \text{rect}\left(\frac{\eta'}{T}\right) \exp\{j\pi K_a (\eta')^2\}$$

□ بنابراین خروجی فیلتر منطبق حاصل کانولوشن حوزه زمان است:

$$s_1(\eta') = \int_{-T/2}^{T/2} s_r(\eta' - u) h(u) du = \int_{\eta' - T/2}^{\eta' + T/2} s_r(u) h(\eta' - u) du$$

□ پس از ساده سازی:

$$s_1(\eta') = \exp\{j\pi K_a (\eta')^2\} \int_{\eta' - T/2}^{\eta' + T/2} s_r(u) \exp\{j\pi K_a u^2\} \times \exp\{-j 2\pi K_a \eta' u\} du$$

ضرب در سیگنال چیرپ

تبدیل فوریه

- سوال: چرا پردازش کششی در حوزه برد استفاده نمی شود؟
  - در حوزه سمت حد تفکیک کامل مد نظر است و در حد تفکیک کامل پردازش کششی کارایی خود را تا حد زیادی از دست می دهد. در حوزه سمت در این الگوریتم حد تفکیک کامل مد نظر نیست. ضمناً استفاده از پردازش کششی برخی مشکلات دیگر هم ایجاد می کند، لذا معمولاً در برد از این پردازش استفاده نمی شود.
  - ضرب کردن سیگنال LFM سمت در یک ramp دیگر به منظور تولید یک سیگنال با فرکانس ثابت به deramping مشهور است.
  - فرکانس ثابت سیگنال تولید شده پس از deramping متناسب با موقعیت آن هدف است، لذا پس از یک FFT می توان به یک سینک با قله ای متناسب با مکان سمت هدف دست یافت.

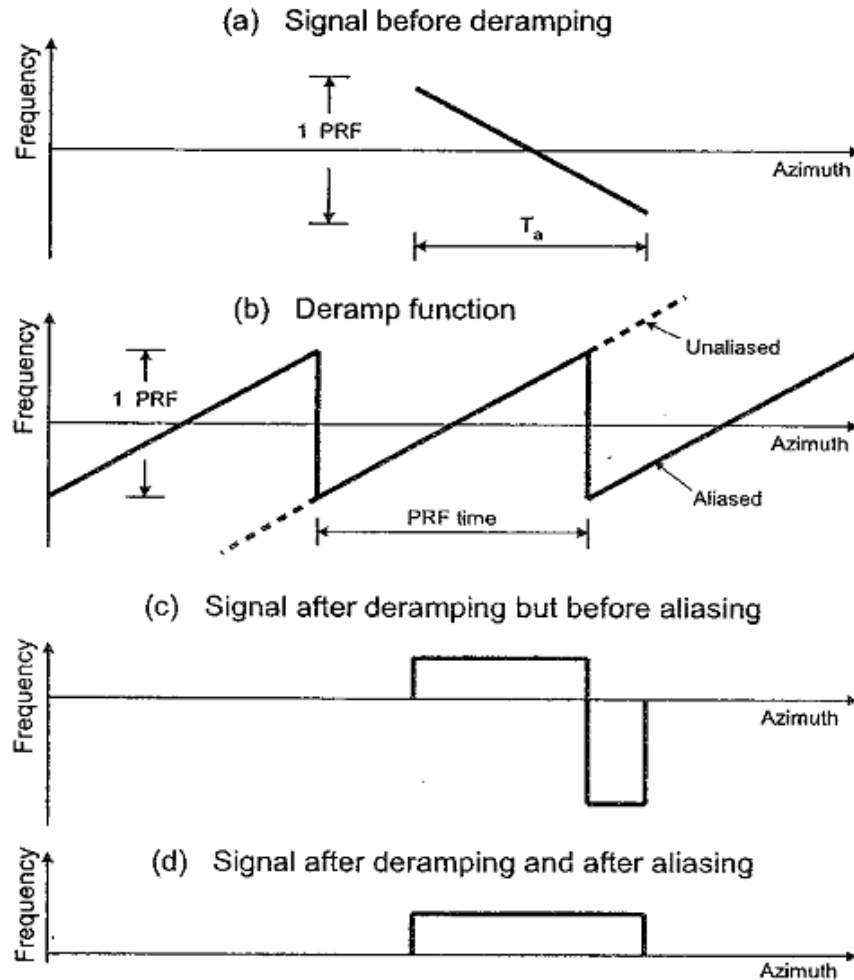


Figure 9.2: Frequency versus time characteristics of one target, before and after deramping.

The phase multiplier has the following properties.

- Its time extent overlaps that of the signal.
- Its duration is longer than one PRF time, so it is aliased in frequency by the sampling effect of the PRF. The dashed lines show the frequency before aliasing, and the solid lines show the frequency after aliasing.
- Its FM rate or slope is equal in magnitude but opposite in sign to that of the signal.
- It does not necessarily have the same time origin or time of zero frequency as the signal—its time origin can be arbitrary.

# روند الگوریتم

9

□ سیگنال مرجع (ramp):

$$h_{dr}(\eta') = \exp\{+j\pi K_a (\eta')^2\}$$

□ سیگنال حوزه سمت:

$$s_r(\eta') = \exp\{-j\pi K_a (\eta' - \eta'_d)^2\}$$

□ سیگنال پس از deramping:

$$s_{dr}(\eta') = \exp\{-j\pi K_a (\eta'_d)^2\} \exp\{+j2\pi K_a \eta'_d \eta'\}$$

□ این سیگنال شامل یک فاز ثابت و یک فرکانس ثابت است که پس از FFT در جای خود متمرکز خواهد شد.

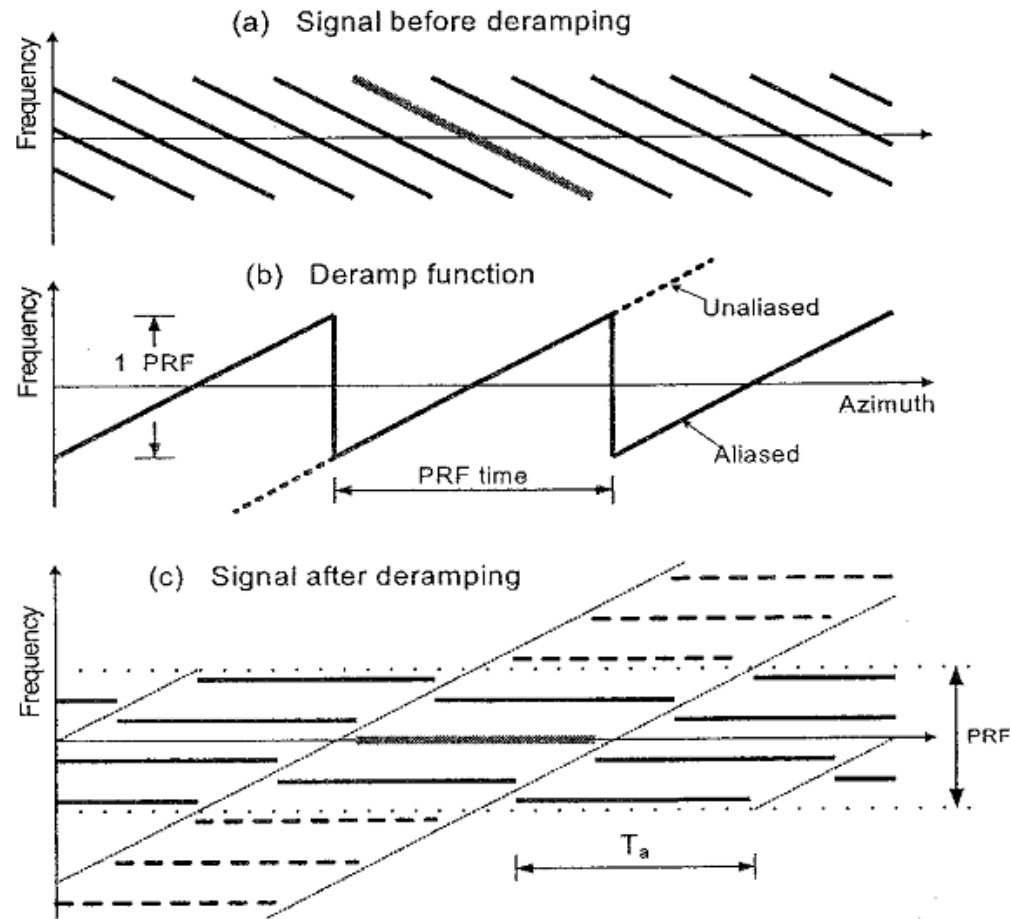


Figure 9.3: Frequency versus time characteristics of multiple targets, before and after deramping.

- چند سوال در مورد اعمال FFT:

  - FFT اول کجا باید اعمال شود؟
  - طول FFT چقدر باید باشد؟
  - از هر FFT کدام نقاط انتخاب شوند؟
  - FFT بعدی کجا اعمال شود؟

- جواب این سوالات نحوه و ویژگی های الگوریتم SPECAN را مشخص می کند.
- آنچه پاسخ این سوالات را تعیین می کند، خواسته های طراح است، از جمله:
  - حد تفکیک سمت مورد نظر
  - جلوگیری از aliasing
  - کارایی محاسباتی
  - تعداد نما در پردازش چند نما و ...

# حد تفکیک در سمت

- تعداد کل نمونه های سمت (پالس ها) در طول روزنه مصنوعی برابر با  $F_a.T_a$  است که  $F_a$  فرکانس تکرار پالس و  $T_a$  طول زمانی روزنه مصنوعی (زمان جاروب یک هدف نقطه ای) است.
- حداکثر عدد  $N_{fft}$  برابر با  $F_a T_a$  است، اما در عمل  $N_{fft}$  کمتر از  $0.7$  عدد فوق لحاظ می شود. (به خاطر حفظ کارایی محاسبات). حد پایین FFT بر اساس حد تفکیک مورد نظر تعیین می شود.
- با انتخاب  $N_{fft}$ ، زمان معادل آن برابر با  $N_{fft}/F_a$  است، لذا پهنای باند سیگنال در آن محدوده برابر با  $K_a.N_{fft}/F_a$  خواهد بود. بنابراین حد تفکیک در سمت بر حسب زمان برابر است با:

$$\rho_{a,t} = \left( \frac{0.886 F_a \gamma_{w,a}}{N_{fft} K_a} \right)$$

- و بر حسب متر:

$$\rho_a = \left( \frac{0.886 F_a \gamma_{w,a}}{N_{fft} K_a} \right) (V_g \cos \theta_{r,c})$$

- یک قانون در مورد انتخاب طول و مکان FFT: بیش از یک هدف نباید در خروجی یک FFT در یک سلول (فرکانس) قرار گیرند. (به عنوان مثال در شکل زیر اهداف A و B پس از FFT در یک سلول خواهند بود.)
- اگر طول FFT بیش از  $\text{PRF time} = F_a / K_a$  باشد، تقریباً همه اهداف با دیگری مخلوط می شوند.

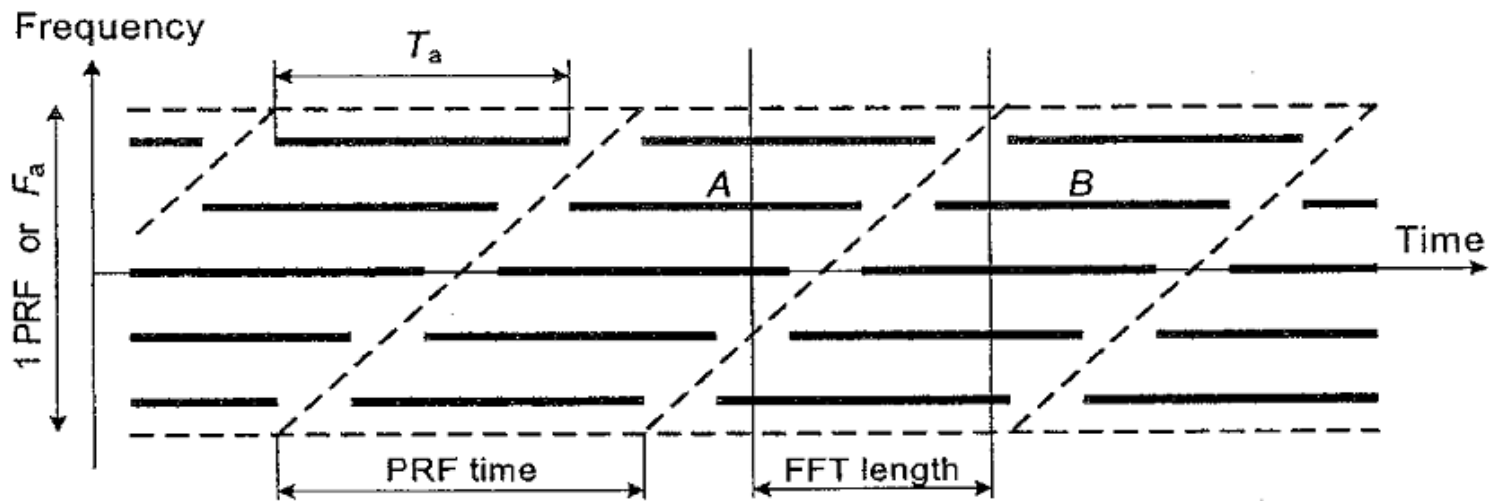


Figure 9.4: Frequency versus time characteristics of a group of evenly spaced targets.

## فاصله بین نمونه ها

$$\Delta y = \left( \frac{F_a}{N_{\text{fft}} K_a} \right) \quad \square \text{ فاصله زمانی نمونه های خروجی FFT:}$$

- کل محدوده فرکانسی  $F_a$  است که بر  $N_{\text{fft}}$  تقسیم شده و فاصله فرکانسی را به دست می دهد. با تقسیم آن بر  $K_a$ ، فاصله زمانی به دست می آید.
- نسبت حد تفکیک به فاصله بین نمونه های خروجی باید بزرگتر از یک باشد:

$$\frac{\rho_{a,t}}{\Delta y} = 0.886 \gamma_{w,a}$$

- فاصله زمانی بین نمونه های خروجی به  $K_a$  وابسته است و خود  $K_a$  به برد وابسته است. این موضوع باعث نوعی اعوجاج در تصویر خروجی می شود که اگر به جای FFT از CZT استفاده کنیم، برطرف می شود.

# نقاط معتبر در هر FFT

- تعداد نقاط معتبر در خروجی FFT را  $N_{\text{good}}$  می نامیم.
- مکان اولین FFT دلخواه است و معمولاً شروع آن در نقطه ابتدای داده است.
- با انتخاب  $N_{\text{fft}}$ ، تعدادی از اهداف به طور کامل در FFT قرار می گیرند و تعدادی به طور ناقص. آنهایی که به طور ناقص در FFT شرکت می کنند باید پس از FFT کنار گذاشته شوند.
- پس از انجام محاسبات (کتاب) خواهیم داشت:

$$N_{\text{good}} = N_{\text{fft}} \left( T_a - \frac{N_{\text{fft}}}{F_a} \right) \frac{K_a}{F_a}$$



## نقاط معتبر در هر FFT

17

The PRF is 1700 Hz and the FM rate is 2095 Hz/s. The exposure time is 1088 samples.

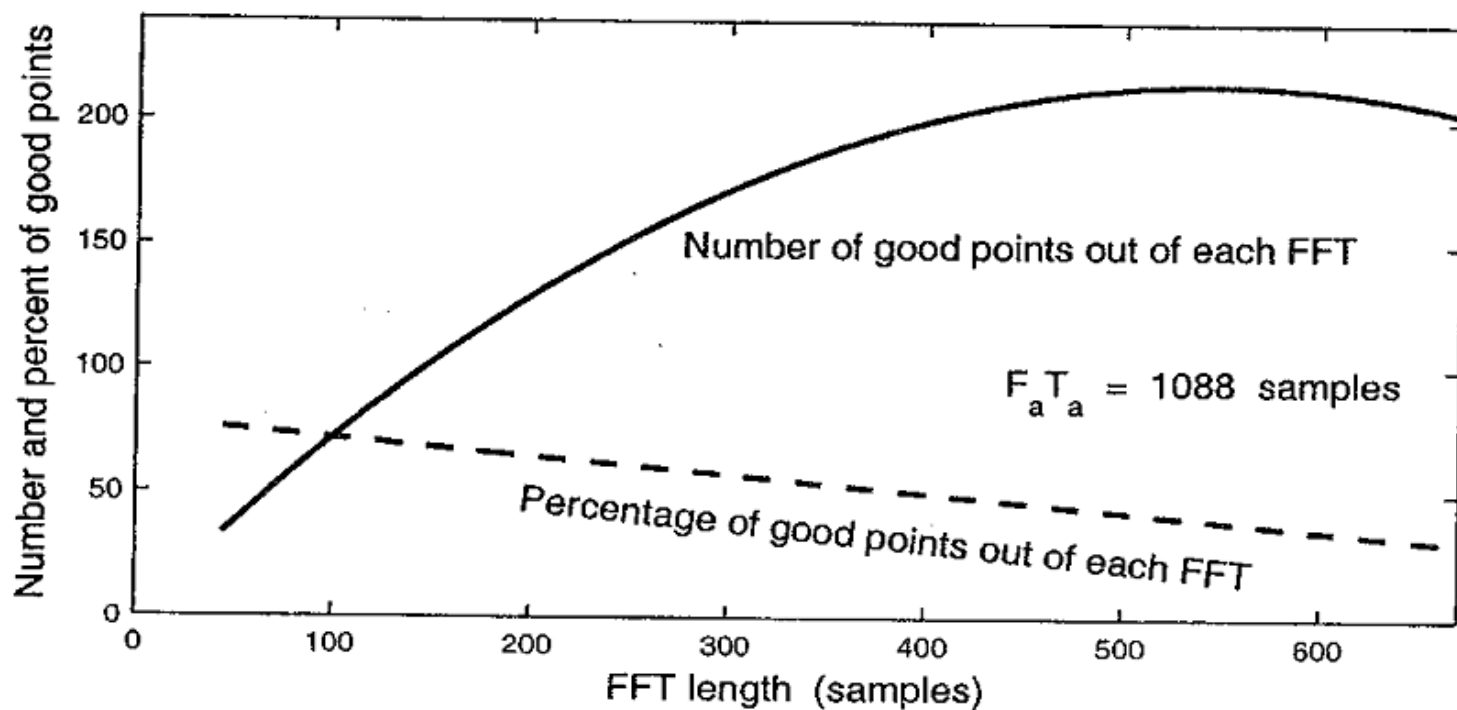


Figure 9.6: The number of good points in the FFT output versus the FFT length.

# فاصله تا FFT بعدی

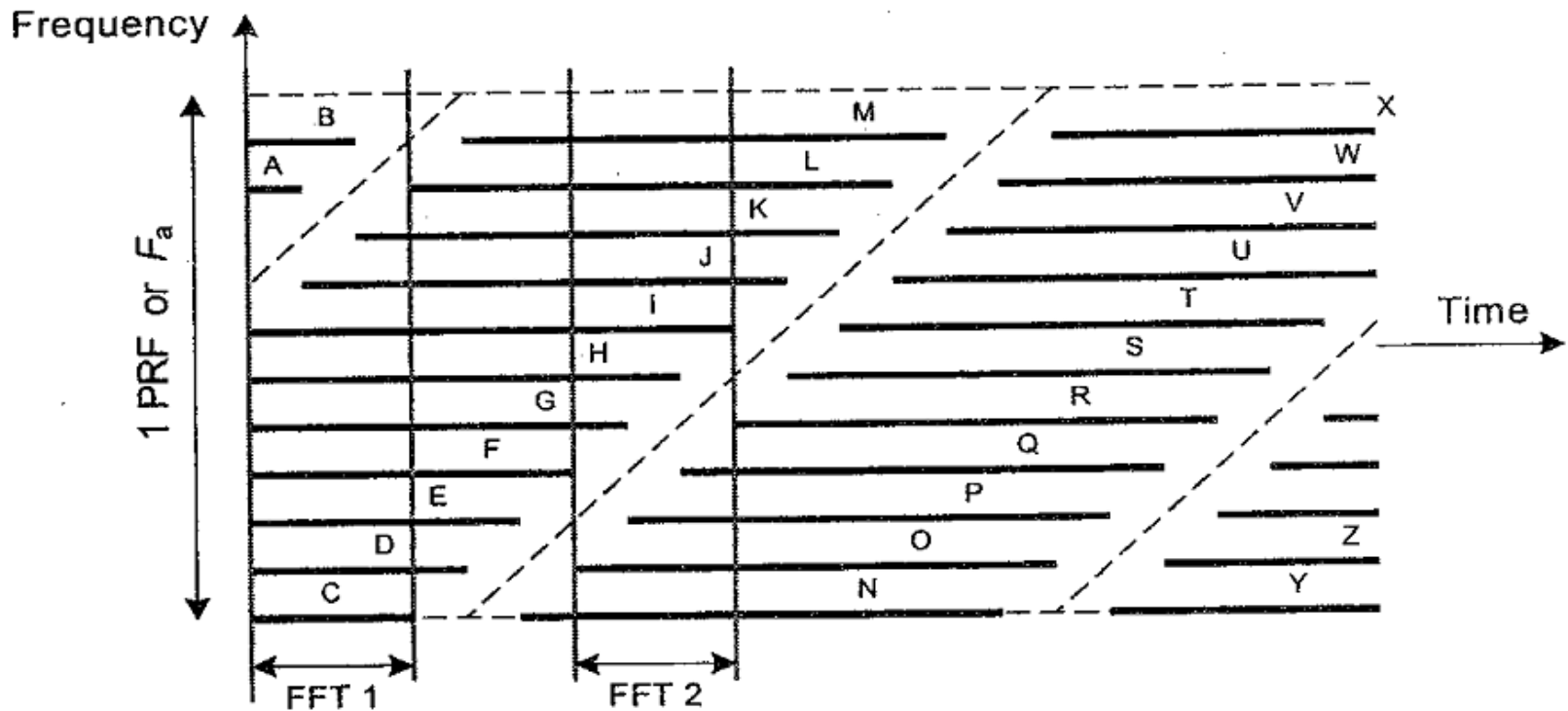


Figure 9.7: Frequency versus time characteristics of multiple targets, illustrating the location of the second FFT.

# فاصله تا FFT بعدی

□ فاصله تا FFT بعدی (ابتدا تا ابتدا):

$$N_{\text{FFT\_delay}} = N_{\text{good}} \frac{F_a^2}{N_{\text{fft}} K_a}$$

□ اگر  $N_{\text{good}}$  از روابط قبل جایگزین شود:  $N_{\text{FFT\_delay}} = T_a F_a - N_{\text{fft}}$

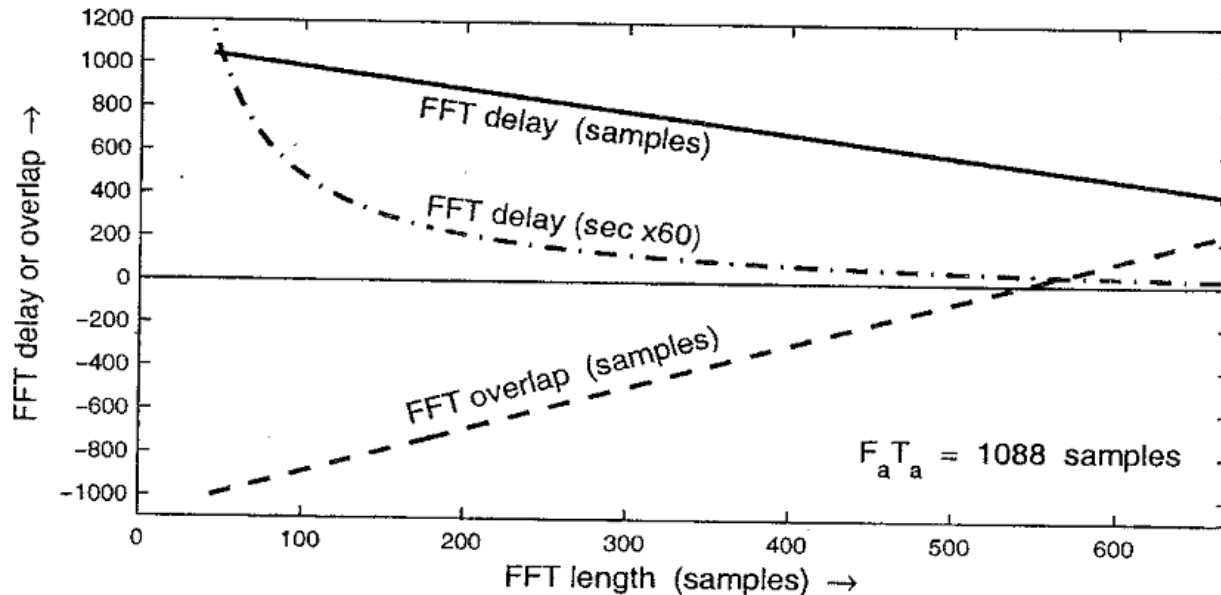


Figure 9.8: The delay between adjacent FFTs versus the FFT length (single-look case).

# فاصله تا FFT بعدی

- هر چه طول FFT بیشتر شود، تصویر بازه کوچکتری از صحنه در هر FFT تشکیل می شود و کارایی پردازش کمتر می شود.
- شکاف بین FFT ها یا همپوشانی آنها: اگر طول FFT از نصف  $Ta.Fa$  بزرگتر باشد، FFT های مجاور همپوشانی خواهند داشت، در غیر این صورت بین آنها فاصله خواهد بود.
- پس از اعمال FFT ها، خروجی آنها باید به هم بخیه شود. (stitching)
- اگر پردازش چند نما مد نظر نباشد، معمولا هدف آخر FFT قبل با هدف اول FFT بعد انطباق داده می شود.
- اگر پردازش چند نما مد نظر باشد، هر هدف در چندین FFT متوالی ظاهر (به تعداد نمای مورد نظر) ظاهر خواهد شد.

# اتصال (بخیه زنی) خروجی FFT ها

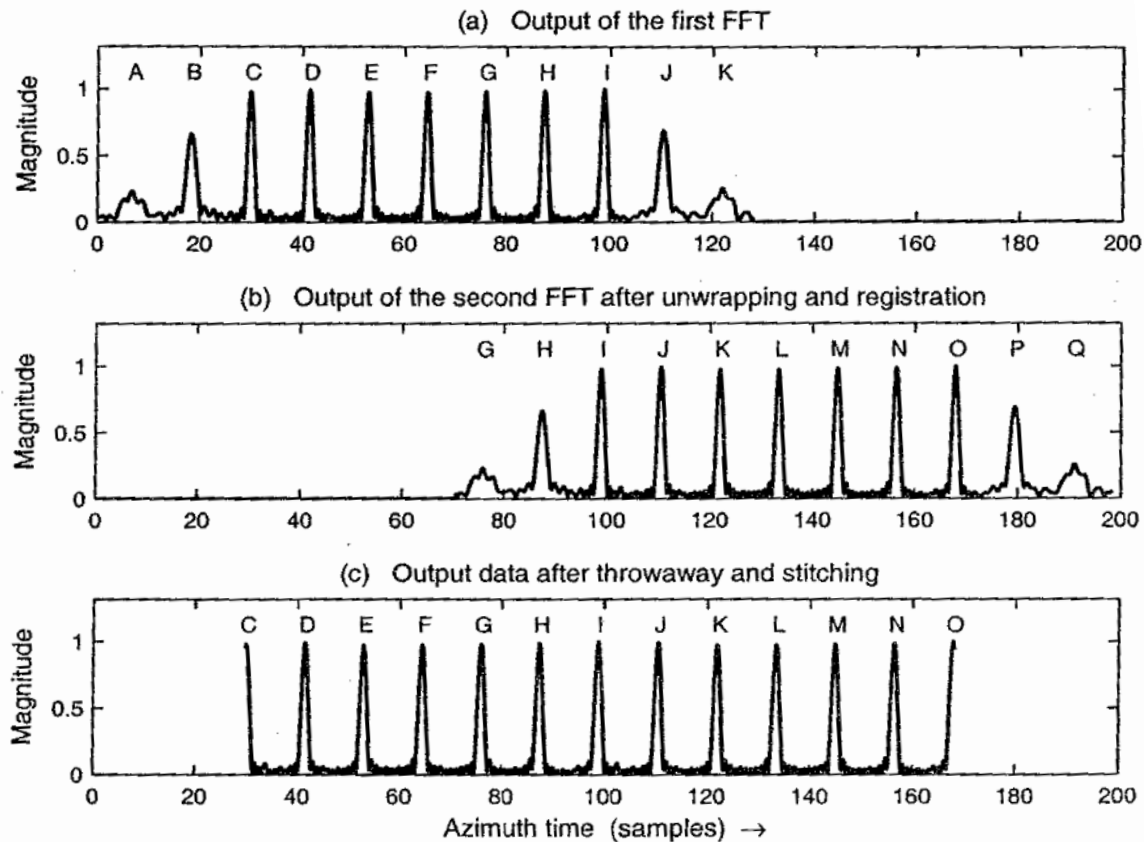


Figure 9.9: Stitching together of two FFT outputs to form an output array that is continuous in azimuth.

# پردازش چند نما (Multilook Processing)

- مشاهده شد که در موارد بسیاری فاصله ای بین FFT های متوالی وجود دارد. در این فاصله داده بدون استفاده قرار دارد.
- می توان از این داده برای پردازش چند نما استفاده کرد، یعنی تصویر یک هدف را در چند «نما»ی متفاوت (به وسیله بخش های مختلف طیف داپلر) تشکیل داد و برای کاهش نویز لکه ای (speckle noise) با هم جمع کرد. این کار باعث یکنواختی بیشتر تصویر و بهبود حد تفکیک رادیومتریک خواهد شد.
- با استفاده از این قابلیت پردازش چند نما (که اغلب برای داشتن یک تصویر با کیفیت مناسب لازم است) به طور ذاتی به الگوریتم SPECAN اضافه می شود.

# پردازش چند نما (Multilook Processing)

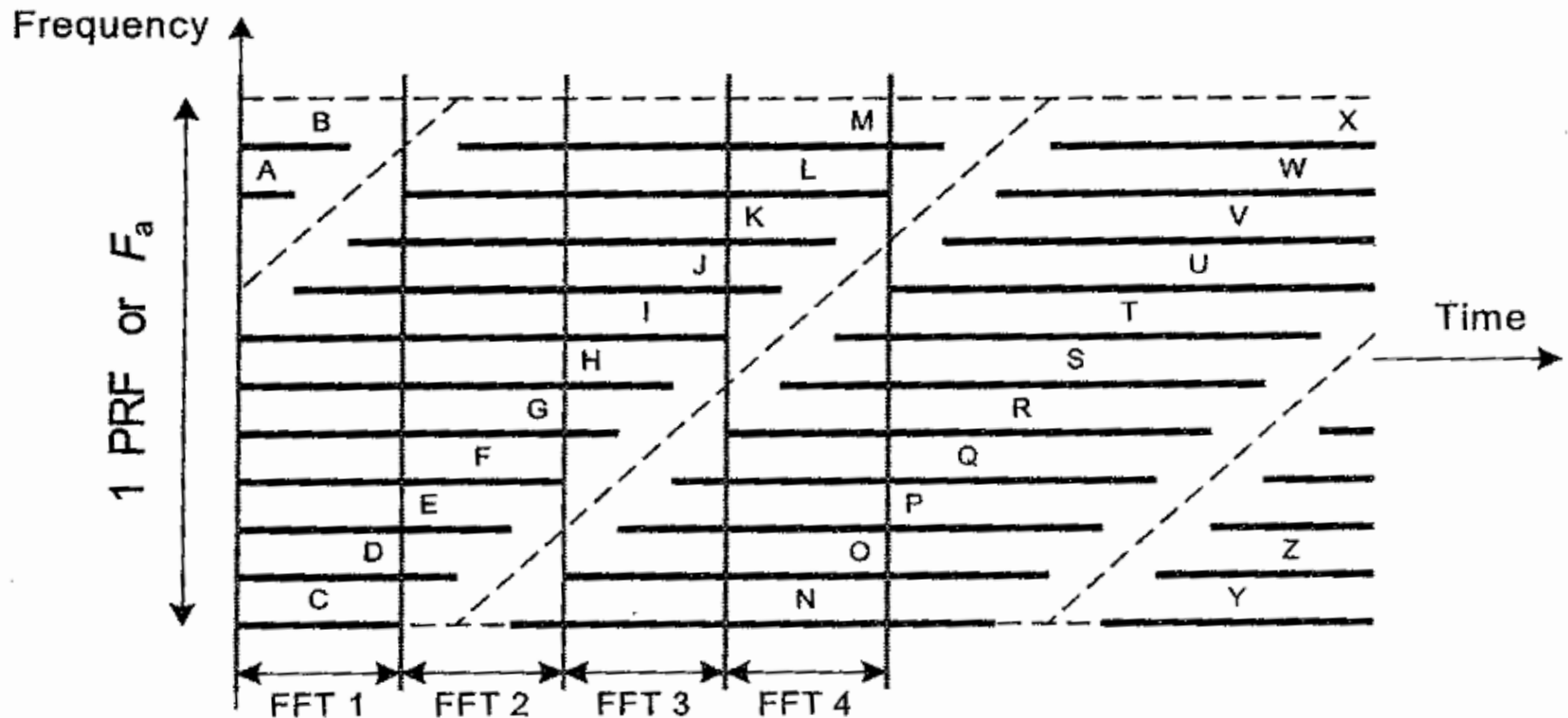


Figure 9.10: Frequency versus time characteristics of multiple targets, illustrating how additional FFTs can be placed between existing FFTs.

## پردازش چند نما (Multilook Processing)

Table 9.1: Number of Times Each Target Is Fully Processed by an FFT

<i>Target</i>	<i>Number of Looks</i>	<i>Target</i>	<i>Number of Looks</i>	<i>Target</i>	<i>Number of Looks</i>
A	0	F	2	K	2
B	0	G	2	L	2
C	1	H	2	M	2
D	1	I	3	N	2
E	1	J	2	O	2

# پردازش چند نما (Multilook Processing)

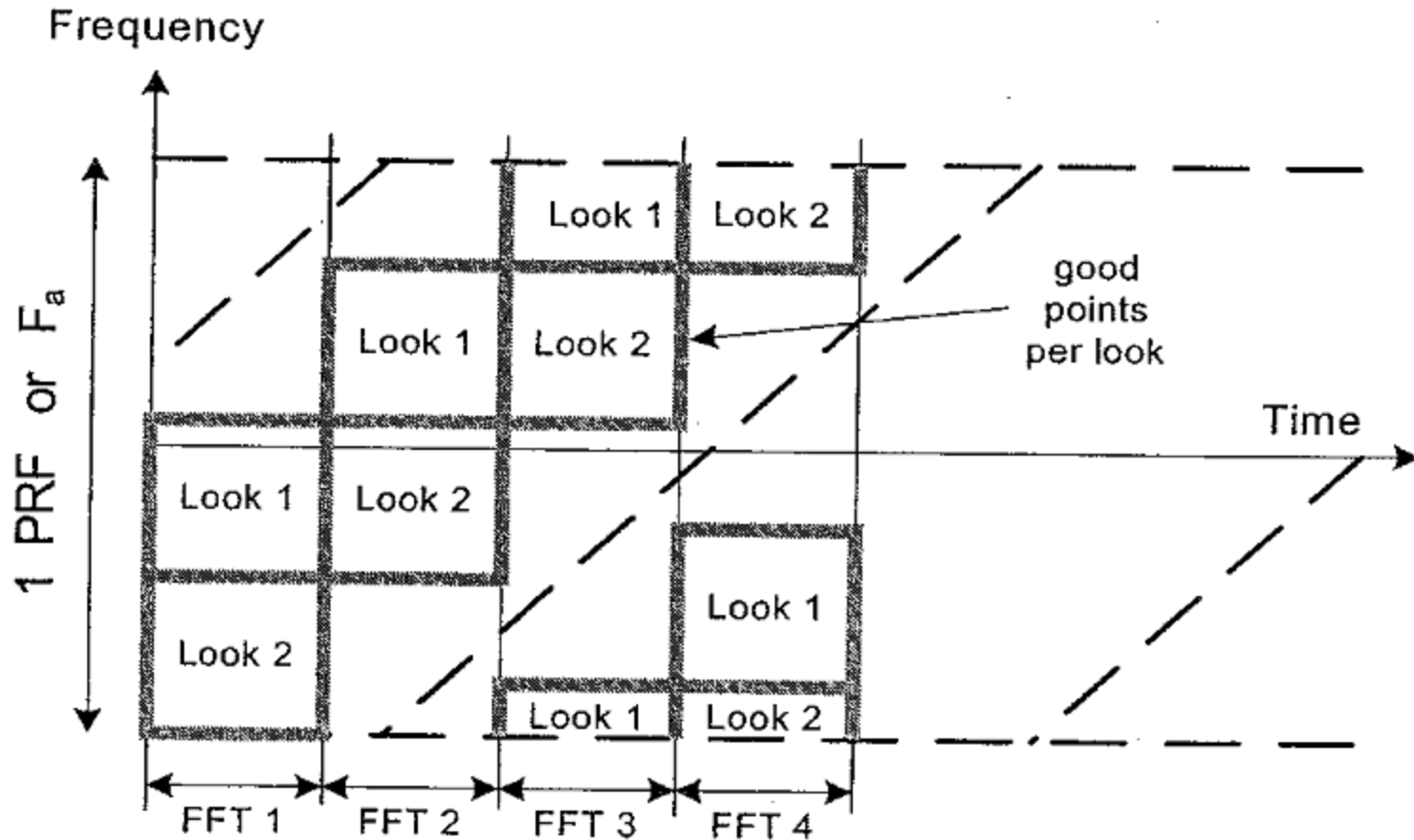


Figure 9.11: Division of the good points in the FFT outputs into looks.

## پردازش چند نما (Multilook Processing)

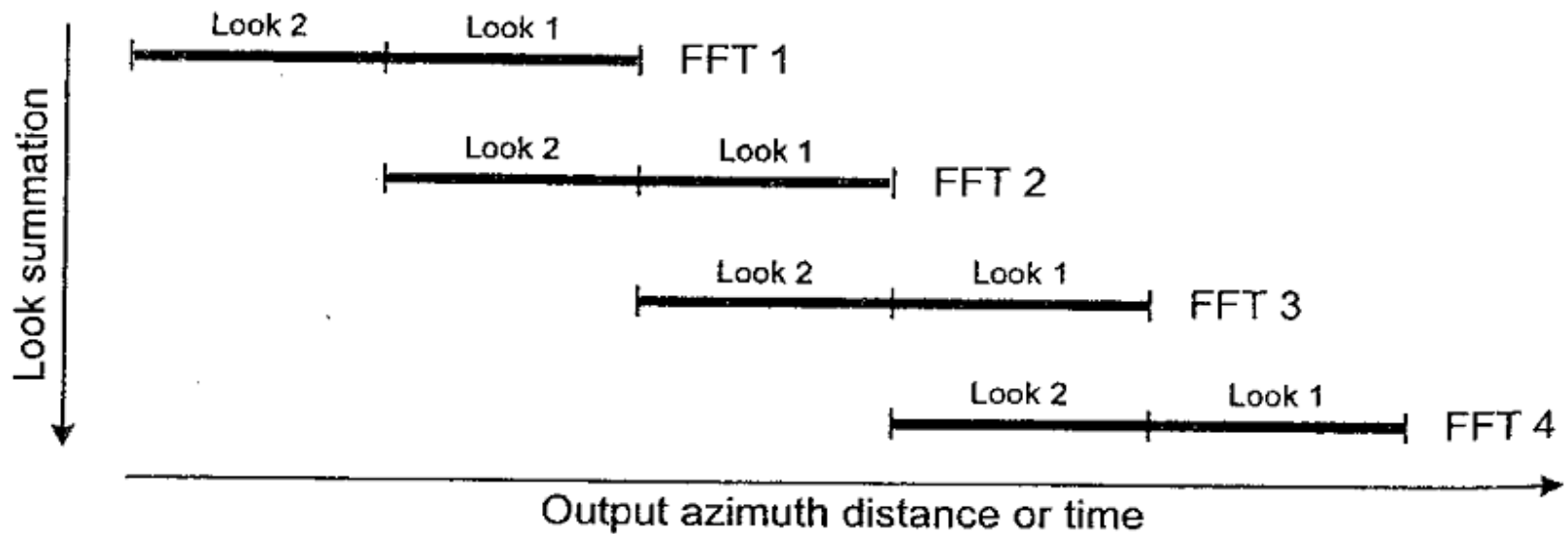


Figure 9.12: Division of the good FFT output points into looks, and alignment of the looks before summation, to form a contiguous multilook image.

# پردازش چند نما (Multilook Processing)

□ تاخیر بین FFT ها در پردازش چند نما:

$$N_{\text{FFT\_delay}} = \frac{N_{\text{good}}}{N_{\text{looks}}} \frac{F_a^2}{N_{\text{fft}} K_a} = (T_a F_a - N_{\text{fft}}) / N_{\text{looks}}$$

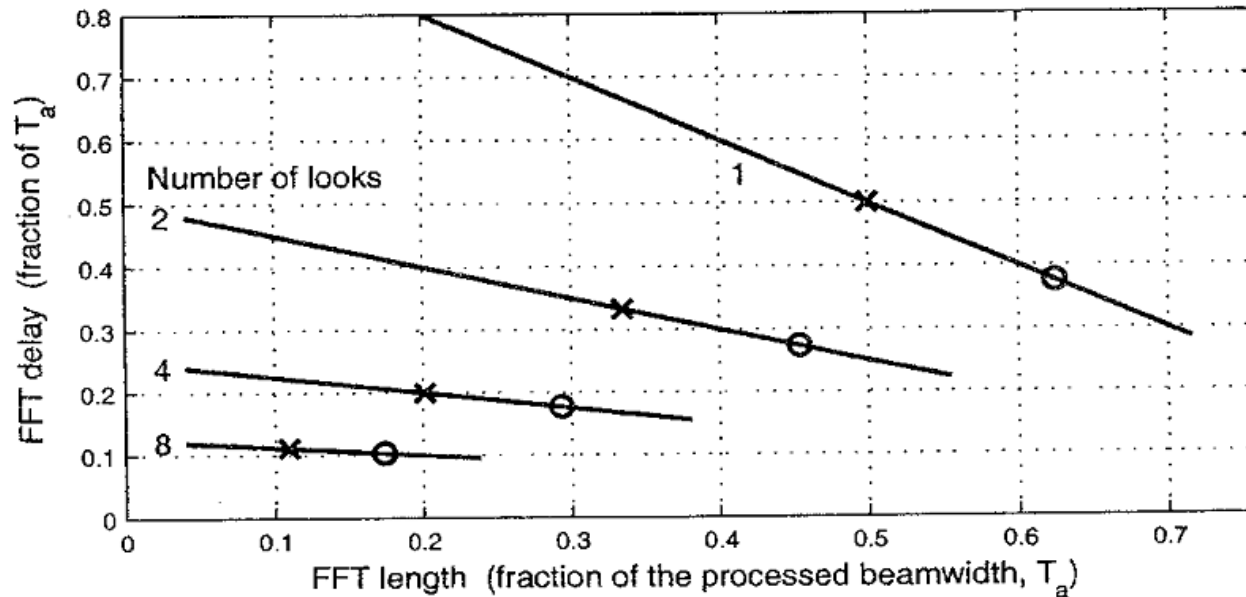


Figure 9.13: FFT delay as a fraction of the processed aperture. The crosses “x” indicate the FFT length that leads to contiguous FFTs, while the circles “o” indicate the FFT length when the overlap is 40%.

# پردازش چند نما (Multilook Processing)

همپوشانی بین نماها □

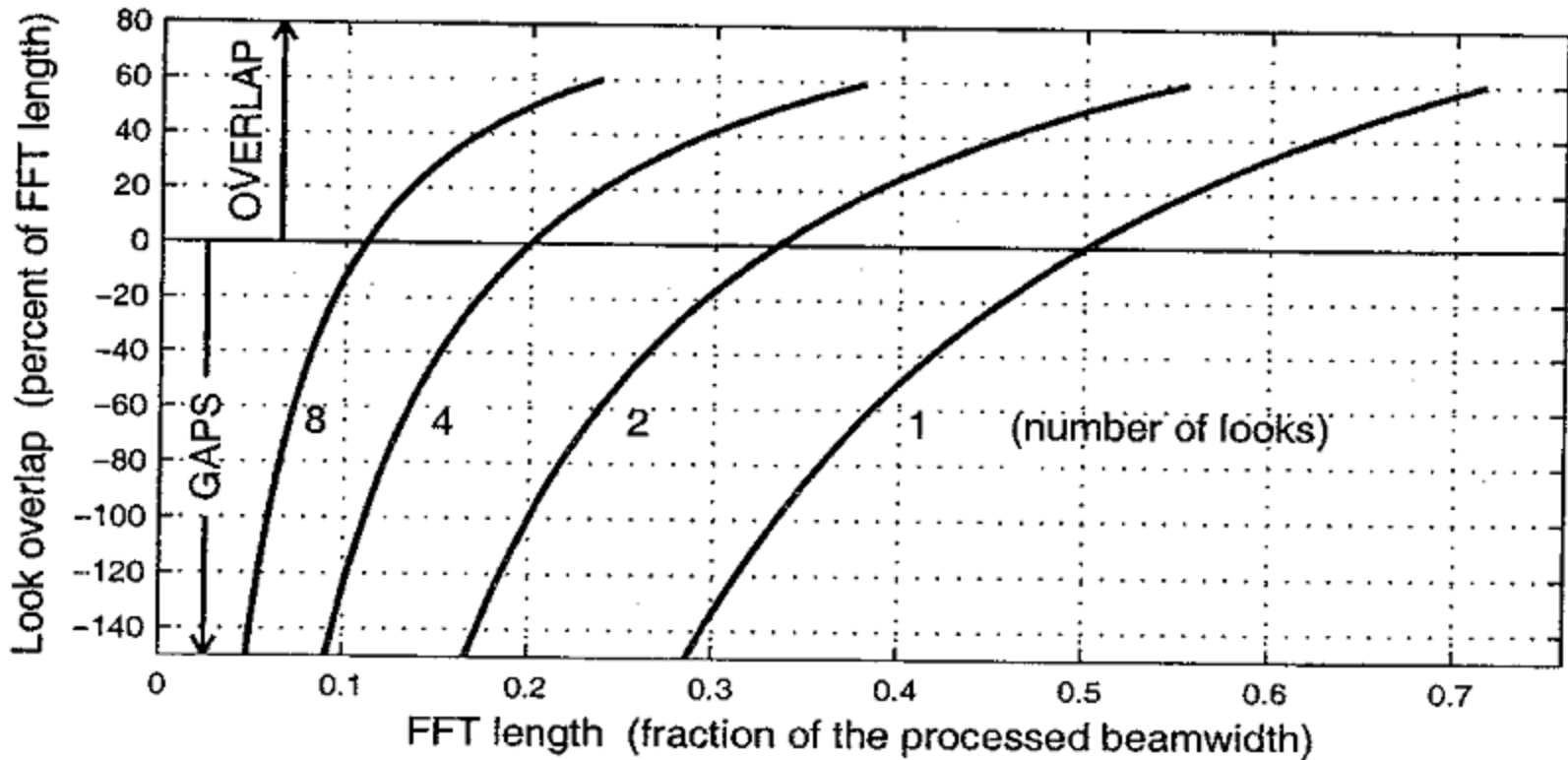


Figure 9.14: The overlap between looks in the multilook case.

□ پارامتر مهم در کارایی محاسباتی، نسبت  $N_{\text{good}}$  به  $N_{\text{fft}}$  است:

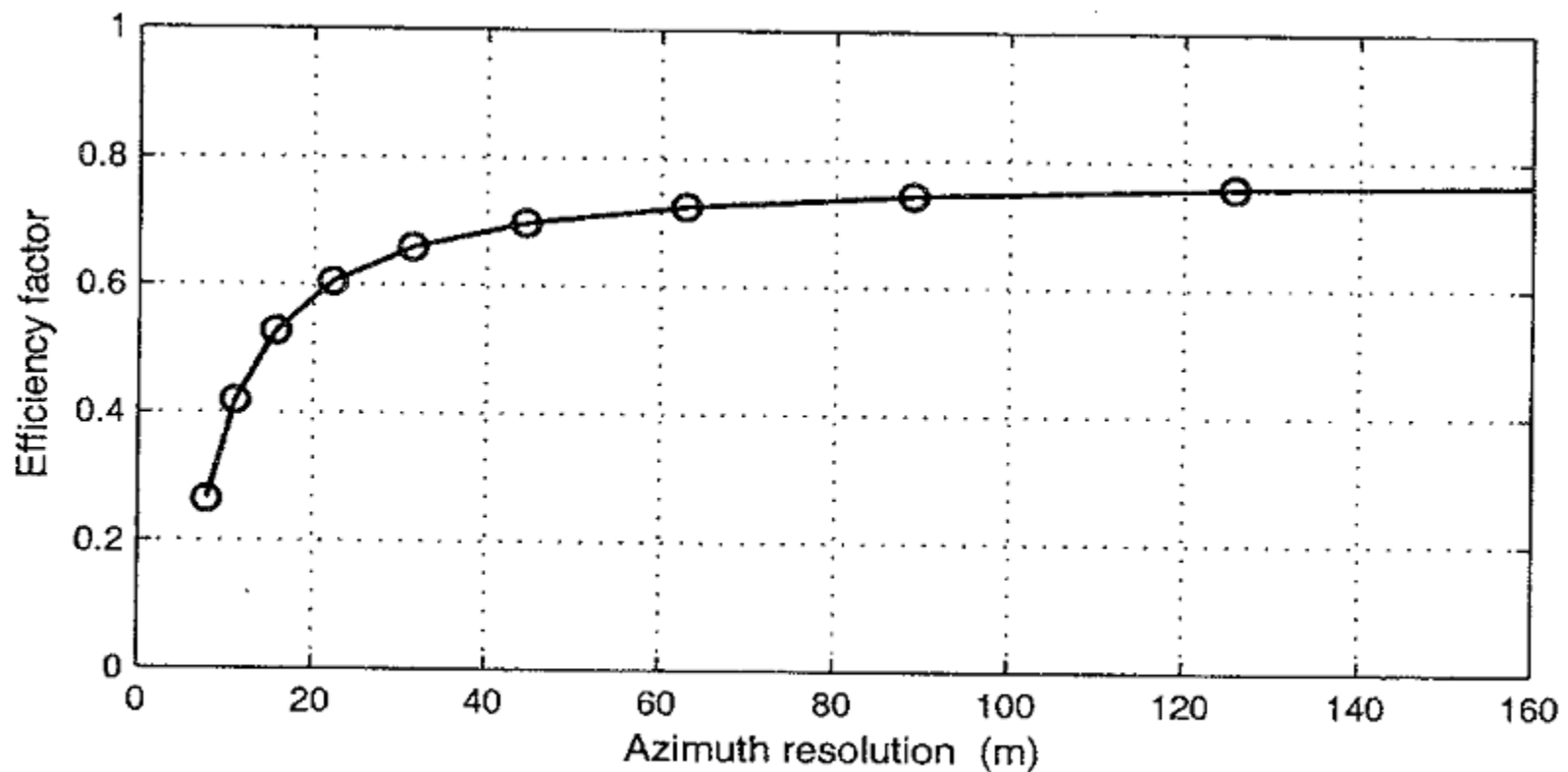
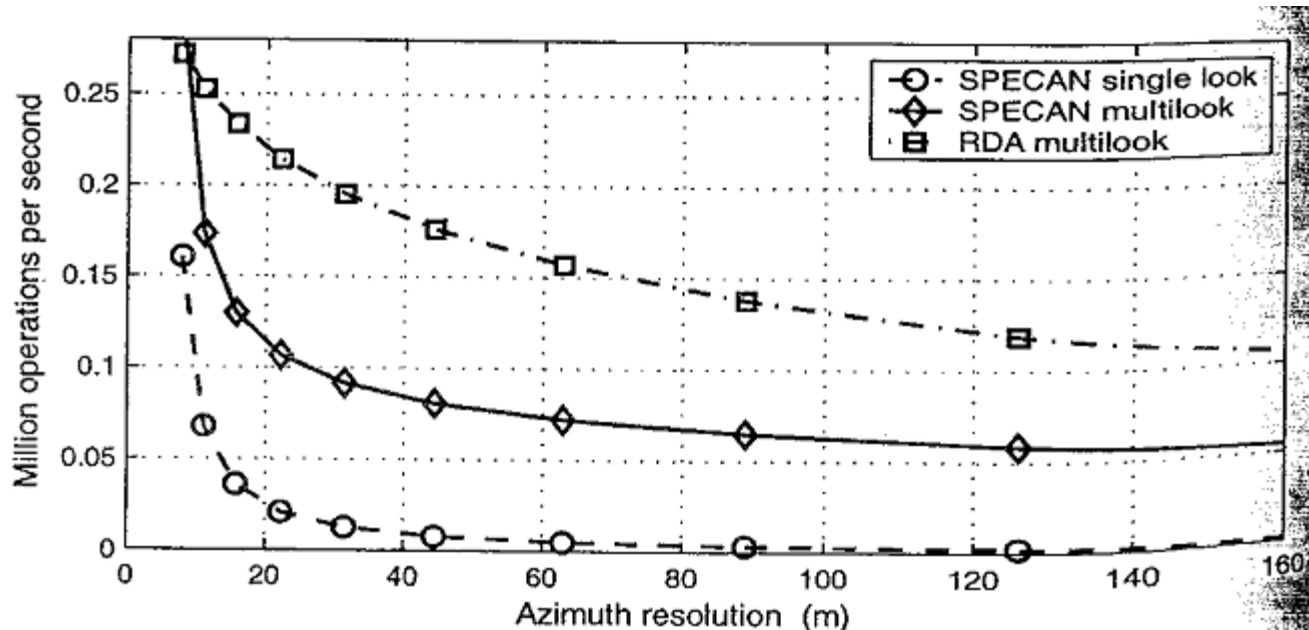


Figure 9.15: Relative efficiency of the SPECAN algorithm,  $N_{\text{good}}/N_{\text{fft}}$ .

□ محاسبه تعداد FFT ها در ثانیه: 
$$N_{\text{FFTs/s}} = \frac{F_a}{N_{\text{FFT\_delay}}}$$

$$N_{\text{FFT/s}} = N_{\text{looks}} \frac{N_{\text{fft}} K_a}{N_{\text{good}} F_a}$$

□ محاسبه تعداد عملیات در ثانیه: 
$$N_{\text{Ops}} = 5 N_{\text{fft}} \log_2(N_{\text{fft}}) N_{\text{FFTs/s}}$$



□ روند انتخاب پارامترها:

□ ۱- انتخاب  $N_{fft}$  با توجه به شرط  $N_{fft} < 0.7 F_a T_a$  و ملاحظه حد تفکیک مورد نظر و کارایی محاسباتی

□ ۲- محاسبه  $N_{good}$

□ ۳- انتخاب تعداد نما (هر چه تعداد نما بالاتر برود، کیفیت تصویر بهتر شده و حجم محاسبات بالاتر می رود. تجربه نشان می دهد تعداد نما را باید آنقدر بالا برد که همپوشانی نماها به حدود ۲۰ درصد برسد.)

□ ۴- محاسبه تاخیر بین FFT ها

□ مثال:

□ ۱- با توجه به شکل 9.6 و رابطه حد تفکیک در سمت، می توانیم تعداد

$$\rho_a = \left( \frac{0.886 F_a \gamma_{w,a}}{N_{fft} K_a} \right) (V_g \cos \theta_{r,c})$$

FFT را برابر با ۲۵۶ انتخاب کنیم.

- ۲- با توجه به شکل 9.6 یا رابطه زیر تعداد  $N_{\text{good}}$  به دست می آید. طبق این رابطه عدد 154.4 محاسبه می شود.

$$N_{\text{good}} = N_{\text{fft}} \left( T_a - \frac{N_{\text{fft}}}{F_a} \right) \frac{K_a}{F_a}$$

- ۳- تعداد نمای مورد نظر را ۴ انتخاب می کنیم. با این حساب طبق شکل 9.14 مقدار همپوشانی بین نماها حدود ۲۰ درصد است. چون می خواهیم چهار نما داشته باشیم،  $N_{\text{good}}$  را ۱۵۲ فرض می کنیم که بر ۴ بخش پذیر باشد. (با این حساب ممکن است تعداد معدودی از اهداف ۳ نما داشته باشند).

- ۴- تاخیر بین FFT ها برابر با ۲۰۸ نمونه به دست می آید. یعنی FFT ها به نسبت 48/256 همپوشانی دارند.

$$N_{\text{FFT\_delay}} = (T_a F_a - N_{\text{fft}}) / N_{\text{looks}}$$

- ۵- تعداد FFT در ثانیه برابر با  $1700/208=8.17$  محاسبه می شود.
- تعداد عملیات حقیقی در ثانیه (Nops) برابر با ۸۳۹۶۲ عملیات در ثانیه به دست می آید.

- چون الگوریتم SPECAN برای حد تفکیک متوسط و سرعت بالا طراحی شده، نیازی به RCMC دقیق که حجم محاسباتی بالایی دارد نداریم و تنها RCMC تقریبی کافی است.
- این RCMC تقریبی شامل حذف مولفه خطی RCM (ناشی از زاویه لوچی) است و مولفه غیر خطی آن باقی می ماند.

For a target with zero Doppler time  $\eta'_d$ , the linear RCM (5.58) is modeled as

$$R(\eta') = -V_r \sin \theta_{r,c} (\eta' - \eta'_d - \eta_c)$$

Since  $V_r$  and  $\theta_{r,c}$  are range dependent, the RCMC is range variant, but it can be performed approximately in a range-invariant fashion, using a constant shift for a group of range cells. The linear RCMC can either be implemented by a time domain interpolation or by a linear phase shift in the range frequency domain, assuming that the shift is constant within a range invariance region.