# مباحث ویژه
# (پردازش سیگنال های راداری)

خودمیزانی

نیم سال دوم ۰۵-۰۴

# مقدمه



- همانطور که قبلا گفته شد پس از جبران سازی حرکت (جبران سازی جابجایی سلول های برد، جبران سازی سرعت و جبران سازی فاز)، همچنان مقداری خطا در داده وجود دارد که باعث اشکالاتی در تصویر (محو شدگی، جابجایی، تکرار، افزایش گلبرگ کناری) خواهد شد.
- تخمین و جبران خطای فاز باقی مانده (ناشی از حرکت نامطلوب سکو، تقریب های الگوریتم، خطاهای سخت افزار، خطاهای ناشی از انتشار موج و ...) وظیفه الگوریتم های خودمیزانی است.
- این الگوریتم ها خطای فاز را صرف نظر از منشا آن تخمین زده و جبران می کنند.
- معمولا در الگوریتم های خودمیزانی خطای فاز را مستقل از برد فرض می کنند.

# انواع الگوریتم های خودمیزانی



- الگوریتم های خودمیزانی معمولا برای داده شیوه نورافکنی استخراج می شوند.
- در داده شیوه نورافکنی فرض بر این است که همه اهداف خطای فاز یکسانی را تجربه می کنند. (این فرض در داده شیوه نواری صادق نیست.)
- نوع خطای فازی که تخمین زده می شود می تواند به صورت پارامتری یا غیر پارامتری باشد.
  - در نوع پارامتری، خطای فاز به صورت یک چندجمله ای با درجه مشخص فرض می شود و ضرایب چندجمله های تخمین زده می شود.
  - در نوع غیر پارامتری، کل تابع خطای فاز تخمین زده می شود.
- خطای فاز از سیگنال حوزه سمت استخراج شده و معمولا در مرحله ای از پردازش استخراج می شود که پس از آن با یک تبدیل فوریه به تصویر نهایی می رسیم.

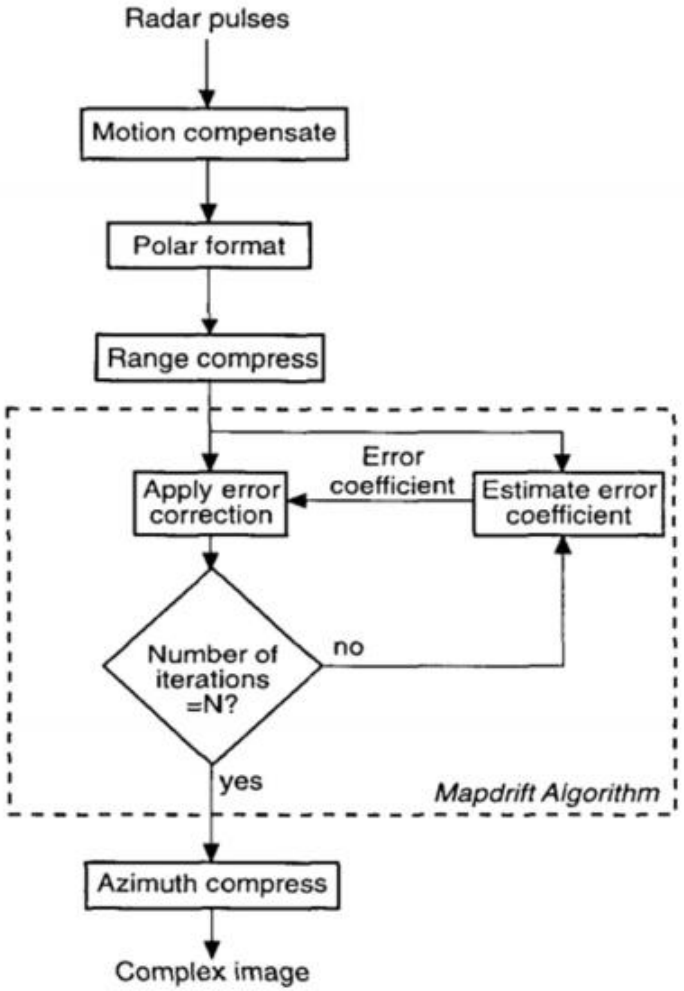
# الگوریتم جابجایی صحنه (Map Drift)



- الگوریتم MD اساسا برای داده شیوه نورافکنی و برای تخمین خطای فاز مربعی (درجه ۲) ابداع شده است.
- اساس این الگوریتم تقسیم تصویر به دو زیردهانه و محاسبه جابجایی (شیفت) دو تصویر زیردهانه است.
- این الگوریتم مبتنی بر تکرار است و در هر تکرار مقداری از خطا تخمین زده شده و اصلاح می گردد.
- خطاهای فاز غیر درجه ۲ به وسیله این الگوریتم قابل استخراج نیستند، ولی از آنجا که در بسیاری از موارد، خطای فاز عمدتا درجه ۲ است، این الگوریتم کارایی مناسبی در متمرکز شدن تصویر دارد.
- می توان این الگوریتم را برای تخمین خطای فاز درجات بالاتر یا برای تخمین خطای فاز در شیوه نواری تعمیم داد.

# الگوریتم جابجایی صحنه (Map Drift)





# الگوریتم جابجایی صحنه (Map Drift)



- برای تخمین خطای فاز، کل روزنه مصنوعی به دو زیردهانه تقسیم شده و تصویر هر زیردهانه به صورت جداگانه تشکیل می شود. با محاسبه میزان شیفت بین تصویر دو زیردهانه، میزان درجه خطای فاز درجه ۲ را تخمین زد.
- محاسبه شیفت از طریق محاسبه همبستگی و پیدا کردن نقطه قله همبستگی صورت می گیرد.
- میزان شیفت بین تصویر دو زیردهانه به ضریب درجه ۲ خطای فاز بستگی دارد.
- سیگنال سمت در یک برد خاص دارای خطای فاز درجه ۲ (قبل از تبدیل فوریه نهایی) به صورت زیر فرض می شود:

$$g(t) = s(t)e^{jat^2}, \qquad -\frac{T_a}{2} \le t \le \frac{T_a}{2}$$

# الگوریتم جابجایی صحنه (Map Drift)



- سیگنال ناشی از دو زیردهانه به صورت زیر خواهد بود:

$$g_1(t) = g\left(t - \frac{T_a}{4}\right) = s\left(t - \frac{T_a}{4}\right) e^{j(at^2 - \frac{aT_a}{2}t + \frac{aT_a^2}{16})}, \qquad -\frac{T_a}{4} \le t \le \frac{T_a}{4}$$

$$g_2(t) = g\left(t + \frac{T_a}{4}\right) = s\left(t + \frac{T_a}{4}\right) e^{j(at^2 + \frac{aT_a}{2}t + \frac{aT_a^2}{16})}, \qquad -\frac{T_a}{4} \le t \le \frac{T_a}{4}$$

- بنابراین تصویر دو زیردهانه به صورت زیر است:

$$G_1(\omega) = \int_{-\frac{T_a}{4}}^{\frac{T_a}{4}} g_1(t) e^{-j\omega t} dt = \hat{S}_1\left(\omega + \frac{aT_a}{2}\right)$$

$$G_2(\omega) = \int_{-\frac{T_a}{4}}^{\frac{T_a}{4}} g_2(t) e^{-j\omega t} dt = \hat{S}_2\left(\omega - \frac{aT_a}{2}\right)$$

- که:

$$\hat{S}_1(\omega) = \int_{-\frac{T_a}{4}}^{\frac{T_a}{4}} s(t - \frac{T_a}{4}) e^{j(at^2 + \frac{aT_a^2}{16})} e^{-j\omega t} dt \qquad \hat{S}_2(\omega) = \int_{-\frac{T_a}{4}}^{\frac{T_a}{4}} s(t + \frac{T_a}{4}) e^{j(at^2 + \frac{aT_a^2}{16})} e^{-j\omega t} dt$$

# الگوریتم جابجایی صحنه (Map Drift)



- از آنجا که: $|\hat{S}_1(\omega)|^2 = |\hat{S}_2(\omega)|^2$
- بنابراین دو تصویر زیردهانه یک شیفت به اندازه زیر دارند: $\Delta\omega = aT_a$
- در نتیجه خواهیم داشت: $\hat{a} = \frac{\Delta\omega}{T_a}$

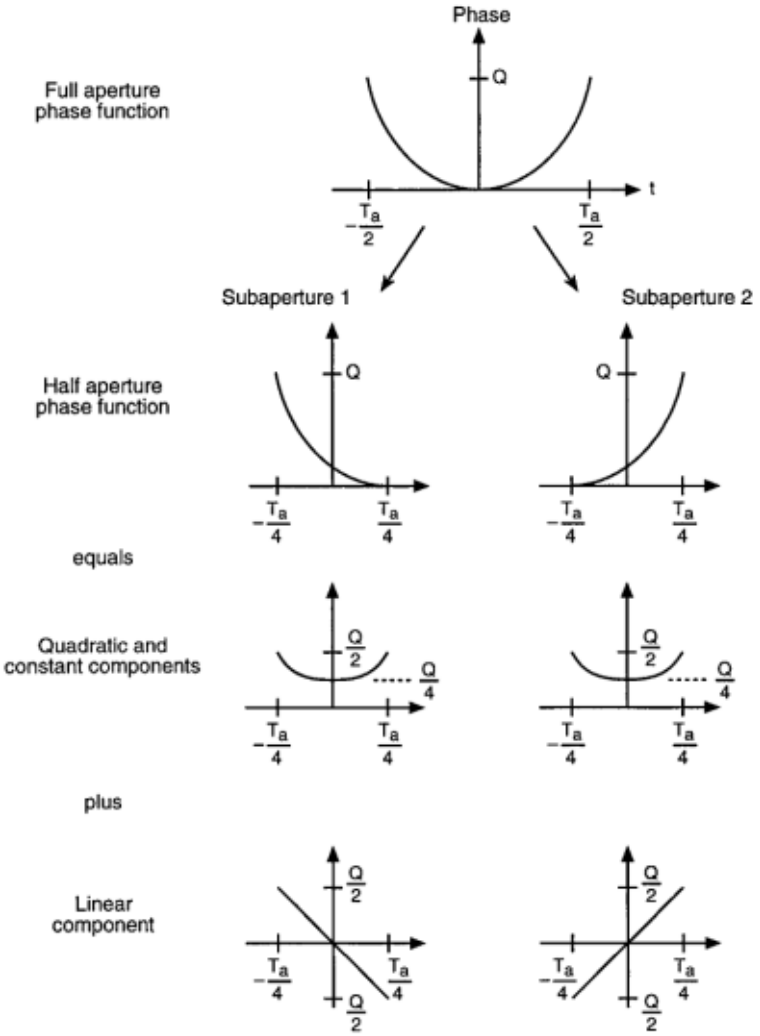
- پس از تخمین ضریب درجه ۲، با ضرب فاز جبرانی در سیگنال سمت اولیه، خطای فاز حذف می شود.

$$g_c(t) = g(t)e^{-j\hat{a}t^2} = s(t)e^{j(a-\hat{a})t^2}, \qquad -\frac{T_a}{2} \le t \le \frac{T_a}{2}$$

- برای بهبود نتایج می توان از نتیجه مربوط به بردهای مختلف متوسط گیری نمود. راه بهتر جمع توابع همبستگی در بردهای مختلف و سپس پیدا کردن مقدار بیشینه است.

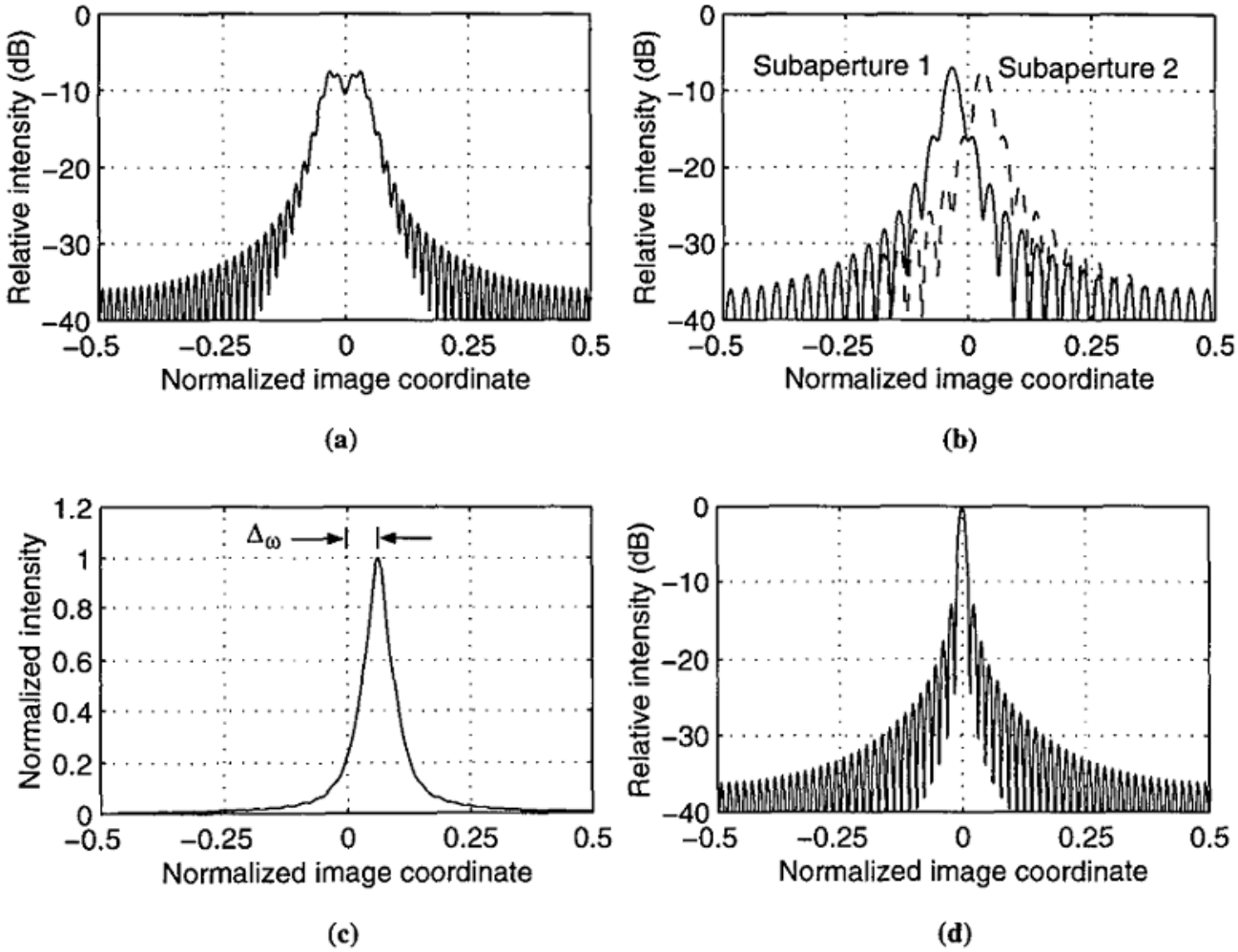
# الگوریتم جابجایی صحنه (Map Drift)





# الگوریتم جابجایی صحنه (Map Drift)





خودمیزانی

# الگوریتم جابجایی صحنه (Map Drift)

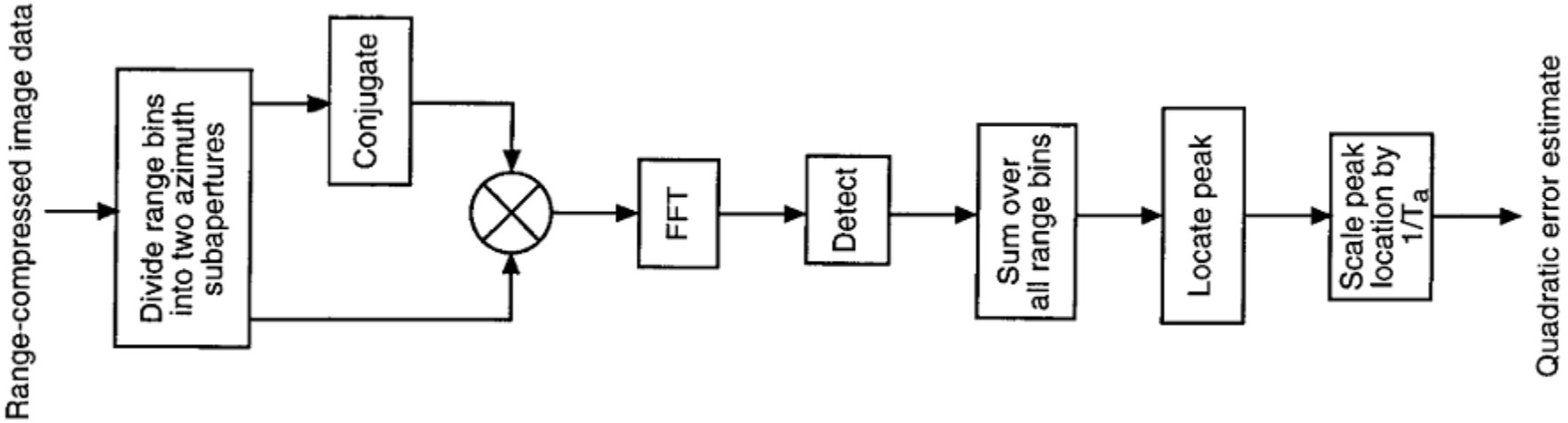
(a)

(b)

# الگوریتم اختلاف فاز (Phase Difference)



- الگوریتم PD همانند MD است، اما از محاسبات کمتری استفاده می کند.
- تفاوت این دو روش در نحوه محاسبه شیفت بین دو زیردهانه است.
- در روش PD تابع خطای فاز از طریق ضرب داده یک زیردهانه در مزدوج مختلط داده زیردهانه دیگر محاسبه می گردد. سپس تبدیل فوریه نتیجه حاصل محاسبه می شود که تابع همبستگی در هر سبد برد را نتیجه می دهد.



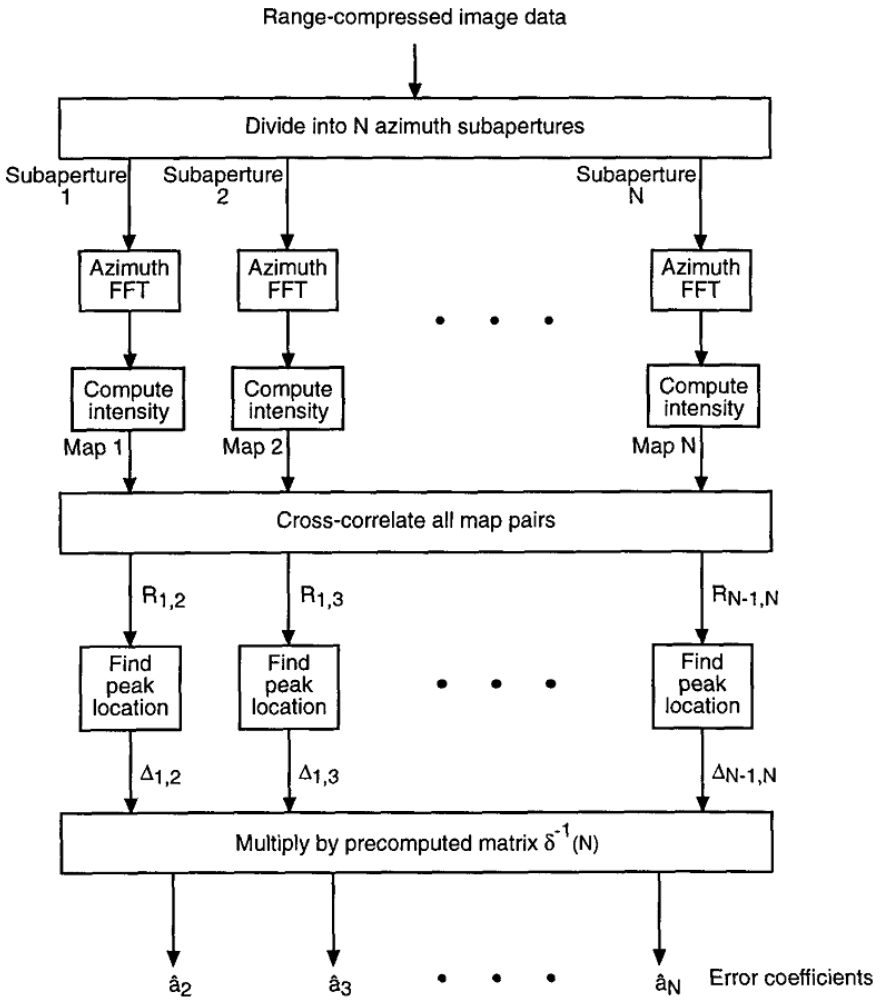
# الگوریتم جابجایی صحنه چند دهانه



- الگوریتم MAMD تعمیم الگوریتم MD است که در آن می توان خطای فاز با درجات بالاتر را نیز تخمین زد.
- در این الگوریتم، برای تخمین خطای فاز با درجه n، باید کل دهانه به n زیردهانه تقسیم شود.
- این الگوریتم نیز همانند MD قادر به تخمین خطای فاز خطی نیست.
- با افزایش n، طول هر زیردهانه کوتاه شده و لذا خطای تخمین شیفت افزایش می یابد، به همین خاطر معمولا این الگوریتم برای خطای فاز تا درجه ۵ مورد استفاده قرار می گیرد.
- این الگوریتم و الگوریتم MD جزو الگوریتم های قدرتمند پارامتری خودمیزانی هستند.

# الگوریتم جابجایی صحنه چند دهانه





# الگوریتم جابجایی صحنه چند دهانه



- خطای فاز در این روش به صورت یک چندجمله ای مرتبه N در نظر گرفته می شود:

$$\phi_e(t) = \sum_{k=2}^{N} a_k t^k$$

- پس از تشکیل تصاویر مربوط به N زیردهانه و محاسبه میزان شیفت نسبی دو به دو آنها رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\boldsymbol{\Delta} = \boldsymbol{\delta a}$$

  - که:

$$\boldsymbol{\Delta} = [\Delta_{1,2}, \dots, \Delta_{1,N}, \Delta_{2,3}, \dots, \Delta_{2,N}, \Delta_{3,4}, \dots, \Delta_{N-1,N}]^T$$

  - و $\Delta_{i,j}$ میزان جابجایی تصویر زیردهانه i ام نسبت به j ام می باشد.
  - بردار ضرایب چند جمله ای فاز:

$$\boldsymbol{a} = [a_2, a_3, \dots, a_N]^T$$

# الگوریتم جابجایی صحنه چند دهانه



- ماتریس ضرایب:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_{1,2}^{2} & \delta_{1,2}^{3} & \cdots & \delta_{1,2}^{N} \\ \delta_{1,3}^{2} & \delta_{1,3}^{3} & \cdots & \delta_{1,3}^{N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \delta_{1,N}^{2} & \delta_{1,N}^{3} & \cdots & \delta_{1,N}^{N} \\ \delta_{2,3}^{2} & \delta_{2,3}^{3} & \cdots & \delta_{2,3}^{N} \\ \delta_{2,4}^{2} & \delta_{2,4}^{3} & \cdots & \delta_{2,4}^{N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \delta_{N-1,N}^{2} & \delta_{N-1,N}^{3} & \cdots & \delta_{N-1,N}^{N} \end{bmatrix}$$

- که داریم: $\delta_{i,j}^{k} = \frac{k}{2\pi}[t_j^{(k-1)} - t_i^{(k-1)}]$
- و $t_i$ مرکز زیردهانه i ام و به صورت زیر خواهد بود: $t_i = (\frac{i}{N} - \frac{N+1}{2N})T_a$
- در نهایت: $\boldsymbol{a = \delta^{-1}\Delta}$

# الگوریتم جابجایی صحنه چند دهانه



بخش (a)، تصویر SAR محو شده به وسیله خطای فاز مرکب از خطای مربعی $6\pi$ رادیان، خطای مکعبی $6\pi$ رادیان و خطای مرتبه4 به میزان $6\pi-$ رادیان را نشان می دهد. الگوریتم MAMD برای تخمین خطا، دهانه را به 4 زیردهانه تقسیم می کند. بخش (b) با انتخاب 32 سبد برد و با 4 تکرار به دست آمده است. در انتها خطای مربعی به میزان $6.07\pi$، خطای مکعبی به میزان $6.10\pi$ و خطای مرتبه 4 به میزان $6.03\pi-$ تخمین زده شده است.

(a)

(b)

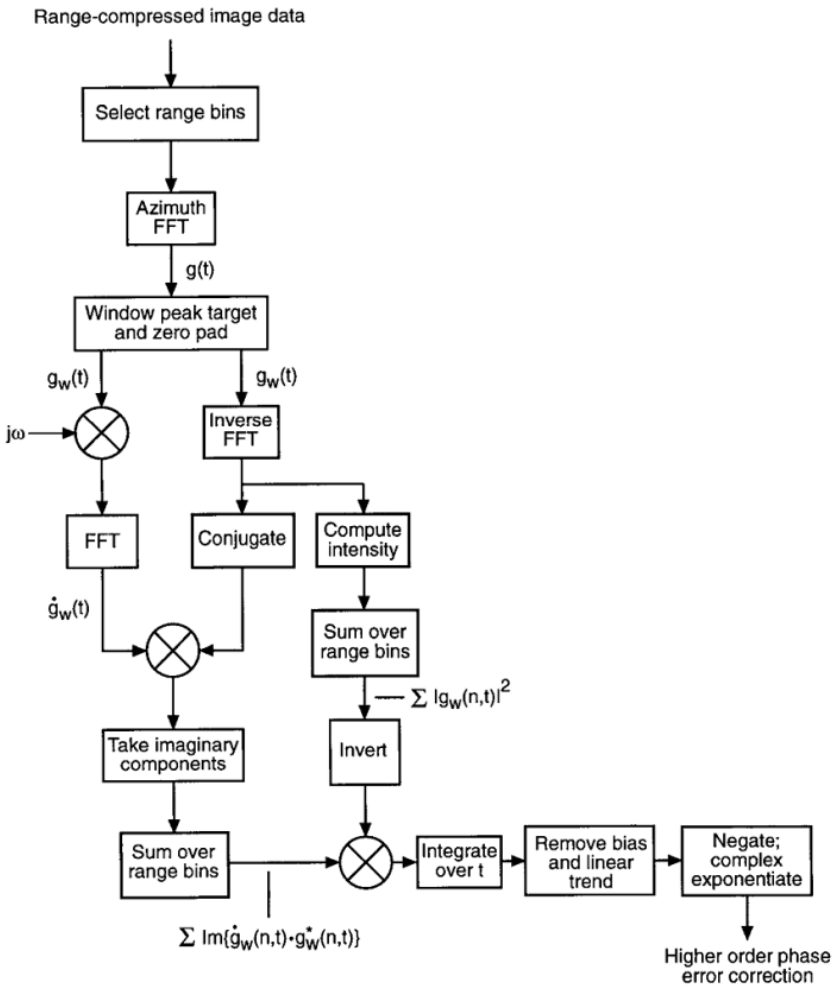
# الگوریتم گرادیان فاز (Phase Gradient Autofocus)



- الگوریتم PGA یکی از موثرترین و پرکاربردترین روش های تخمین و تصحیح خطای فاز می باشد.
- این روش مبتنی بر مدل نیست و خطای از هر مرتبه ای را تصحیح می کند.
- ایده اصلی در این روش محاسبه گرادیان فاز سیگنال دریافتی می باشد که به این طریق تابع خطا از فاز به دامنه سیگنال منتقل شده و سپس استخراج می گردد.
- این روش مانند روش‌های قبل ابتدائاً برای SAR نورافکنی ارائه شده است و فرض اولیه این است که خطای فاز روی همه سبدهای برد یکسان است. با متوسط گیری روی همه سبدهای برد و تکرار الگوریتم می توان خطای فاز از درجات مختلف را با دقت بالایی تخمین زد و تصحیح نمود.

# الگوریتم گرادیان فاز (Phase Gradient Autofocus)





# الگوریتم گرادیان فاز (Phase Gradient Autofocus)



- در ابتدای این الگوریتم در تصویر نهایی زیرمجموعه ای از سبدهای برد با بیشترین انرژی انتخاب می شود (اهداف نقطه ای قوی در کلاتر ضعیف). در مرحله بعد موقعیت دامنه حداکثر، مشخص شده و با شیفت چرخشی به مرکز تصویر منتقل می شود. سپس جهت جداسازی سیگنال از کلاتر و نویز، پنجره ای حول مرکز (موقعیت حداکثر) انتخاب می شود. طول این پنجره در دقت عملکرد این روش تأثیر بسزایی دارد. معمولاً در تکرار اولیه الگوریتم طول این پنجره بیشتر انتخاب می شود تا کل سیگنال خطا وارد شود ولی در تکرارهای بعد طول پنجره کوتاه‌تر می شود تا نویز بیشتری حذف شود. پس از پنجره‌گذاری، مشتق اول سیگنال محاسبه می شود. لازم به ذکر است برای محاسبه مشتق از ویژگی مشتق در تبدیل فوریه استفاده شده است و در نهایت با استفاده از این مشتق فاز، تخمینی از مشتق خطای فاز حاصل خواهد شد. با انتگرال گیری از مشتق خطای فاز در طول دهانه تابع خطای فاز به دست می آید و بالاخره تصویر نهایی با استفاده از تابع خطای فاز تخمینی تصحیح می شود. برای دقت بیشتر، این الگوریتم می تواند چندین بار تکرار شود.

# الگوریتم گرادیان فاز (Phase Gradient Autofocus)



- سبد بردی شامل یک هدف نقطه ای قبل از تبدیل فوریه نهایی به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$g(t) = a_t e^{j(\omega_0+\phi_0+\phi_e(t))}, \qquad -\frac{T_a}{2} \le t \le \frac{T_a}{2}$$

- تصویر پس از تبدیل فوریه حاصل می شود:

$$G(\omega) = a_t T_a sinc(T_a(\omega-\omega_0))e^{j\phi_0} \bigotimes E(\omega)$$

- $E(\omega)$ تبدیل فوریه تابع خطای مختلط ($e^{j\phi_e(t)}$) و $\bigotimes$ عملگر کانولوشن می باشد.
- پنجره گذاری:

$$G_W(\omega) = W(\omega-\omega_0)a_t T_a sinc(T_a(\omega-\omega_0))e^{j\phi_0} \bigotimes E(\omega)$$

# الگوریتم گرادیان فاز (Phase Gradient Autofocus)



- استفاده از پنجره باعث محدودیت بیشترین فرکانسِ خطای فازی می‌شود که PGA می تواند آن را تخمین بزند و حذف کند. فرکانس بالای مذکور با کاهش طول پنجره کاهش می یابد.
- اعمال تبدیل فوریه معکوس: $g_W(t) = a_t e^{j\phi_0} e^{j\phi_e(t)} \otimes w(t)$
- همچنین عکس تبدیل فوریه $j\omega G_W(\omega)$ جهت دستیابی به مشتق اول $g_W(t)$ محاسبه می شود که در این راستا از ویژگی مشتق در تبدیل فوریه استفاده می شود. داریم:

$$\dot{g}_W(t) = j\dot{\phi}_e(t) g_W(t)$$

- که $\dot{\phi}_e(t)$ مشتق زمانی خطای فاز می باشد. با توجه به رابطه فوق می توان $\dot{\phi}_e(t)$ را با استفاده از $\dot{g}_W(t)$ محاسبه شده به دست آورد. با فرض ناچیز بودن اثر $w(t)$، تخمین مشتق اول خطای فاز (گرادیان فاز) به صورت زیر خواهد بود:

$$\hat{\dot{\phi}}_e(t) = \frac{Im\{\dot{g}_W(t) g_W^*(t)\}}{|g_W(t)|^2}$$

# الگوریتم گرادیان فاز (Phase Gradient Autofocus)



- در روش PGA جهت تخمین گرادیان بر روی تمام سبدهای برد متوسط گیری انجام می شود:

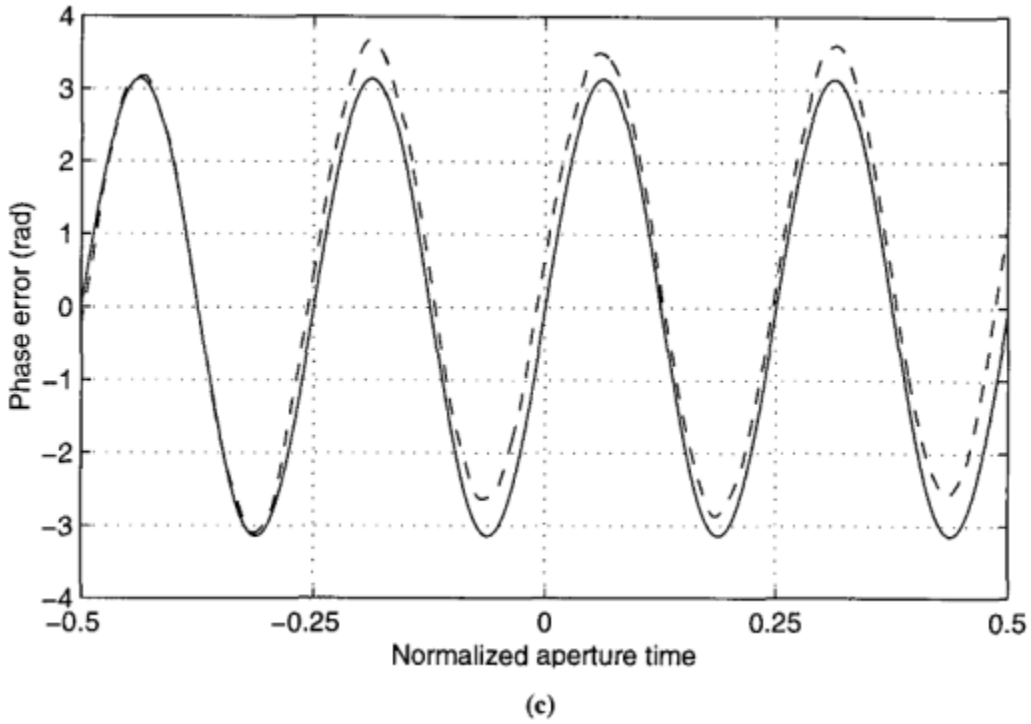
$$\hat{\dot{\phi}}_e(t) = \frac{\sum_n Im\{\dot{g}_W(n,t)g_W^*(n,t)\}}{\sum_n |g_W(n,t)|^2}$$

(a)

(b)

# الگوریتم گرادیان فاز (Phase Gradient Autofocus)






(c)

# الگوریتم گرادیان فاز (Phase Gradient Autofocus)



- الگوریتم PGA از دیدگاه تجزیه مقادیر ویژه