

## **Spotlight SAR Data Focusing Based on the Two-Step Processing Approach Considering Correction Coefficients**

**N. Mardaneh<sup>\*</sup>, M. Hatam, A. Liaqat**

<sup>\*</sup> Master's degree, Mechanical Research Institute, Iran Space Research Institute, Shiraz, Iran

(Received: 15/08/2021, Accepted: 28/11/2021)

### **Abstract**

Receiving more accurate information from an area in SAR images requires high-resolution imaging of that area. In order to achieve high resolution SAR images, the spotlight imaging mode is used. The two-step focusing approach, is an efficient approach to eliminate the doppler spectrum folding in the spotlight mode and focus raw radar data. Relevant articles and references, have only used fast Fourier transform and complex coefficient to eliminate the data spectrum folding in implementing this approach. But in fact, eliminating the doppler spectrum folding in this approach, requires a series of correction coefficients in addition to fast Fourier transform and complex coefficients, which are not provided in any of the relevant references and articles. In reality, the relevant references have only provided a general method of implementation of this approach and have omitted the provision of these correction coefficients. The failure to consider these correction coefficients in the implementation of this approach, causes distortions in the compressed signal. In this paper, the desired correction coefficients are extracted and the block diagram of signal processing is modified by using these coefficients. Also, simulations have been performed to show the distortions due to neglecting the correction coefficients. Implementing the two-step focusing approach with correction coefficients is the main topic of this paper.

**Keywords:** Spotlight mode, Spectrum folding, Two-step focusing approach, Correction coefficients

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: najme.mardane71@gmail.com

## متمرکزسازی داده‌های سار نورافکن مبتنی بر رویکرد پردازشی

## دومرحله‌ای با احتساب ضرایب تصحیح

نجمه مردانه<sup>۱\*</sup>، مجید حاتم<sup>۲</sup>، علیرضا لیاقت<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشجوی دکتری، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران، شیراز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷)

## چکیده

دریافت اطلاعات دقیق‌تر از یک منطقه در تصاویر سار نیازمند تصویربرداری با حد تفکیک بالا از آن منطقه می‌باشد. جهت دستیابی به تصاویر سار با حد تفکیک بالا، حالت تصویربرداری نورافکن به کار می‌رود. رویکرد تمرکز دومرحله‌ای، یک رویکرد کارا برای برطرف نمودن تاخوردگی طیف فرکانسی در حالت نورافکن و متمرکزسازی داده‌های خام راداری می‌باشد. مقالات و مراجع مربوطه، در پیاده‌سازی این رویکرد، تنها از تبدیل فوریه سریع و ضرب‌های مختلط برای حذف تاخوردگی طیف داده‌ها استفاده کرده‌اند. اما در واقع، حذف تاخوردگی طیف فرکانسی در این رویکرد، علاوه بر تبدیل فوریه سریع و ضرب‌های مختلط، نیازمند یک سری ضرایب تصحیح می‌باشد که در هیچ‌یک از مراجع و مقالات مربوطه، این ضرایب تصحیح ارائه نشده‌اند. در حقیقت، مراجع مربوطه، تنها روش کلی پیاده‌سازی این رویکرد را ارائه داده‌اند و از ارائه این ضرایب تصحیح صرف‌نظر نموده‌اند. لحاظ نکردن این ضرایب تصحیح در پیاده‌سازی این رویکرد، سبب اعوجاجاتی روی سیگنال فشرده‌شده می‌گردد. در این مقاله ضرایب تصحیح موردنظر استخراج شده‌اند و با استفاده از این ضرایب، بلوک دیاگرام پردازش سیگنال اصلاح می‌گردد. همچنین، شبیه‌سازی‌هایی انجام شده است که اعوجاج ناشی از لحاظ نکردن ضرایب تصحیح را نشان می‌دهد. پیاده‌سازی رویکرد تمرکز دومرحله‌ای با احتساب ضرایب تصحیح، موضوع اصلی این مقاله می‌باشد.

کلید واژه‌ها: حالت نورافکن، تاخوردگی طیف، رویکرد تمرکز دومرحله‌ای، ضرایب تصحیح

## ۱- مقدمه

روی کیفیت تصویر اثر می‌گذارد [۶]. الگوریتم CBP محدودیت‌های ذکر شده در الگوریتم PF را ندارد، اما اگر در پیاده‌سازی این الگوریتم، بازبینی خاصی صورت نگیرد، این الگوریتم از نظر محاسباتی کارا نمی‌باشد [۵].

جهت پردازش داده‌های راداری حالت نورافکن، رویکردهای مبنی بر روش‌های پردازشی حالت نواری<sup>۸</sup> در حوزه فرکانس بسیار موردتوجه قرار گرفته است [۷-۱۰]. این رویکردها نسبت به رویکردهای پرتونگاری دقیق‌تر و کارا تر می‌باشند؛ علاوه بر این تقریب‌های محدودکننده کمتری در این رویکردها به کار رفته است [۱۱-۱۳]. اما به علت پهنای باند بیشتر سیگنال در حالت نورافکن نسبت به حالت نواری و ایجاد مشکل تاخوردگی<sup>۹</sup>، نمی‌توان این رویکرد را در کل دهانه مصنوعی به کار برد. یک راه‌حل مؤثر تقسیم سیگنال دریافتی به چندین قطعه می‌باشد؛ به طوری که پهنای باند هر قطعه کمتر از فرکانس نمونه‌برداری باشد. در این صورت، مشکل تاخوردگی دیگر در هیچ‌یک از قطعه‌ها ایجاد نمی‌شود و می‌توان به‌طور مستقیم، رویکردهای پردازشی حالت نواری را در هر یک از قطعه‌ها به کار برد که این امر، سبب افزایش بار محاسباتی می‌گردد [۹-۱۰]. همچنین

حالت<sup>۱</sup> نورافکن<sup>۲</sup>، نوعی روش تصویربرداری برای دستیابی به حد تفکیک<sup>۳</sup> بالا در رادار دهانه مصنوعی می‌باشد [۱-۲]. جهت تشکیل تصویر از روی داده‌های خام سار در حالت نورافکن از ابتدا تاکنون، رویکردهای پردازشی متعددی ارائه گردیده است که در این بخش به‌طور خلاصه مزایا و معایب هر یک موردبررسی قرار می‌گیرد. اولین رویکردهای پردازشی جهت پردازش داده‌های حالت نورافکن مبنی بر تشابه بین سامانه‌های سار نورافکن و سیستم‌های پرتونگاری<sup>۴</sup> بوده است. الگوریتم‌های PF<sup>۵</sup> و CBP<sup>۶</sup> از این دسته الگوریتم‌ها می‌باشند [۳-۵]. الگوریتم PF از نظر بار محاسباتی الگوریتمی مناسب است، اما نیازمند یک مرحله درون‌یابی از فضای قطبی به فضای مستطیلی است. در این الگوریتم خطاهای درون‌یابی و اثرات جبران نشده انحنا<sup>۷</sup> برد<sup>۷</sup>

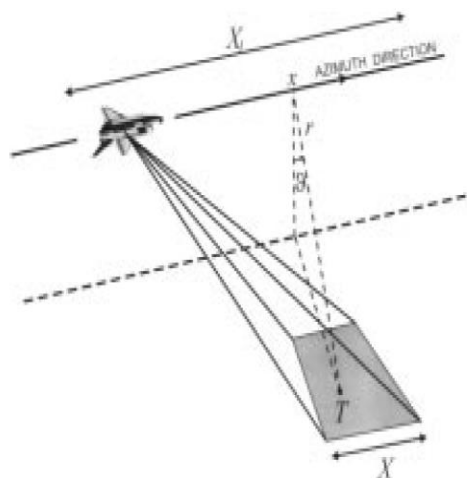
\* رایانامه نویسنده مسئول: Najme.mardane71@gmail.com

1. Mode
2. Spotlight
3. Resolution
4. Tomography
5. Polar Format
6. Convolution Back Projection
7. Range Curvature

جهت پردازش داده‌های سار در حالت‌های نورافکن و نورافکن لغزنده، رویکرد تمرکز دومرحله‌ای با الگوریتم‌های پردازشی متعدد (از قبیل مقیاس‌دهی چیرپ و امگا-کا [۱۶]) به‌عنوان هسته پردازش سیگنال در مراجع [۱۵] و [۱۷-۲۰] مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ مراجع [۱۵] و [۱۷-۲۰]، تنها از تبدیل فوریه سریع و ضرب‌های مختلط برای حذف تاخوردگی طیف داده‌ها در پیاده‌سازی این رویکرد استفاده کرده‌اند. اما در واقع، برطرف نمودن تاخوردگی طیف فرکانسی در این رویکرد، علاوه بر تبدیل فوریه سریع و ضرب‌های مختلط، نیازمند یک سری ضرایب تصحیح می‌باشد که در هیچ‌یک از مراجع مربوطه ارائه نشده‌اند. در ادامه، پس از بیان لزوم تغییر نرخ نمونه‌برداری در رویکرد تمرکز دومرحله‌ای جهت اجتناب از افت حد تفکیک و بررسی نقش این رویکرد در از بین بردن تاخوردگی طیف سیگنال، ضرایب تصحیح استخراج می‌گردند.

## ۲- هندسه تصویربرداری در حالت نورافکن

هندسه تصویربرداری مربوط به حالت نورافکن در شکل (۱) نشان داده شده است. در این حالت تصویربرداری، ناحیه موردنظر از طریق چرخاندن پرتو آنتن در جهت پرواز همواره تحت تشعشع قرار می‌گیرد تا از این طریق، دهانه مصنوعی بزرگ‌تر و قدرت حد تفکیک بالاتری به دست آید. در این نوع حالت تصویربرداری، قدرت حد تفکیک نسبت به حالت نواری به مراتب بیشتر است. برخلاف حالت سار جاروبی<sup>۸</sup> که علاوه بر جهت‌دهی الکترونیکی، می‌توان از جهت‌دهی مکانیکی پرتو نیز استفاده کرد، در حالت نورافکن، چرخش پرتوی آنتن با استفاده از روش‌های جهت‌دهی الکترونیکی پرتو انجام می‌شود. هزینه دست‌یابی به قدرت حد تفکیک بالاتر در حالت نورافکن، کاهش طول ناحیه تصویربرداری به دلیل تمرکز بر روی یک ناحیه خاص است.



شکل (۱). هندسه تصویربرداری در حالت نورافکن [۱۵]

رویکردهایی مبنی بر بازسازی طیف فرکانس سمت از روی طیف تاخورده [۷-۸] و رویکردهایی مبنی بر الگوریتم‌های SPECAN<sup>۱</sup> وجود دارند [۱۴]. الگوریتم‌های مبنی بر SPECAN از نظر محاسباتی کارا می‌باشند، اما قید محدودکننده این الگوریتم‌ها عدم تصحیح دقیق RCM<sup>۲</sup> می‌باشد. هر یک از رویکردهای ذکر شده در بالا محدودیت‌هایی از نظر کارایی و بار محاسباتی دارند. در ادامه رویکرد تمرکز دومرحله‌ای<sup>۳</sup> که یک رویکرد مناسب برای برطرف نمودن تاخوردگی طیف فرکانسی در حالت نورافکن و تشکیل تصویر از روی داده‌های خام راداری می‌باشد، ارائه می‌گردد. رویکرد تمرکز دومرحله‌ای اولین بار برای برطرف نمودن تاخوردگی طیف فرکانسی داده‌های سار در حالت نورافکن و نورافکن لغزنده<sup>۴</sup> ارائه گردید. از آنجایی که در این رویکرد از استفاده از زیر روزه‌ها (همان قطعه‌ها) اجتناب شده است و تنها نیاز به توسعه داده‌های سمت با طول محدود می‌باشد، این رویکرد پردازشی جهت برطرف نمودن تاخوردگی طیف فرکانسی، بسیار مفید می‌باشد. علاوه بر این، در این رویکرد به هیچ درونیابی نیاز نیست و در پیاده‌سازی آن، تنها از تبدیل فوریه سریع<sup>۵</sup> و ضرب‌های مختلط برای حذف تاخوردگی طیف فرکانسی داده‌ها استفاده می‌شود. این رویکرد، مزایای دو الگوریتم پردازشی را به‌طور هم‌زمان داراست: ۱- کارایی الگوریتم SPECAN، ۲- دقت الگوریتم‌های پردازشی حالت نواری.

رویکرد تمرکز دومرحله‌ای، شامل یک فیلترینگ خطی و تغییرناپذیر با مکان است و با روشی مبنی بر شیب زدایی<sup>۶</sup> که در واقع بیانگر نسخه ساده‌ای از الگوریتم SPECAN است، پیاده‌سازی می‌شود. اما برخلاف الگوریتم‌های مبنی بر SPECAN، نرخ چیرپ تابع شیب زدایی، یک مقدار ثابت است. این ویژگی یک نکته کلیدی در پردازشگر است که سبب می‌شود، مشخصه‌های متغیر با مکان باقیمانده تابع انتقال سیستم محفوظ بماند. این فیلترینگ در واقع یک فشرده‌سازی حجیم روی داده‌ها در راستای سمت اعمال می‌کند و اندازه پیکسل<sup>۷</sup> برابر با یا کوچک‌تر از حد تفکیک مورد انتظار را ایجاد می‌کند؛ بنابراین تاخوردگی طیف سیگنال در راستای سمت برطرف می‌گردد. سپس، با استفاده از پردازشگرهای حالت نواری در حوزه فرکانس و با ایجاد اصلاحاتی جزئی در پردازشگر، متمرکزسازی داده‌ها انجام می‌شود. اصلاحاتی که در پردازشگر مربوط به حالت نواری باید ایجاد شوند، شامل تغییراتی در فیلتر منطبق سمت جهت در نظر گرفتن ترم فاز درجه دوم جبران شده و تغییر اندازه پیکسل داده‌های ورودی می‌باشند [۱۵].

<sup>1</sup> Spectrl Analysis

<sup>2</sup> Range Cell Migration

<sup>3</sup> Two-Step Focusing Approach

<sup>4</sup> Sliding Spotlight

<sup>5</sup> Fast Fourier Transform

<sup>6</sup> Deramping

<sup>7</sup> Pixel Spacing

## ۱-۲- تحلیل حوزه فرکانس در حالت نورافکن

برای تحلیل حوزه فرکانس، از هندسه تصویربرداری حالت نورافکن در شکل (۱) شروع می‌کنیم. در این شکل سامانه مختصات استوانه‌ای  $(x, r, \theta)$  نشان داده شده است.  $x$  بیانگر موقعیت سمت،  $r$  نزدیک‌ترین برد اریب<sup>۱</sup> و  $\theta$  زاویه نگاه مربوط به هدف نقطه‌ای دلخواه می‌باشند.

سکوی حامل حسگر سار با سرعت ثابت  $v$  در حال حرکت می‌باشد و در زمان‌های  $t_n - \tau/2$ ، پالس‌های با مدولاسیون فرکانس خطی زیر را ارسال می‌کند [۱۵].

$$f_1(t - t_n) = \exp(j\omega t) \exp\left\{-j \frac{\alpha}{2}(t - t_n)^2\right\} \times \text{rect}\left(\frac{t - t_n}{\tau}\right) \quad (1)$$

$t$  متغیر زمان پیوسته،  $\omega$  فرکانس حامل زاویه‌ای،  $\tau$  طول پالس و  $\alpha$  بیانگر نرخ چیرپ می‌باشد.  $\lambda$  طول موج سیستم،  $X_I$  طول مسیر پرواز و  $X = \frac{\lambda r}{L}$  بیانگر طول منطقه تحت تشعشع در راستای سمت هستند که  $L$  طول آنتن می‌باشد.

اکوی دریافتی از هدف نقطه‌ای  $T$  با مختصات  $(x, r, \theta)$  برابر است با [۱۵]:

$$F(x' - x, r' - r, x, r) = \exp(-j\omega \frac{2r_R}{c}) \times \exp\left\{-j \frac{\alpha}{2}(t - t_n - \frac{2r_R}{c})^2\right\} \text{rect}\left(\frac{t - t_n - \frac{2r_R}{c}}{\tau}\right) \times \text{rect}\left(\frac{x'}{X_I}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{X}\right) = \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} r) \times \exp\left\{-j \frac{2\alpha}{c}(r' - r - \Delta R)^2\right\} \text{rect}\left(\frac{r' - r - \Delta R}{c\tau/2}\right) \times \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R) \text{rect}\left(\frac{x'}{X_I}\right) \times \text{rect}\left(\frac{x}{X}\right) = \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} r) \times b(r' - r - \Delta R) a(x' - x, x, r) \quad (2)$$

$$\Delta R = \frac{(x' - x)^2}{2r} \quad (3)$$

در اینجا از عبارتهای مرتبه بالاتر  $\Delta R$  صرف نظر شده است، اما در فرآیند تمرکز داده‌ها به‌طور دقیق، عبارتهای مذکور لحاظ شده‌اند.

$\mathbf{x}' = v\mathbf{t}_n$  و  $\mathbf{r}' = c(\mathbf{t} - \mathbf{t}_n)/2$  می‌باشد. فاصله بین هدف و حسگر برابر با  $r_R = \sqrt{r^2 + (x' - x)^2} = r + \Delta R$  می‌باشد [۱۵].

$$b(r' - r - \Delta R) = \exp\left\{-j \frac{2\alpha}{c^2}(r' - r - \Delta R)^2\right\} \times \text{rect}\left(\frac{r' - r - \Delta R}{c\tau/2}\right) \quad (4)$$

$$a(x' - x, x, r) = \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R) \text{rect}\left(\frac{x'}{X_I}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{X}\right) \quad (5)$$

چون در گام اول رویکرد تمرکز دومرحله‌ای، تحلیل‌ها روی طیف سیگنال سمت متمرکز می‌باشد، فرم ساده شده رابطه (۵) به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۵]:

$$a(x' - x, x, r) = \exp(-j \frac{2\pi(x' - x)^2}{\lambda r}) \times \text{rect}\left(\frac{x'}{X_I}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{X}\right) \quad (6)$$

$$\text{rect}\left(\frac{x'}{X_I}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{X}\right)$$

با استفاده از قضیه فاز ثابت، طیف سیگنال سمت برابر است با [۱۵]:

$$a_A(\epsilon, x, r) = \text{FT}[a(x' - x, x, r)] = \int a(x' - x, x, r) \times \exp(-j 2\pi \epsilon x') dx' \square \exp[j 2\pi(\epsilon \frac{2}{4} \frac{\lambda r}{4} - \epsilon x)] \times \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda r} x^2) \text{rect}\left(\frac{x'}{X_I}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{X}\right) \quad (7)$$

FT و  $\epsilon$  به ترتیب بیانگر عملگر تبدیل فوریه و متغیر فرکانس سمت می‌باشند. رابطه (۷) نشان می‌دهد که طیف سمت در فرکانس  $\frac{2x}{\lambda r}$  متمرکز می‌باشد. پهنای باند سیگنال سمت برابر با  $\frac{2}{L} \frac{X_I}{X}$  می‌باشد و نسبت به حالت نواری با فاکتور  $> 1$  افزایش می‌یابد. این افزایش پهنای باند، سبب بهبود حد تفکیک در حالت نورافکن می‌گردد. تحلیل‌های بیان شده مربوط به یک هدف نقطه‌ای بود. با در نظر گرفتن طول  $X$  برای منطقه تحت تشعشع، پهنای باند سیگنال  $(\Delta \epsilon)$  برابر با رابطه ۸ خواهد بود.

$$\Delta \epsilon = \frac{2}{L} \frac{X_I + X}{X} \quad (8)$$

<sup>1</sup> Slant range

با استفاده از قضیه فاز ثابت، کانولوشن بین معادلات ۹ و ۱۰، مطابق رابطه ۱۱ به دست می‌آید [۱۵]:

$$\begin{aligned} \bar{a}(\mathbf{x}'; x, r) &= \mathbf{a}(\mathbf{x}' - x; x, r) \otimes_{\mathbf{x}'} s(\mathbf{x}') = \exp(j \frac{2\pi \mathbf{x}'^2}{\lambda \tilde{r}}) \times \\ & \int \mathbf{a}(\mathbf{z} - x; x, r) \exp(j \frac{2\pi \mathbf{z}^2}{\lambda \tilde{r}}) \exp(j 2\pi \frac{2\mathbf{x}'}{\lambda \tilde{r}} \cdot \mathbf{z}) d\mathbf{z} = \text{rect}[\frac{x}{X}] \times \\ & \int \text{rect}[\frac{\mathbf{z}}{X_I}] \cdot \exp(-j 2\pi \frac{(\mathbf{z} - x)^2}{\lambda r}) \cdot \exp(j \frac{2\pi(\mathbf{z} - \mathbf{x}')^2}{\lambda \tilde{r}}) d\mathbf{z} = \\ & \text{rect}[\frac{x}{X}] \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\mathbf{x}'^2}{\tilde{r}} - \frac{x^2}{r}\right)\right] \times \text{rect}[\frac{\mathbf{z}}{X_I}] \\ & \times \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda \tilde{r}} \frac{r - \tilde{r}}{r} \mathbf{z}^2) \times \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\mathbf{x}'}{\tilde{r}} - \frac{x}{r}\right) \cdot \mathbf{z}\right] d\mathbf{z} \end{aligned} \quad (11)$$

$\tilde{r}$  بیانگر نوعی برد اریب است و در ادامه، نحوه انتخاب آن به‌طور مفصل بررسی می‌شود. اگر فرض  $\tilde{r} = r$  برقرار باشد، رابطه بالا به شکل زیر قابل بیان خواهد بود [۱۵]:

$$\begin{aligned} \bar{a}(\mathbf{x}'; x, r) &= \text{rect}[\frac{x}{X}] \text{sinc}\left[\frac{2\pi X_I}{L X} (\mathbf{x}' - x)\right] \times \\ & \exp(j \frac{2\pi(\mathbf{x}'^2 - x^2)}{\lambda r}) \end{aligned} \quad (12)$$

از رابطه (۱۲) مشخص است که هدف در راستای سمت به‌طور کامل فشرده شده است.

با استفاده از قضیه فاز ثابت و فرض  $\tilde{r} \neq r$ ، رابطه ۱۱ به شکل زیر تغییر می‌کند [۱۵]:

$$\begin{aligned} \bar{a}(\mathbf{x}'; x, r) &= \text{rect}[\frac{x}{X}] \times \\ & \text{rect}\left[\frac{\mathbf{x}' - x}{X_I} \frac{\tilde{r}}{r}\right] \times \exp(-j \frac{2\pi(\mathbf{x}' - x)^2}{\lambda(r - \tilde{r})}) \end{aligned} \quad (13)$$

فرض  $\tilde{r} = r_M$  بیانگر بدترین انتخاب ممکن برای  $\tilde{r}$  می‌باشد. با این فرض،  $\frac{|r - \tilde{r}|}{r}$  برای برخی از اهداف برابر با

$$\frac{|r_m - r_M|}{r_m}$$

می‌شود و سیگنال حاصل از این فرض با پهنای

$$X_I \frac{|r_m - r_M|}{r_m}$$

حول  $x \frac{r_M}{r_m}$  متمرکز می‌باشد. چون محدوده

برد منطقه تحت تشعشع معمولاً خیلی کوچک است، فرض

$$\frac{|r_m - r_M|}{r_m} < 1$$

برقرار می‌باشد، بر این اساس

$$X_I \frac{|r_m - r_M|}{r_m} < X_I$$

و حتی در این حالت محدودکننده، اثر

از رابطه ۸ مشخص است که جهت اجتناب از تاخوردگی طیف سمت، فرکانس نمونه‌برداری نسبت به حالت نواری باید به اندازه  $V = \frac{\Delta \varepsilon}{2/L} = \frac{X_I + X}{X}$  افزایش یابد. اما از طرفی، افزایش فرکانس نمونه‌برداری، خود سبب ایجاد مسائل مربوط به ابهام در برد<sup>۱</sup> و افزایش نرخ داده‌ها می‌گردد. بنابراین در حالت نورافکن از همان فرکانس نمونه‌برداری حالت نواری استفاده می‌گردد. این انتخاب فرکانس نمونه‌برداری در حالت نورافکن، سبب تاخوردگی طیف سیگنال می‌گردد. لذا تلاش می‌شود در مراحل بعدی پردازش این مشکل برطرف گردد.

اگر در رابطه ۸ فرض شود، اندازه پیکسل در راستای سمت در داده‌های خام و داده‌های متمرکز شده به ترتیب برابر با  $\Delta x' = L/2$  و  $\Delta x'' = 1/\Delta \varepsilon$  باشند، با توجه به رابطه ۸ خواهیم داشت [۱۵]:

$$\frac{X}{\Delta x''} \approx \frac{X_I + X}{\Delta x'} \quad (9)$$

با توجه به تعداد نمونه‌های داده‌های خام و تعداد نمونه‌های تصویر متمرکز شده (به ترتیب برابر با  $\frac{X}{\Delta x''}$  و  $\frac{X_I}{\Delta x'}$  می‌باشند) و رابطه (۹)، مشخص است که تعداد نمونه‌های تصویر متمرکز شده بیشتر از تعداد نمونه‌های داده‌های خام می‌باشد، بنابراین تغییر نرخ نمونه‌برداری جهت اجتناب از افت حد تفکیک لازم می‌باشد [۱۵].

### ۳- حذف تاخوردگی طیف داده‌ها در رویکرد تمرکز دومرحله‌ای

از آنجایی که چرخش پرتوی آنتن در راستای سمت تنها سبب تغییر مشخصه‌های طیف سیگنال در راستای سمت می‌گردد، در ادامه، تحلیل‌ها بر روی مشخصه طیف سیگنال در راستای سمت متمرکز می‌گردد. در این بخش گام اول رویکرد تمرکز دومرحله‌ای تشریح می‌شود. هدف گام اول در رویکرد تمرکز دومرحله‌ای، برطرف کردن تاخوردگی طیف فرکانسی، از طریق کانال<sup>۲</sup> نمودن سیگنال خام دریافتی با سیگنال چیرپ زیر می‌باشد [۱۵]:

$$s(\mathbf{x}') = \exp\left\{j \pi \frac{2 \mathbf{x}'^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \quad (10)$$

with  $r_m < \tilde{r} < r_M$

<sup>1</sup> Range Ambiguity  
<sup>2</sup> Convolve

فشرده‌سازی نیز مشاهده می‌شود. هرچند که این اثر نسبت به فشرده‌سازی ایجاد شده در رابطه ۱۲ ناچیز می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده تا اینجا مربوط به هدف نقطه‌ای بود اما می‌توان این نتایج را به کل منطقه تحت تشعشع تعمیم داد. با احتساب کل منطقه تحت تشعشع با طول  $X$ ، حداکثر محدوده سیگنال سمت بعد از گام فشرده‌سازی در رابطه ۱۱ مطابق زیر خواهد بود [۱۵]:

فشرده‌سازی نیز مشاهده می‌شود. هرچند که این اثر نسبت به فشرده‌سازی ایجاد شده در رابطه ۱۲ ناچیز می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده تا اینجا مربوط به هدف نقطه‌ای بود اما می‌توان این نتایج را به کل منطقه تحت تشعشع تعمیم داد. با احتساب کل منطقه تحت تشعشع با طول  $X$ ، حداکثر محدوده سیگنال سمت بعد از گام فشرده‌سازی در رابطه ۱۱ مطابق زیر خواهد بود [۱۵]:

$$X_S \approx \max\left(\frac{\lambda \tilde{r}}{L} + X_I \frac{|r - \tilde{r}|}{r}\right) \leq \frac{\lambda r_M}{L} + X_I \frac{|r_M - r_m|}{r_m} \quad (14)$$

with  $X < X_S < X_I$

$$\frac{\lambda \tilde{r}}{2\Delta x'} = P\Delta x'' \geq X_S \quad \text{with } P \in N \quad (17)$$

فاکتور  $P\Delta x''$  بیانگر تکثیر<sup>۳</sup> داده‌های سمت خروجی می‌باشد. اگر رابطه ۱۷ برقرار باشد، نه تنها طیف سیگنال در راستای سمت دچار تاخوردگی نمی‌گردد، (رابطه ۱۵ را مشاهده کنید)، بلکه هیچ چرخشی<sup>۴</sup> نیز در حوزه زمان سمت ایجاد نمی‌شود. به‌طور کلی به خاطر افزایش نرخ نمونه‌برداری<sup>۵</sup> که در حالت نورافکن نسبت به حالت نواری وجود دارد، نامساوی بالا (رابطه ۱۷) برقرار می‌باشد. این نکته می‌تواند با در نظر گرفتن رابطه ۱۴ در نامساوی ۱۷ واضح شود. در این حالت خواهیم داشت [۱۵]:

$$\frac{L}{2\Delta x'} \geq 1 + \max\left(\frac{X_I |r - \tilde{r}| / r}{\lambda \tilde{r} / L}\right) \quad (18)$$

سمت چپ نامساوی رابطه ۱۸، بیانگر نسبت شرط نایکوییست در حالت نواری ( $\frac{L}{2}$ ) به نرخ نمونه‌برداری از داده‌های خام راداری ( $\Delta x'$ ) می‌باشد. به علت افزایش ۲۰ الی ۳۰ درصدی نرخ نمونه‌برداری نسبت به شرط نایکوییست در حالت نواری، سمت چپ نامساوی بالا حدود ۱/۲ الی ۱/۳ می‌باشد. با تغییری جزئی، رابطه (۱۸) به رابطه (۱۹) تبدیل می‌شود [۱۵].

$$\max\left(\frac{|r - \tilde{r}|}{r \tilde{r}}\right) \leq \frac{\lambda}{L X_I} \left(\frac{L}{2\Delta x'} - 1\right) \quad (19)$$

اگر نامساوی  $\frac{r_M - r_m}{r_M r_m} \leq \frac{\lambda}{L X_I} \left(\frac{L}{2\Delta x'} - 1\right)$  برقرار باشد، رابطه ۱۹ برای هر  $\tilde{r} \in (r_m, r_M)$  نیز برقرار می‌باشد.

بیانگر طول منطقه تحت تشعشع می‌باشد که چندین برابر کمتر از طول مسیر پرواز ( $X_I$ ) می‌باشد. لذا، نامساوی  $X_S < X_I$ ، در رابطه بالا برای ساختارهای نورافکن برقرار می‌باشد. با برقراری این نامساوی می‌توان عملیات کانولوشن در رابطه (۱۱) را به‌عنوان فشرده‌سازی حجیم در راستای سمت تعبیر کرد که سبب کاهش محدوده سیگنال از  $X_I$  به  $X_S$  می‌شود.

#### ۴- پیاده‌سازی کارآمد کانولوشن در حوزه زمان گسسته

در این بخش، رابطه ۱۱ در حوزه زمان گسسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. روابط در این بخش مشابه روابط در حوزه زمان پیوسته می‌باشند. اندازه پیکسل در راستای سمت سیگنال خروجی (سیگنال حاصل از کانولوشن) مطابق رابطه زیر به نحوی انتخاب می‌شود که در شرط نایکوییست صدق کند [۱۵]:

$$\Delta x'' = \frac{\Delta x'}{W} \quad \text{with } W \geq V \quad (15)$$

رابطه ۱۱ در حوزه زمان گسسته به شرح زیر بازنویسی می‌شود [۱۵]:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{a}}(\mathbf{n}\Delta x''; x, r) &= \sum_{i=-R/2}^{i=R/2-1} \mathbf{a}(\mathbf{i}\Delta x'; x, r) \times \\ \mathbf{s}(\mathbf{n}\Delta x'' - \mathbf{i}\Delta x') &= \exp\left\{j2\pi \frac{(\mathbf{n}\Delta x'')^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \times \\ &\sum_{i=-R/2}^{i=R/2-1} \mathbf{a}(\mathbf{i}\Delta x'; x, r) \cdot \exp\left\{j2\pi \frac{(\mathbf{i}\Delta x')^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \times \\ &\exp\left\{-j2\pi \frac{2\Delta x' \Delta x''}{\lambda \tilde{r}} \mathbf{i}\mathbf{n}\right\} \end{aligned} \quad (16)$$

with  $\mathbf{n} = -B/2, \dots, B/2 - 1$

<sup>1</sup> Fast Fourier Transform

<sup>2</sup> Scaled Fourier transform

<sup>3</sup> Replication

<sup>4</sup> Wrap around

<sup>5</sup> Over Sampling

از رابطه (۲۰) مشخص است که اندازه پیکسل در نظر گرفته شده در شرط نایکویست صدق می‌کند و هم‌زمان شکلی بهینه از پیاده‌سازی فشرده‌سازی سمت حجیم در رابطه ۱۱ به دست آمده است.

#### ۴-۱- اعمال باقیمانده متمرکزسازی موردنیاز روی داده‌ها با استفاده از روش‌های پردازشی حالت نواری

فشرده‌سازی حجیم در رابطه ۱۱ سبب برطرف شدن تاخوردگی طیف می‌گردد. از طرفی این فشرده‌سازی سبب محفوظ ماندن مشخصه‌های متغیر با مکان تابع انتقال سامانه می‌گردد. لذا جهت اعمال باقیمانده فشرده‌سازی داده‌ها می‌توان از روش‌های پردازشی حالت نواری استفاده کرد. جهت مشخص شدن این نکته، طیف سیگنال در حالت نورافکن بررسی می‌شود. جزئیات به دست آوردن طیف سیگنال در مرجع [۱۵] و سایر مراجع عنوان شده است. لذا در اینجا تنها تفاوت طیف سیگنال در حالت نورافکن پس از اعمال فشرده‌سازی حجیم با طیف سیگنال در حالت نواری در رابطه ۲۱ بیان می‌شود [۱۵].

$$\bar{\mathbf{G}}_0(\varepsilon, \eta) = \mathbf{G}_0(\varepsilon, \eta) \exp \left\{ -j\pi \frac{\varepsilon^2 \lambda \bar{r}}{2} \right\} \quad (21)$$

$\varepsilon$  و  $\eta$  به ترتیب فرکانس در راستای سمت و برد می‌باشند. تنها تفاوت طیف سیگنال در حالت نورافکن پس از اعمال فشرده‌سازی حجیم در راستای سمت با طیف سیگنال در حالت نواری در عبارت  $\bar{\mathbf{G}}_0(\varepsilon, \eta)$  به جای  $\mathbf{G}_0(\varepsilon, \eta)$  می‌باشد؛ لذا تنها تغییراتی که در پردازشگرهای حالت نواری پس از فشرده‌سازی حجیم باید در نظر گرفت شامل اندازه پیکسل در راستای سمت ( $\Delta x''$ ) بجای  $\Delta x'$  و در نظر گرفتن  $\bar{\mathbf{G}}_0(\varepsilon, \eta)$  بجای  $\mathbf{G}_0(\varepsilon, \eta)$  در تابع انتقال سامانه می‌باشد. بعد از برطرف نمودن تاخوردگی طیف، می‌توان از هر یک از الگوریتم‌های پردازشی حالت نواری از قبیل برد-داپلر، مقیاس دهی چیرپ، امگاز حالت ۱-کا و... جهت اعمال باقیمانده فشرده‌سازی داده‌ها استفاده نمود [۱۵ و ۲۱].

#### ۵- استخراج ضرایب تصحیح موردنیاز در پیاده‌سازی بخش مربوط به حذف تاخوردگی طیف داده‌ها

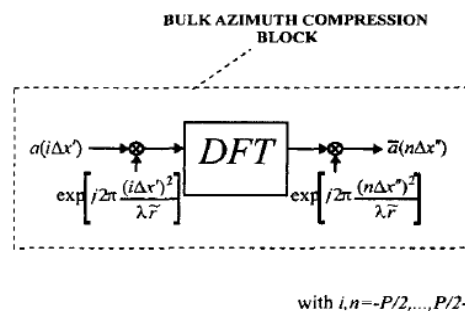
عبارت مرسوم‌تر برای عملگر DFT (در رابطه ۲۰)، در حالت  $\sum_{i=0}^{P-1}$  برقرار می‌باشد؛ لذا جهت

به‌طور مثال، افزایش ۲۰ درصدی نرخ نمونه‌برداری و طول مسیر پرواز  $X_I = 5X$ ، مقدار  $\frac{0.2}{5} \times r_m$  را برای سمت راست نامساوی  $r_M - r_m \leq \frac{\lambda r_M}{LX_I} \left( \frac{L}{\Delta x'} - 1 \right) r_m$  ایجاد می‌کند. این فرضیات منجر به نامساوی جدید  $r_M - r_m \leq 0.04 r_m$  می‌گردد، که این نامساوی برای اکثر سامانه‌های سار نورافکن برقرار می‌باشد.

با توجه به رابطه (۱۷)، رابطه (۱۶) به شکل زیر قابل بازنویسی می‌باشد [۱۵].

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{a}}(\mathbf{n}\Delta x''; x, r) &= \exp \left\{ j2\pi \frac{(\mathbf{n}\Delta x'')^2}{\lambda \bar{r}} \right\} \times \\ &\sum_{i=-P/2}^{P/2-1} \mathbf{a}(\mathbf{i}\Delta x'; x, r) \times \exp \left\{ j2\pi \frac{(\mathbf{i}\Delta x')^2}{\lambda \bar{r}} \right\} \times \\ &\exp \left\{ -j2\pi \frac{\mathbf{i}\mathbf{n}}{P} \right\} = \exp \left\{ j2\pi \frac{(\mathbf{n}\Delta x'')^2}{\lambda \bar{r}} \right\} \times \\ &\text{DFT} \left\{ \mathbf{a}(\mathbf{i}\Delta x'; x, r) \cdot \exp \left\{ j2\pi \frac{(\mathbf{i}\Delta x')^2}{\lambda \bar{r}} \right\} \right\} \\ &\text{with } \mathbf{n} = -P/2, \dots, P/2-1 \end{aligned} \quad (20)$$

بلوک دیاگرام مربوط به حذف تاخوردگی طیف داده‌ها، در مراجع [۱۵] و [۱۷-۲۰] تنها از دو ضرب مختلط و یک DFT<sup>۱</sup> استفاده می‌کند. نمایی از این بلوک دیاگرام در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل (۲). بلوک دیاگرام مربوط به بخش حذف تاخوردگی طیف داده‌ها [۱۸]

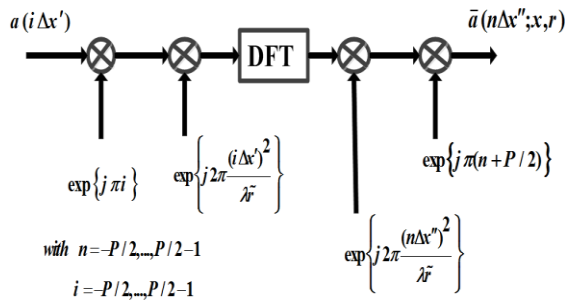
یک انتخاب هوشمندانه برای  $\bar{r}$  برابر با مقداری است که با حاصل شدن  $P \neq R$  بتوان از کدهای بهینه FFT استفاده کرد. در این حالت به یک صفر افزایی محدود در داده‌های خام  $\mathbf{a}(\cdot)$  نیاز می‌باشد و این امر، با جایگزینی  $\sum_{i=-R/2}^{R/2-1}$  به  $\sum_{i=-P/2}^{P/2-1}$  محقق می‌شود.

<sup>۱</sup> Discrete Fourier Transform

$$\bar{a}(n\Delta x''; x, r) = \exp\{j\pi(n+P/2)\} \times \exp\left\{j2\pi \frac{(n\Delta x'')^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \times \text{DFT} \left\{ \begin{array}{l} a(i\Delta x'; x, r) \times \exp\{j\pi i\} \\ \times \exp\left\{j2\pi \frac{(i\Delta x')^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \end{array} \right\} \quad (23)$$

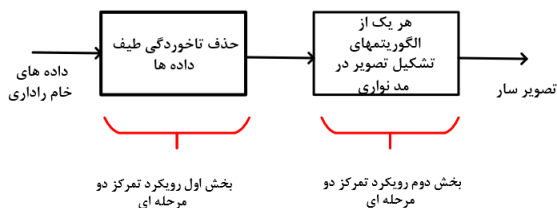
with  $n = -P/2, \dots, P/2 - 1$   
 $i = -P/2, \dots, P/2 - 1$

با توجه به رابطه ۲۳ بلوک دیاگرام شکل ۲، در ادامه اصلاح می‌گردد.



شکل (۳). بلوک دیاگرام مربوط به حذف تاخوردگی طیف داده‌ها با احتساب ضرایب تصحیح

رویکرد تمرکز دومرحله‌ای رویکردی جامع می‌باشد که می‌تواند با هر یک از الگوریتم‌های تشکیل تصویر در مد نواری از قبیل برد-داپلر، مقیاس دهی چیرپ، امگا-کا و غیره به کار رود. با توجه به توضیحاتی که ارائه شده است، می‌توان بلوک دیاگرام کلی پردازش سیگنال را این‌گونه متصور شد:



شکل (۴). بلوک دیاگرام کلی پردازش سیگنال در رویکرد تمرکز دومرحله‌ای

## ۶- شبیه‌سازی سیگنال و پردازش داده‌های خام راداری با استفاده از رویکرد تمرکز دومرحله‌ای

در این بخش، پردازش سیگنال مربوط به سه هدف نقطه‌ای در حالت نورافکن با پارامترهای سیستمی مطابق جدول ۱، شبیه‌سازی و بررسی شده‌اند. این سه هدف در راستای سمت در یک مکان قرار گرفته‌اند اما موقعیت آن‌ها در راستای برد متفاوت

پایه‌سازی DFT با استفاده از تبدیل فوریه سریع، باید یک سری تغییرات در رابطه ۲۰ انجام شود تا  $\sum_{i=-P/2}^{i=P/2-1}$  with  $n = -P/2, \dots, P/2 - 1$  به  $\sum_{i=0}^{i=P-1}$  with  $n = 0, \dots, P - 1$  تبدیل شود [۱۵]. در مرجع [۱۵] و سایر مراجع مربوطه، تنها عنوان شده است که تغییراتی در روابط باید انجام شود، اما هیچ‌یک از مراجع، تغییرات لازم را ارائه نداده‌اند.

در این بخش ضرایب تصحیح موردنیاز در پایه‌سازی بخش اول رویکرد تمرکز دومرحله‌ای (حذف تاخوردگی طیف) استخراج و بلوک دیاگرام مربوط به حذف تاخوردگی طیف اصلاح می‌گردد. جهت استخراج این ضرایب، تغییر متغیر  $i' = i + P/2$  و  $n' = n + P/2$  در رابطه ۲۰ انجام می‌شود.

$$\bar{a}((n' - P/2)\Delta x''; x, r) = \exp\left\{j2\pi \frac{((n' - P/2)\Delta x'')^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \times \sum_{i'=0}^{i'=P-1} a((i' - P/2)\Delta x'; x, r) \times \exp\left\{j2\pi \frac{((i' - P/2)\Delta x')^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \times \exp\left\{-j2\pi \frac{2\Delta x' \Delta x''}{\lambda \tilde{r}} (i' - P/2)(n' - P/2)\right\} = \quad (22)$$

$$\exp\{j\pi n'\} \times \exp\left\{j2\pi \frac{((n' - P/2)\Delta x'')^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \times \text{DFT} \left\{ \begin{array}{l} a((i' - P/2)\Delta x'; x, r) \times \exp\{j\pi(i' - P/2)\} \\ \times \exp\left\{j2\pi \frac{((i' - P/2)\Delta x')^2}{\lambda \tilde{r}}\right\} \end{array} \right\}$$

with  $n' = 0, \dots, P - 1$

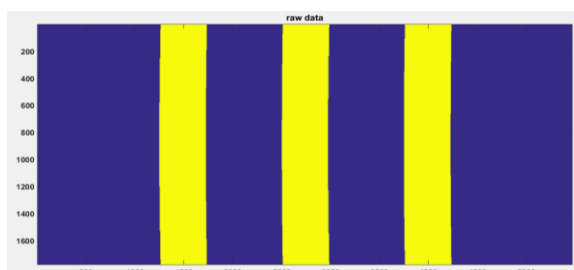
سیگنال جابجا شده  $a((i' - P/2)\Delta x'; x, r)$  با مقادیر یکسان برای هر نمونه می‌باشد. با مقایسه رابطه ۲۲ با رابطه ۲۰ مشخص می‌گردد که برای استفاده از DFT به شکل بهینه، علاوه بر ضرب‌های مختلط ارائه شده در رابطه ۲۰، به ضرایب مختلط دیگری (همان ضرایب تصحیح) نیاز می‌باشد. جهت مقایسه بهتر رابطه ۲۰ با رابطه ۲۲ و تشخیص ضرایب تصحیح، متغیرهای  $i'$  و  $n'$  در رابطه ۲۲ برحسب  $i$  و  $n$  در رابطه ۲۳ بیان می‌شوند.

<sup>1</sup> Shifted



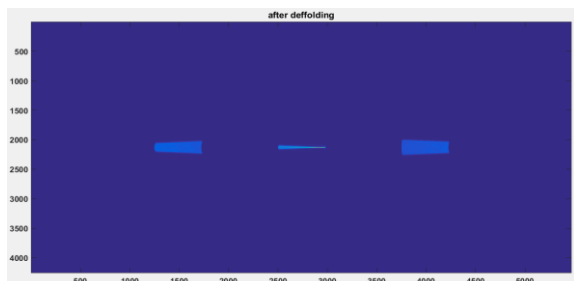
رابطه ۲۴ متمرکزسازی کل منطقه تصویربرداری را تضمین می‌کند.

در ادامه داده‌های خام راداری، خروجی بخش فشرده‌سازی حجیم، تصویر سار حاصل و پروفایل‌های برد و سمت هر یک از اهداف با احتساب ضرایب تصحیح در پیاده‌سازی رویکرد تمرکز دومرحله‌ای به ترتیب در شکل (۵) تا شکل (۱۰) (محورهای عمودی و افقی به ترتیب نشان‌دهنده نمونه‌ها در راستای سمت و برد می‌باشند) نمایش داده شده‌اند. همچنین نتایج تفسیر پروفایل‌های برد و سمت هر یک از اهداف در جدول (۲) درج شده‌اند.



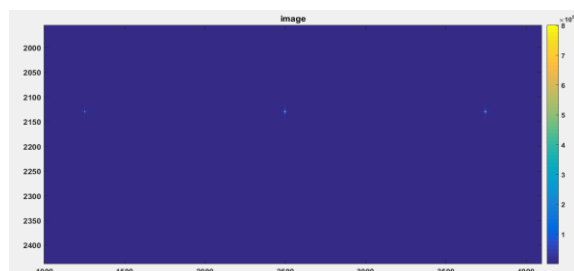
شکل (۵). اندازه مربوط به داده‌های خام راداری در حالت نورافکن

از شکل (۵)، مشخص است که به خاطر چرخش بیم آنتن، همواره از تمام اهداف اکو دریافت می‌شود و همین موضوع سبب تاخوردگی طیف فرکانس می‌شود.



شکل (۶). خروجی گام اول در رویکرد تمرکز دومرحله‌ای (بخش فشرده‌سازی حجیم و حذف تاخوردگی طیف)

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، به علت نزدیکی برد اریب هدف واقع در وسط سناریو تصویربرداری با برد  $\bar{r}$ ، اثر فشرده‌سازی سمت در این هدف نسبت به سایر اهداف، بیشتر مشاهده می‌گردد.



شکل (۷). تصویر سار متمرکز شده مربوط به سه هدف نقطه‌ای

می‌باشد. خروجی بخش فشرده‌سازی حجیم (بخش اول رویکرد تمرکز دومرحله‌ای) به الگوریتم برد-دایر، به‌عنوان هسته پردازش سیگنال اعمال می‌شود. پارامترهای جدول (۱) مطابق با پارامترهای سامانه SIR-C [۱۵] انتخاب شده‌اند. در ادامه پروفایل‌های سمت و برد در تصویر نهایی جهت محاسبه حد تفکیک اکتسابی و PSLR<sup>۱</sup> نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که پهنای 3dB هریک از پروفایل‌ها به‌عنوان حد تفکیک در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۱). پارامترهای سیستمی و سایر مشخصات شبیه‌سازی

مقادیر	پارامترها
1620 HZ	فرکانس نمونه‌برداری سمت
7260 m/s	سرعت مؤثر ماهواره
0.0565816 m	طول موج
8.4441854 $\mu$ s	طول پالس
20.0377808 MHz	پهنای باند سیگنال چیرپ ارسال
56.246400 MHz	فرکانس نمونه‌برداری برد
12.1000004 m	طول آنتن در راستای سمت
$r_m = 296.21km$	برد نزدیک در منطقه تصویربرداری
$r_0 = 299.86km$	برد میانی در منطقه تصویربرداری
$r_M = 303.50km$	برد دور در منطقه تصویربرداری
7976 m	طول مسیر پرواز
298.821km	$\bar{r}$

فاکتور افزایش نمونه‌برداری از داده‌های خام یا به عبارتی

$$\left[ \frac{L}{\Delta x'} - 1 \right] \text{ حدود } 33 \text{ درصد است. } X_I = 7976m, \text{ محدوده}$$

برد اریب  $\Delta r = 13.334km$  و برد اریب در فواصل نزدیک، میانی و دور به ترتیب برابر با  $r_0 = 299.235km$ ،  $r_m = 292.568km$  و  $r_M = 305.902km$  می‌باشند. مقدار انتخابی برای پارامتر  $\bar{r}$  برابر با  $298.821km$  می‌باشد. بر اساس مباحث مطرح‌شده در بخش ۴، می‌توان کمینه و بیشینه برد اریب را در لبه‌های تصویر که افتی (افت قدرت حد تفکیک) در آنجا وجود ندارند، طبق رابطه ۱۹ به شرح زیر محاسبه کرد [۱۵]:

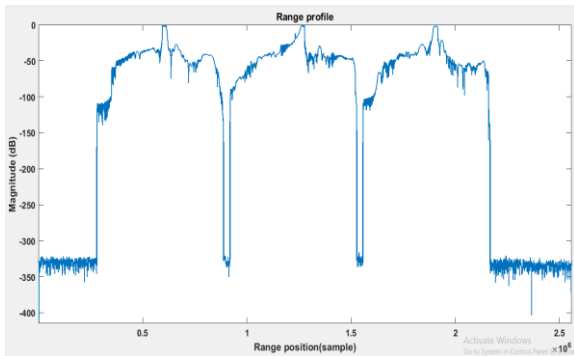
$$\begin{aligned} r'_m &= 282.361km < r_m \\ r'_M &= 317.319km > r_M \end{aligned} \quad (24)$$

جدول (۲). نتایج مربوط به تفسیر پروفایل‌های اهداف نقطه‌ای در حالت نورافکن

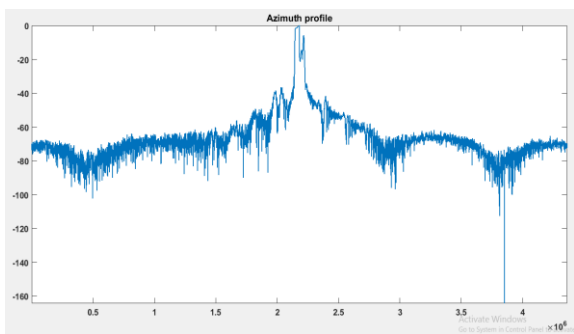
هدف	هدف	هدف	مقادیر تئوری در برد نزدیک، میانی و دور	
مستقر	مستقر	مستقر	6.6325, 6.6325, 6.6325	حد تفکیک برد(متر)
در برد دور	در برد میانی	در برد نزدیک	.9194, .9404, .9613	حد تفکیک سمت(متر)
13.3dB	13.64dB	13.17dB	13.26dB	در راستای برد
13.61dB	13.47dB	13.34dB	13.26dB	در راستای سمت

با مقایسه مقادیر جدول (۲) مشاهده می‌گردد که مقادیر حاصل از تفسیر پروفایل‌های برد و سمت اهداف شبیه‌سازی شده با مقادیر تئوری تطابق دارد.

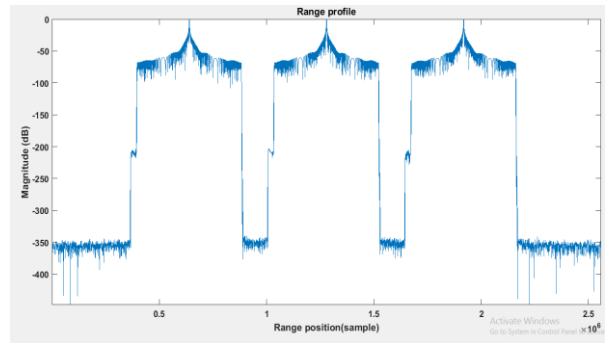
جهت مشاهده اعوجاج ناشی از عدم احتساب ضرایب تصحیح در پیاده‌سازی رویکرد تمرکز دومرحله‌ای، در ادامه پردازش سیگنال سه هدف نقطه‌ای مذکور بدون احتساب ضرایب تصحیح انجام شده است و پروفایل برد و سمت اهداف بررسی می‌شوند.



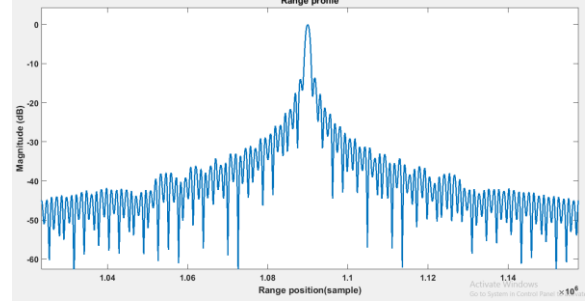
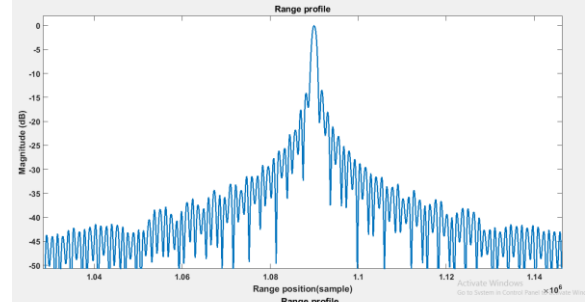
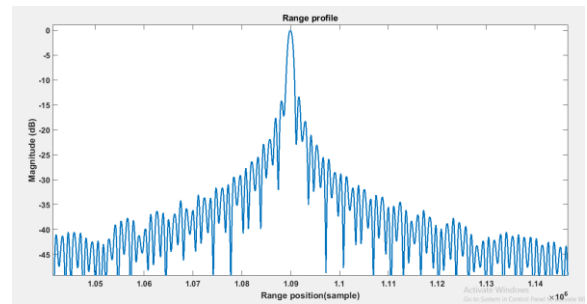
شکل (۱۱). پروفایل برد مربوط به سه هدف نقطه‌ای بدون احتساب ضرایب تصحیح



شکل (۱۲). پروفایل سمت مربوط به هدف میانی بدون احتساب ضرایب تصحیح

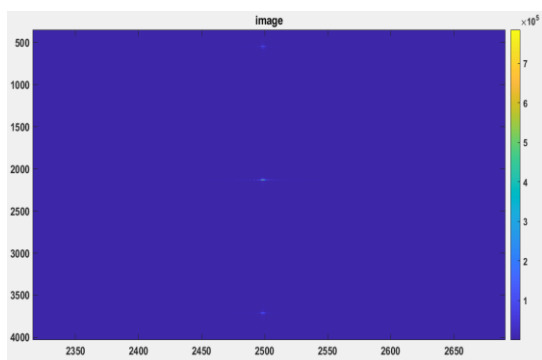


شکل (۸). پروفایل برد مربوط به سه هدف نقطه‌ای

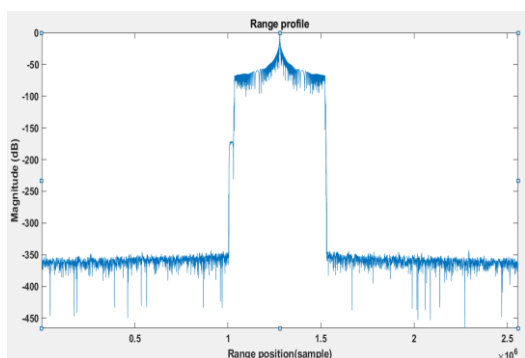


شکل (۹). بزرگنمایی شده پروفایل برد مربوط به سه هدف نقطه‌ای (شکل‌ها به ترتیب از بالا به پایین مربوط به برد نزدیک، برد میانی و برد دور می‌باشند)

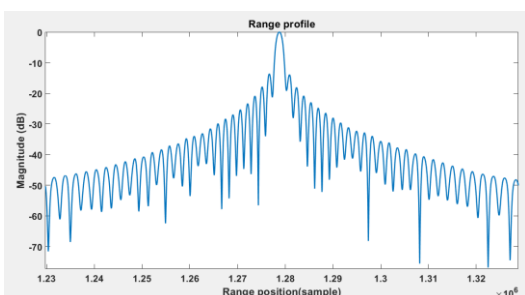
شکل (۱۰). پروفایل سمت مربوط به هدف میانی



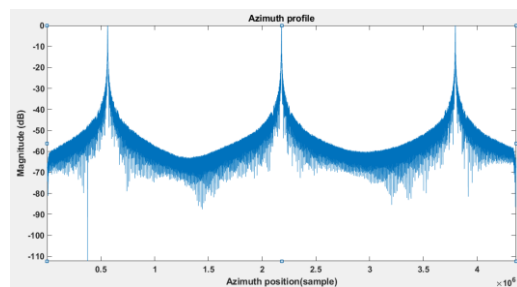
شکل (۱۵). تصویر سار متمرکز شده مربوط به سه هدف نقطه‌ای



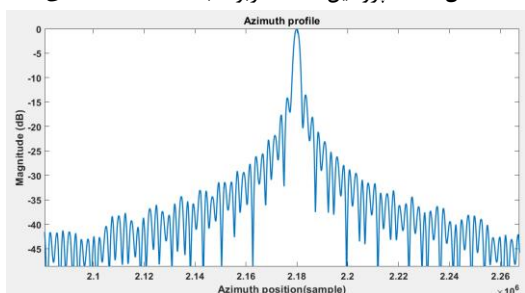
شکل (۱۶). پروفایل برد مربوط به هدف میانی



شکل (۱۷). بزرگنمایی شده پروفایل برد مربوط به هدف میانی



شکل (۱۸). پروفایل سمت مربوط به سه هدف نقطه‌ای

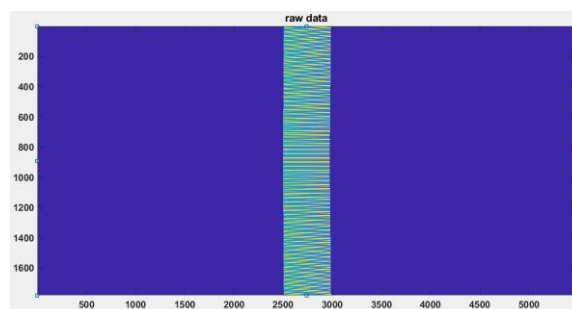


شکل (۱۹). بزرگنمایی شده پروفایل سمت مربوط به هدف میانی

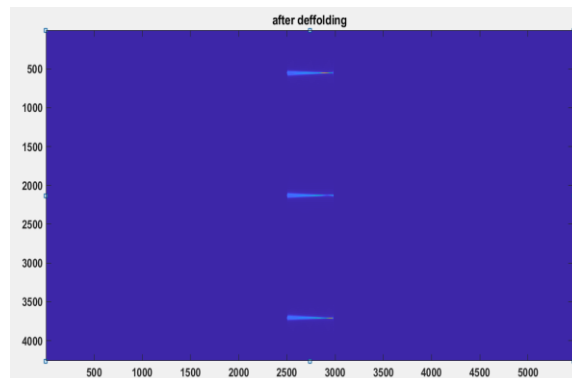
اعوجاج ناشی از عدم احتساب ضرایب تصحیح (ضرایب  $\exp\{j\pi(\mathbf{n} + P/2)\}$  و  $\exp\{j\pi i\}$  در بلوک دیاگرام شکل ۳) در پروفایل‌های برد و سمت در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، قابل مشاهده می‌باشد.

از آنجایی که حذف تاخوردگی طیف داده‌ها، قبل از هر پردازش سیگنالی در راستای برد و سمت انجام می‌شود، عدم احتساب ضرایب تصحیح در حذف تاخوردگی طیف داده‌ها، سبب افت قدرت حد تفکیک در هر یک از پروفایل‌های برد و سمت می‌گردد.

در ادامه شبیه‌سازی دیگری با پارامترهای مشابه با جدول (۱) با سه هدف نقطه‌ای که در راستای برد در یک مکان (وسط سناریو تصویربرداری) قرار گرفته‌اند اما موقعیت آن‌ها در راستای سمت (دو هدف کناری از هدفی که در وسط سناریو تصویربرداری قرار دارد به اندازه نصف پهناى بیم آنتن در راستای سمت فاصله دارند) متفاوت می‌باشد، انجام شده است. داده‌های خام راداری، خروجی بخش فشرده‌سازی حجیم، تصویر سار حاصل و پروفایل‌های برد و سمت هر یک از اهداف با احتساب ضرایب تصحیح در پیاده‌سازی رویکرد تمرکز دومرحله‌ای به ترتیب در شکل (۱۳) تا شکل (۱۹) (محورهای عمودی و افقی به ترتیب نشان‌دهنده نمونه‌ها در راستای سمت و برد می‌باشند) نمایش داده شده‌اند. همچنین نتایج تفسیر پروفایل‌های برد و سمت هر یک از اهداف در جدول (۳) درج شده‌اند.



شکل (۱۳). اندازه مربوط به داده‌های خام راداری در حالت نورافکن



شکل (۱۴). خروجی گام اول در رویکرد تمرکز دومرحله‌ای (بخش فشرده‌سازی حجیم و حذف تاخوردگی طیف)

گویای این مسئله می‌باشد که کاربرد ضرایب تصحیح، هیچ اثر منفی روی کیفیت تصویر استخراج شده ندارد.

## ۷- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه رویکرد تمرکز دومرحله‌ای یک رویکرد کارا برای برطرف نمودن تاخوردگی طیف فرکانسی در حالت نورافکن و متمركزسازی داده‌های خام راداری می‌باشد، تشریح استفاده از آن یک قابلیت عمده در پردازش داده‌های سار ایجاد می‌کند. علاوه بر این، رویکرد تمرکز دومرحله‌ای قابلیت استفاده در انواع حالت‌های تصویربرداری از قبیل نورافکن، نورافکن لغزنده، سار جاروبی و تاپس<sup>۳</sup> را جهت پردازش داده‌های خام راداری داراست [۲۱]؛ لذا بیان جزییات پیاده‌سازی این رویکرد، می‌تواند به‌عنوان گامی مهم در پردازش داده‌های خام راداری انواع حالت‌های تصویربرداری تلقی شود. همان‌طور که در تشریح رویکرد تمرکز دومرحله‌ای در مراجع مختلف ذکر شده است، پارامترهای آزاد طوری تعیین می‌گردند که علاوه بر اجتناب از کدهای SCFT، امکان استفاده از کدهای تبدیل فوریه سریع به‌طور بهینه وجود داشته باشد. اما هیچ‌یک از مراجع مربوطه، نحوه استفاده از کدهای تبدیل فوریه سریع را تشریح نکرده‌اند و تنها به ذکر این نکته که باید تغییراتی در روابط شامل کدهای DFT صورت بگیرد تا امکان استفاده از کدهای تبدیل فوریه سریع فراهم آید، بسنده نموده‌اند. در این مقاله، ضمن ارائه تغییرات لازم، شبیه‌سازی‌هایی انجام شده است که علاوه بر کارایی رویکرد تمرکز دومرحله‌ای در متمركزسازی داده‌های خام راداری، اهمیت احتساب ضرایب تصحیح در پیاده‌سازی رویکرد تمرکز دومرحله‌ای را نشان می‌دهد.

## ۸- مراجع

- [1] W. G. Carrara, "Spotlight Synthetic Aperture Radar," Signal Processing Algorithms, 1995.
- [2] C. V. Jakowatz, D. Wahl, P. Eichel, D. C. Ghiglia, & P. A. Thompson, "Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach," Norwell, MA: Kluwer Academic, 1996.
- [3] D. C. Munson, J. D. O'Brien, & W. K. Jenkins, "A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar," Proceedings of the IEEE, vol. 71, no. 8, pp. 917-925, 1983.
- [4] D. L. Mensa, S. Halevy, & G. Wade, "Coherent Doppler tomography for microwave imaging," Proceedings of the IEEE, vol. 71, no. 2, pp. 254-261, 1983.
- [5] M. D. Desai & W. K. Jenkins, "Convolution backprojection image reconstruction for spotlight mode synthetic aperture radar," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 1, no. 4, pp. 505-517, 1992.

جدول (۳). نتایج مربوط به تفسیر پروفایل‌های اهداف نقطه‌ای در حالت نورافکن

هدف	هدف	هدف	مقادیر تئوری در برد نزدیک، میانی و دور	
مستقر	مستقر	مستقر		
در برد دور	در برد میانی	در برد نزدیک		
۶/۷۵	۶/۷۵	۶/۷۵	۶/۶۳، ۶/۶۳، ۶/۶۳	حد تفکیک (برد(متر)
۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴، ۰/۹۴، ۰/۹۴	حد تفکیک سمت(متر)
۱۳/۸۲ dB	۱۳/۹۳ dB	۱۳/۹۲ dB	۱۳/۲۶ dB	PSLR در راستای برد
۱۳/۰۳ dB	۱۳/۴۸ dB	۱۳/۰۵ dB	۱۳/۲۶ dB	PSLR در راستای سمت

با مقایسه مقادیر جدول (۳) مشاهده می‌گردد که مقادیر حاصل از تفسیر پروفایل‌های برد و سمت اهداف شبیه‌سازی شده با مقادیر تئوری تطابق دارند.

شبیه‌سازی را برای هر سناریو تصویربرداری (تعداد دلخواه اهداف و موقعیت‌های مکانی متفاوت در راستای برد و سمت) می‌توان انجام داد و به نتایج مشابهی دست یافت.

همچنین لازم به ذکر است که رویکرد تمرکز دومرحله‌ای، تأثیری بر میزان نویز اسپکل<sup>۱</sup> نخواهد داشت. همان‌طور که میدانیم رادار سار یک سامانه تصویربرداری همدوس است و هر پیکسل از تصویر راداری، نشان‌دهنده جمع همدوس پراکنده سازها<sup>۲</sup> از یک سلول حد تفکیک مربوطه می‌باشد. این پراکنده سازها بسته به فازشان می‌توانند به‌صورت سازنده یا مخرب تداخل کنند. لذا در اثر این تداخل سازنده یا مخرب، در تصاویر سار پیکسل‌های روشن و یا تاریکی ایجاد می‌شوند و حتی برای مناطق همگن، اثری ناهموار در تصویر ایجاد می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که نویز اسپکل مربوط به ذات تصویربرداری راداری می‌باشد [۱۶]. پردازش سیگنال داده‌های خام راداری ارائه شده در این مقاله، اثری روی نویز اسپکل ندارد. این ضرایب تصحیح مربوط به بخشی از پیاده‌سازی رویکرد تمرکز دومرحله‌ای می‌باشد و سبب افزایش یا کاهش در اصل رویکرد تمرکز دومرحله‌ای نمی‌شوند. به کار بردن این ضرایب تصحیح هیچ اثر منفی روی کیفیت تصویر سار استخراج شده ندارد و البته این امر در شبیه‌سازی و توسط پارامترهای حد تفکیک و نسبت لوب اصلی به لوب فرعی تابع ابهام نشان داده شده است. نزدیک بودن مقادیر تئوری و به دست آورده شده در شبیه‌سازی با احتساب ضرایب تصحیح برای حد تفکیک در هر دو راستا (برد و سمت)

<sup>3</sup> Terrain Observation by Progressive Scans

<sup>1</sup> Speckle noise

<sup>2</sup> Scatterer

- [14] M. Sack, M. R. Ito, & I. G. Cumming, "Application of efficient linear FM matched filtering algorithms to synthetic aperture radar processing," Proc. Inst. Elect. Eng., pt. F, vol. 132, pp. 45-57, 1985.
- [15] R. Lanari, M. Tesauro, E. Sansosti, & G. Fornaro, "Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 9, pp. 1993-2004, 2001.
- [16] I. G. Cumming & F. H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation," Norwood, MA: Artech House, 2004.
- [17] R. Lanari, S. Zoffoli, E. Sansosti, G. Fornaro, & F. Serafino, "New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing," IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, vol. 148, no. 6, pp. 363-372, 2001.
- [18] G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti, & M. Tesauro, "A two-step spotlight SAR data focusing approach," in IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120), vol. 1, IEEE, pp. 84-86, 2000.
- [19] A. Ossowska & R. Speck, "Hybrid strip-map/spotlight mode processing based on chirp scaling processing," in 2008 International Radar Symposium, IEEE, pp. 1-4, 2008.
- [20] W. Guodong, "A deramp chirp scaling algorithm for processing spaceborne spotlight SAR data," in ICMMT 4th International Conference on, Proceedings Microwave and Millimeter Wave Technology, 2004, IEEE, pp. 659-663, 2004.
- [21] W. Yang, J. Chen, H. Zeng, J. Zhou, P. Wang, & C.-S. Li, "A novel three-step image formation scheme for unified focusing on spaceborne SAR data," Progress In Electromagnetics Research, vol. 137, pp. 621-642, 2013.
- [6] W. Ye, T. S. Yeo, C. B. Zhang, & Y. H. Lu, "Correction of geometric distortion in spotlight synthetic aperture imagery," Int. J. Remote Sensing, vol. 20, pp. 979-992, 1999.
- [7] C. PRATI, A. MONTI GUARNIERI, & F. ROCCA, "Spot mode SAR focusing with the  $\omega$ -K technique," in Remote sensing: global monitoring for earth management, Espoo, June 3-6, 1991, 1990.
- [8] R. Lanari, P. Franceschetti, M. Tesauro, & E. Sansosti, "Spotlight SAR image generation based on strip mode focusing techniques," in IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No. 99CH36293), vol. 3, IEEE, pp. 1761-1763, 1999.
- [9] M. Y. Jin, "High quality spotlight SAR processing algorithm designed for LightSAR mission," in IGARSS'97. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development, vol. 1, IEEE, pp. 477-480, 1997.
- [10] J. Mittermayer, A. Moreira, & O. Loffeld, "Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, no. 5, pp. 2198-2214, 1999.
- [11] C. Cafforio, C. Prati, & F. Rocca, "SAR data focusing using seismic migration techniques," IEEE transactions on aerospace and electronic systems, vol. 27, no. 2, pp. 194-207, 1991.
- [12] R. Lanari, "A new method for the compensation of the SAR range cell migration based on the chirp z-transform," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, no. 5, pp. 1296-1299, 1995.
- [13] R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, & F. H. Wong, "Precision SAR processing using chirp scaling," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 32, no. 4, pp. 786-799, 1994.