

حذف کلاتر در رادار هواپایه با استفاده از اطلاعات معین فضای کلاتر و روش حوزه مستقیم داده

احسان رضاقلی زاده^{۱*}، محمدعلی سبط^۲

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت: ۹۳/۰۸/۱۳، پذیرش: ۹۴/۰۸/۰۹)

چکیده

برای حذف کلاتر در رادارهای هواپایه از پردازش وقتی مکان-زمان استفاده می‌شود. با توجه به نیاز این الگوریتم به تخمین ماتریس کواریانس، تعداد داده‌های کمکی محدود و حجم بالای پردازش مورد نیاز، روش‌هایی نظیر استفاده از فضای معین کلاتر و حوزه مستقیم داده در این مقاله استفاده شده است. در روش اول با تخمین پارامترهای رادار هواپایه و محاسبه ماتریس تداخل، ضرایب فیلتر محاسبه می‌شود. همچنین حساسیت عملکرد این روش نسبت به پارامترهای تخمین زده شده به دست می‌آید. در ادامه با توسعه فضای کلاتر، عملکرد این روش نسبت به خطای تخمین برخی از پارامترها مقاوم می‌گردد. در روش حوزه مستقیم داده با کاهش ابعاد فیلتر، معادلات کمکی لازم برای محاسبه بردار ضرایب به دست می‌آید. برای بهبود عملکرد این روش، راه‌حلی نظیر افزایش مرتبه فیلتر و کمک گرفتن از فضای معین کلاتر ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی

پردازش وقتی مکان-زمان، رادار هواپایه، فضای معین کلاتر، روش حوزه مستقیم داده

۱. مقدمه

روش به روش مؤلفه اصلی^۴ مشهور است [۳-۴]. در این روش با نگه داشتن بردار ویژه‌های اصلی ماتریس کواریانس تداخل، تداخل در زیرفضای مرتبه پایین‌تری محدود می‌شود. معیار تقاطع طیفی^۵، یکی دیگر از روش‌هایی است که اساس آن تجزیه بردار ویژه است [۵-۶]. مرتب‌سازی مرتبه در روش CSM بر خلاف PC، وابسته به سیگنال است. هر دو روش PC و CSM، به دلیل تجزیه طیفی، بار محاسباتی زیادی دارند. در این مقاله به بررسی روش‌هایی پرداخته می‌شود که بر خلاف روش‌های ذکر شده برای به دست آوردن ضرایب فیلتر از داده‌های سلول مجاور استفاده نمی‌کند. در بخش دو کلیات رادار هواپایه معرفی می‌شود. در بخش سه فضای معین کلاتر برای محاسبه بردار ضرایب معرفی می‌شود. در این بخش حساسیت روش مطرح شده نسبت به خطای تخمین پارامترهای رادار مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از ایده توسعه فضای کلاتر

یکی از وظایف رادارهای مراقبت هواپایه، تشخیص اهداف متحرک در یک محیط تداخل شامل کلاتر و جمر است. پردازش وقتی مکان-زمان^۱ برای این منظور توسط برنان^۲ مطرح شد [۱]. بار محاسباتی STAP تمام مرتبه به خاطر وجود عملیات ماتریس معکوس از مرتبه $O(M^3)$ است. که M مرتبه فیلتر است. به علاوه با افزایش مرتبه فیلتر تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای تخمین ماتریس کواریانس افزایش می‌یابد. به طور نمونه تعداد نمونه لازم برای افت عملکرد ۳ dB نسبت به حالت بهینه، دو برابر ابعاد فیلتر است. برای حل دو مشکل مطرح شده روش‌های مختلف کاهش مرتبه بیان شده‌اند. وارد^۳، روش‌های تجزیه‌کننده کاهش مرتبه را معرفی کرد [۲]. اولین روش آماری کاهش مرتبه، بر اساس تجزیه بردار ویژه ماتریس کواریانس تداخل می‌باشد. این

* رایانامه نویسنده پاسخگو: ehsanrezagholizadeh@gmail.com

^۱ Space-Time Adaptive Processing (STAP)

^۲ Brennan

^۳ Ward

^۴ Principal component (PC)

^۵ Cross-Spectral Metric (CSM)

۱-۲. مدل کلاتر

برای سادگی بازتابش دریافتی از زمین را به صورت مجموعه N_p بازتابش دریافتی از N_p قطعه کلاتر که همگی در فاصله مشابه قرار گرفته‌اند، در نظر می‌گیریم. فرض می‌شود که این N_p قطعه کلاتر به‌طور ذاتی ایستاد هستند. سرعت نسبی کلاتر و رادار تنها به سرعت و جهت سکوی متحرک بستگی دارد. در این صورت ماتریس تداخل کلاتر به صورت زیر است [۷]:

$$\mathbf{R}_c = \sum_{k=1}^{N_p} P_{ck} \left[\mathbf{s}(v_t(\phi_k), \varpi_t(\phi_k)) \right] \left[\mathbf{s}(v_t(\phi_k), \varpi_t(\phi_k)) \right]^H \quad (5)$$

$$\xi_{ck} = \frac{P_{ck}}{\sigma^2}$$

که در آن σ قدرت نویز، ϕ_k زاویه افق مربوط به قطعه k -ام کلاتر و ξ_{ck} نسبت تداخل به نویز برای قطعه k -ام است.

۲-۲. پردازش بهینه سیگنال رادار

برای تشخیص وجود هدف، سلول فاصله توسط شکل‌دهنده پرتو دوبعدی (به منظور دستیابی به بیشینه SINR خروجی) مورد پردازش واقع می‌شود. $\mathbf{y} = \mathbf{W}^H \mathbf{r}$ خروجی الگوریتم STAP است که در آن \mathbf{W} ضرایب STAP می‌باشد. ضرایب بهینه الگوریتم تمام مرتبه توسط بهینه‌سازی نامقید نسبت سیگنال به تداخل به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۷]:

$$\mathbf{w}_{opt} = k \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s} \quad (6)$$

که در آن، k ثابت اختیاری غیر صفر است. جواب مسئله بهینه‌سازی مقید برای بیشینه کردن SINR به شرط بهره واحد در راستای هدف، به‌صورت زیر است:

$$\mathbf{w}_{opt} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}} \quad (7)$$

۳. استفاده از اطلاعات معین فضای کلاتر

اگر پارامترهای رادار هواپایه از جمله سرعت، ارتفاع، توزیع پستی بلندی زمین و زاویه سکوی متحرک و آرایه را به‌طور دقیق بدانیم، فیلتری که سیگنال به تداخل را بیشینه کند از رابطه (۷) به‌دست می‌آید. چرا که با دانستن پارامترهای رادار هواپایه می‌توان ماتریس تداخل را مطابق رابطه (۵) محاسبه کرد. در روش اطلاعات فضای معین کلاتر به‌جای تخمین ماتریس تداخل از روی داده‌های کمکی، ابتدا پارامترهای رادار را تخمین زده و از روی پارامترهای تخمین‌زده شده ماتریس تداخل محاسبه می‌شود. این روش زمانی به‌کار می‌رود که داده‌های کمکی کافی برای تخمین ماتریس تداخل در دسترس نباشد یا محیط ناهمگن باشد. برای بررسی این روش، فرض می‌کنیم که تمامی پارامترها به غیر از یکی از آن‌ها را به‌طور دقیق می‌دانیم. با تغییر خطای تخمین هر پارامتر، افت عملکرد مربوط به آن پارامتر محاسبه می‌شود. پارامترهای شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ انتخاب می‌شوند.

حساسیت روش مطرح شده نسبت به خطای تخمین پارامترها کاهش داده می‌شود. در بخش چهارم از روش حوزه مستقیم داده برای محاسبه بردار ضرایب استفاده می‌شود. در صورت وجود جمر، روش حوزه مستقیم داده بر خلاف روش فضای معین کلاتر کارآمد است. برای بهبود عملکرد این روش، مرتبه فیلتر افزایش می‌یابد. در نهایت در بخش پنجم با تلفیق روش فضای معین کلاتر و حوزه مستقیم داده به عملکرد بالاتری خواهیم رسید. روش‌های مطرح‌شده در این مقاله زمانی کارآمدند که داده‌های کمکی کافی موجود نباشد و یا محیط ناهمگن باشد.

۲. کلیات رادار هواپایه

سامانه مورد نظر رادار پالس داپلر است که در یک سکوی هواپایه واقع شده است. آنتن رادار شامل یک آرایه خطی با فاصله مساوی با N المان است. بازتابش دریافتی در طول یک CPI شامل M پالس جمع‌آوری می‌شود. پردازش بر روی یک سلول فاصله مورد نظر انجام می‌گیرد. $\mathbf{r}(i)$ با ابعاد $1 \times MN$ ، بردار مکان-زمان دریافتی در سلول فاصله i -ام است. عملکرد رادار در هر سلول فاصله تحت دو فرضیه H_0 به معنای عدم وجود هدف و H_1 به معنای وجود هدف است.

$$H_0: \mathbf{r}(i) = \mathbf{v}(i) \quad (1)$$

$$H_1: \mathbf{r}(i) = a\mathbf{s} + \mathbf{v}(i)$$

که در آن a متغیر مختلط تصادفی گوسی با واریانس σ_s^2 است. $\mathbf{v}(i)$ بیانگر مؤلفه تداخل است که شامل جمر $\mathbf{r}_j(i)$ ، کلاتر $\mathbf{r}_c(i)$ و نویز $\mathbf{r}_n(i)$ است. فرض می‌شود که این سه مؤلفه از یکدیگر مستقل است. لذا ماتریس کواریانس \mathbf{R} با ابعاد $MN \times MN$ ، به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$\mathbf{R} = E \{ \mathbf{v}(i) \mathbf{v}^H(i) \} = \mathbf{R}_n + \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_j \quad (2)$$

\mathbf{s} بردار نرمالیزه جهت‌دهی مکان-زمان با ابعاد $1 \times MN$ است که به‌صورت زیر مدل می‌شود:

$$\mathbf{s} = \mathbf{b}(\varpi_t) \otimes \mathbf{a}(v_t) \quad (3)$$

که بردار جهت نرمالیزه‌ی زمانی با ابعاد $1 \times M$ در فرکانس داپلر نرمالیزه‌ی هدف ϖ_t است. $\mathbf{a}(v_t)$ بردار جهت نرمالیزه‌ی مکانی با ابعاد $1 \times N$ در فرکانس مکانی نرمالیزه‌ی هدف v_t است. فرکانس مکانی نرمالیزه‌ی هدف و فرکانس داپلر نرمالیزه هدف به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

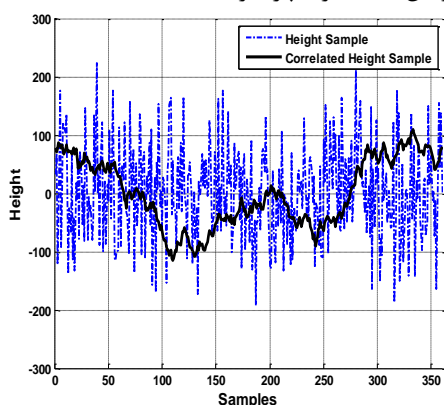
$$v_t = \frac{d}{\lambda} \sin(\phi) \cos(\theta) \quad \varpi_t = \frac{2v_r T}{\lambda} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، λ طول موج، d فاصله بین المان‌ها، T دوره زمانی تکرار پالس، ϕ زاویه افق و θ زاویه ارتفاع است.

ایجاد می‌شود. از آنجا که این نمونه‌ها مربوط به قطاع‌های شعاعی زمین است، همبستگی ایجاد شده باید به صورت چرخشی باشد. به‌عنوان مثال همبستگی بین نمونه اول و دوم برابر با همبستگی بین نمونه اول و آخر است. همبستگی بین نمونه‌ها در شبیه‌سازی مطابق رابطه (۷) انتخاب شده است. χ در این رابطه پارامتری است که میزان همبستگی نمونه‌ها را تنظیم می‌کند.

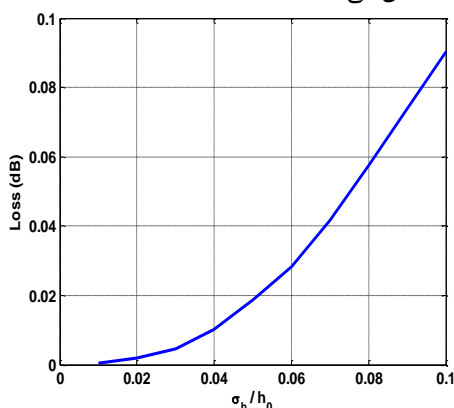
$$c(i) = e^{\chi \times \left[\left| i - \frac{N_p - 1}{2} \right| - \frac{N_p}{2} \right]} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، $c(i)$ همبستگی بین نمونه i و $i + z$ و $i - z$ پارامتری است که شدت میرایی همبستگی بین نمونه‌ها را مشخص می‌کند. در شکل ۲ عوارض زمین را بعد و قبل از ایجاد همبستگی نشان می‌دهد. با اعمال همبستگی بین نمونه‌ها هم پیوستگی سطح زمین حفظ شده و هم نمونه اول با نمونه آخر هم سطح است. در این شبیه‌سازی پارامتر $\chi = 0.005$ انتخاب شده است.



شکل ۲. شکل عوارض زمین قبل و بعد از ایجاد همبستگی بین نمونه‌ها با انحراف از معیار ۸۰ متر و پارامتر $\chi = 0.005$

برای محاسبه افت عملکرد، ماتریس تداخل قبل و بعد از اضافه کردن پستی و بلندی محاسبه می‌شود. ضرایب فیلتر برای هر دو حالت بر اساس زمین صاف محاسبه می‌شود. پستی و بلندی زمین با پارامتر $\chi = 0.005$ تولید شده و سایر پارامترها مطابق با جدول ۱ است. شکل ۳ افت عملکرد را به‌ازای انحراف از معیار پستی و بلندی σ_h زمین که به متوسط ارتفاع h_0 نرمالیزه شده است نشان می‌دهد.

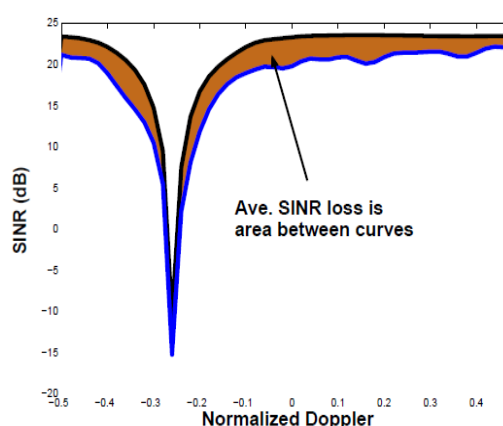


شکل ۳. افت عملکرد ناشی از عوارض زمین بر حسب σ_h / h_0

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

متغیرها	کمیت
ارتفاع هواپیما	۸۰۰۰ m
PRF	۱۰۰۰ Hz
تعداد المان‌های آرایه آنتن	۸
تعداد پالس‌ها در یک دوره CPI	۸
فاصله المان‌های آرایه	$\lambda/2$
سرعت هواپیما	۷۵ m/s
فاصله کلاتر از آرایه	۱۱۰۰۰ m

در حالت اول، با تخمین پارامتر مورد نظر و همچنین با فرض ایده‌آل بودن این تخمین، ماتریس تداخل و بردار ضرایب فیلتر مرتبط با آن محاسبه می‌شود. برای اعمال خطای تخمین زده عمل، عددی تصادفی دارای توزیع گوسی با پارامتر تخمین زده شده در حالت قبل جمع و در ادامه ماتریس تداخل برای این حالت نیز محاسبه می‌شود. با توجه به این نکته که ضرایب فیلتر استفاده‌شده در دو حالت یکسان در نظر گرفته شد، متوسط اختلاف منحنی‌های SINR بر حسب dB برای هر دو ماتریس تداخل، افت عملکرد در نظر گرفته می‌شود. در شکل یک، منحنی ایده‌آل که در قسمت بالاتری واقع شده، نسبت سیگنال به تداخل خروجی در ازای تغییر فرکانس داپلر در حالت مشخص بودن تمامی پارامترهای رادار را نشان می‌دهد. منحنی غیر ایده‌آل که در زیر منحنی ایده‌آل واقع شده، نسبت سیگنال به تداخل خروجی با فرض تخمین غیر ایده‌آل پارامترهای رادار را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی برخی از پارامترهای رادار هواپایه و خطای مربوط به آنها خواهیم پرداخت [۷].

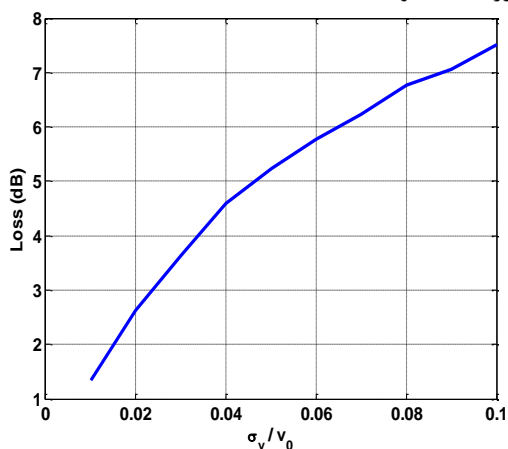


شکل ۴. متوسط‌گیری از نسبت سیگنال به تداخل خروجی

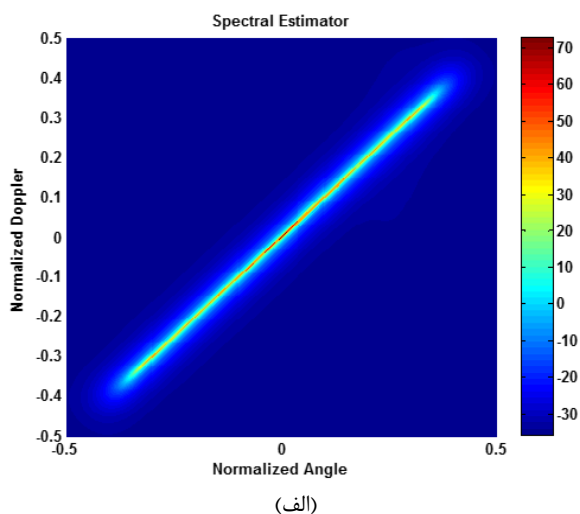
۳-۱. پستی و بلندی زمین

عوارض زمین از جمله پارامترهایی است که در تعیین فضای کلاتر نقش دارد. برای شبیه‌سازی عوارض زمین، یک حلقه روی زمین به فاصله R از رادار در نظر گرفته می‌شود. با تقسیم این حلقه به N_p قسمت، متغیری تصادفی با توزیع نرمال جهت نمونه‌های مختلف ارتفاع تولید شده و سپس بین این نمونه‌ها همبستگی

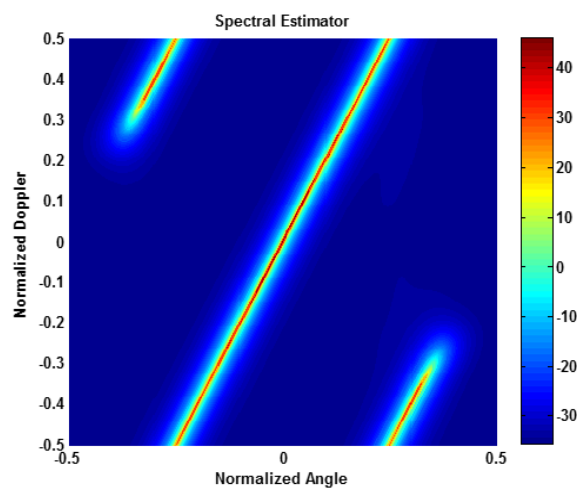
در آن قرار نداشته را تضعیف و در عوض فضایی که کلاتر در آن حضور داشته تقویت شده است.



شکل ۵. افت عملکرد فیلتر در ازای انحراف استاندارد خطای تخمین سرعت که به مقدار واقعی سرعت نرمالیزه شده (σ_v/v_0)



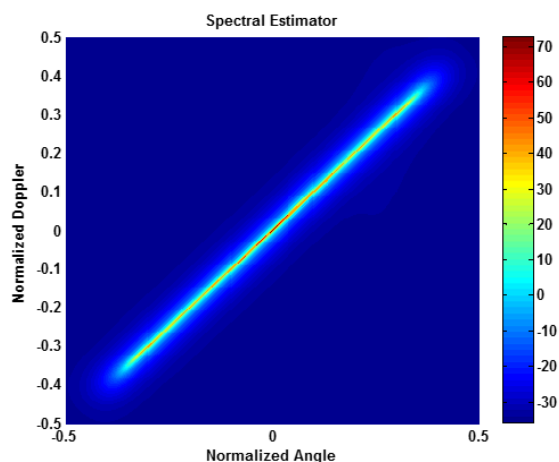
(الف)



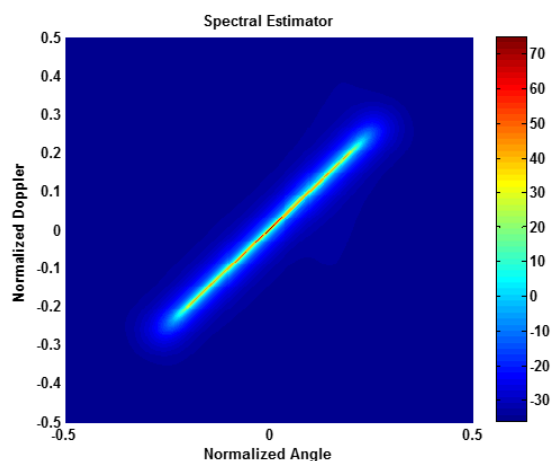
(ب)

شکل ۶. فضای کلاتر برای سرعت الف) ۷۵ متر بر ثانیه ب) ۱۵۰ متر بر ثانیه

همان طور که در شکل قبل مشاهده شد، افت عملکرد بسیار ناچیز است. می توان چنین ذکر نمود که تغییر ارتفاع، حالت خاصی از پستی بلندی های زمین است. در شکل ۴، ارتفاع کلاتر برای دو فاصله مختلف رسم شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، محل قرارگیری فضای کلاتر با تغییر ارتفاع تغییر نمی کند و فقط دچار انقباض و انبساط می شود.



(الف)



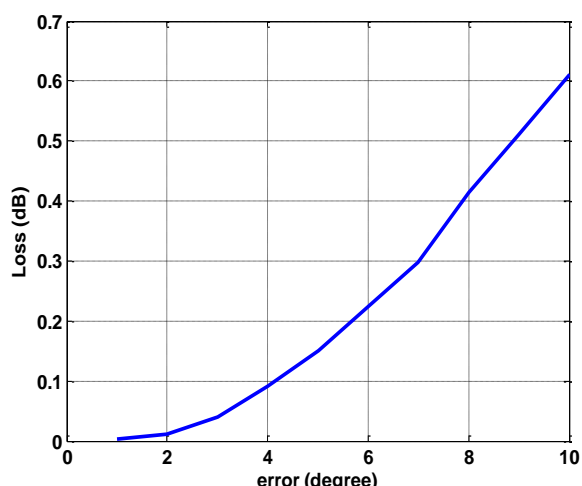
(ب)

شکل ۴. فضای کلاتر برای ارتفاع سکوی متحرک ۸۰۰۰ متر (شکل الف) فضای کلاتر برای ارتفاع سکوی متحرک ۱۰۰۰۰ متر (ب)

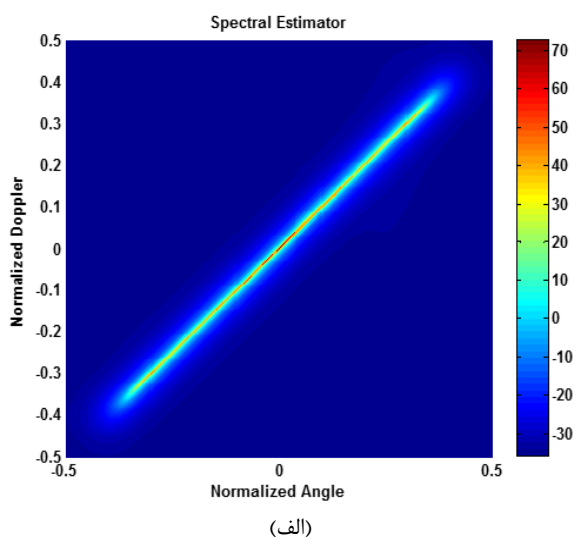
۲-۳. خطای تخمین سرعت سکوی متحرک

در این سناریو نیز فرض می کنیم تمامی پارامترها با حالت ایده آل یکسان بوده و فقط در تخمین سرعت سکوی متحرک خطا داشته ایم. شکل ۵ افت عملکرد فیلتری است که بر اساس تخمین غیر ایده آل سرعت به دست آمده است. منحنی (۵) در مقایسه با منحنی (۳) افت عملکرد شدیدتری دارد.

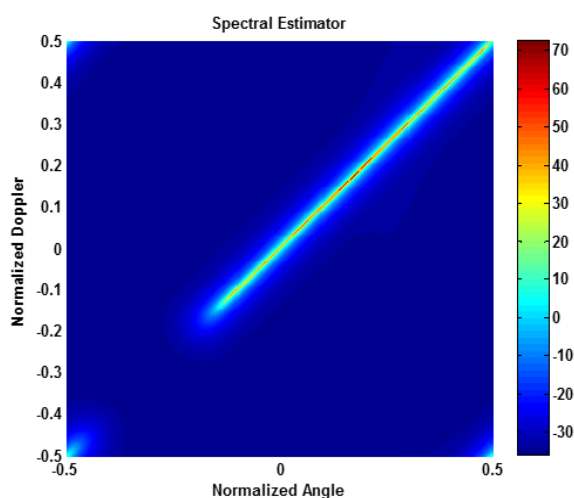
شکل ۶ فضای کلاتر را برای دو سرعت ۷۵ و ۱۵۰ متر بر ثانیه نشان می دهد. مشخص است که فضای کلاتر با تغییر سرعت جابه جا شده و این باعث می شود که با کوچکترین خطا در تخمین سرعت، افت عملکرد بالایی بوجود آید چراکه زیر فضایی که کلاتر



شکل ۸. افت عملکرد فیلتر در ازای خطای تخمین زاویه صعود سکوی متحرک



(الف)



شکل ۹. (الف) سرعت و آرایه همراستا و موازی سطح زمین (ب) زاویه صعود ۳۰ درجه

۳-۳. جبران خطای سرعت

برای جبران افت عملکرد خطای تخمین سرعت می‌توان فضای کلاتر را توسعه داد. در صورتی که خطای تخمین سرعت Δv باشد، فضای کلاتر را می‌توان مجموع وزن‌دار فضای کلاتر برای سرعت v_0 ، $v_0 + \Delta v$ و $v_0 - \Delta v$ در نظر گرفت. در شکل ۷ از روشی مشابه قبل استفاده شده است با این تفاوت که فضای کلاتر مجموع وزن‌دار به صورت رابطه (۹) محاسبه شده است.

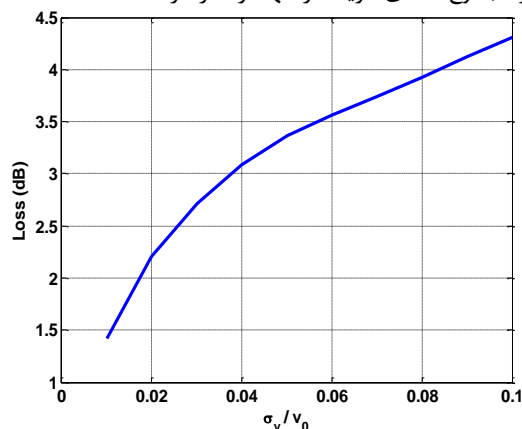
$$R_c = \frac{1}{2} R_{c_{-v=v_0}} + \frac{1}{4} R_{c_{-v=v_0+\Delta v}} + \frac{1}{4} R_{c_{-v=v_0-\Delta v}} \quad (9)$$

۳-۴. خطای تخمین زاویه سکوی متحرک

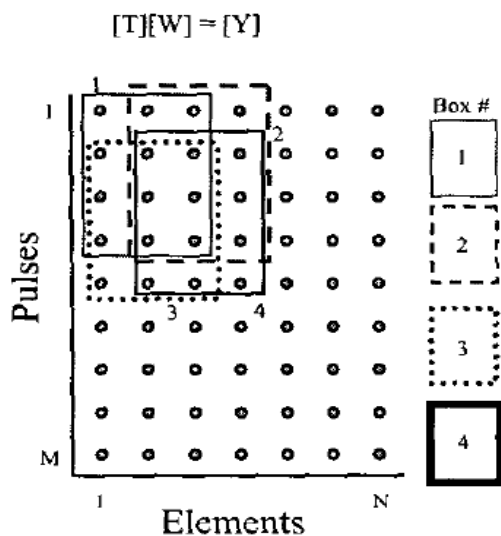
راستای سرعت و آرایه یکی دیگر از پارامترهایی است که فضای کلاتر را تعیین می‌کند. اگر سرعت و آرایه هم‌راستا بوده ولی موازی سطح زمین نباشند، فضای کلاتر به صورت خطی باقی‌مانده و در راستای خودش جابه‌جا می‌شود. این حالت زمانی رخ می‌دهد که سکوی متحرک به سمت بالا یا پایین صعود کند. شکل ۸ افت عملکرد در ازای زاویه صعود سکوی متحرک را نشان می‌دهد. به‌طور مشابه، از آنجا که محل قرارگیری فضای کلاتر با تغییر زاویه صعود تغییر شدیدی نمی‌کند (شکل ۹)، افت عملکرد در مقایسه با شکل ۵ بسیار کمتر است.

۳-۵. خطای توام تخمین پارامترهای رادار

در قسمت قبل به بررسی عوامل خطا پرداختیم. در شبیه‌سازی هر عامل فرض بر این بود که عوامل دیگر را به‌طور دقیق می‌دانستیم. در این قسمت فرض می‌کنیم تمام پارامترهای مطرح شده دارای درصدی خطا نسبت به مقدار ایده‌آل باشند. شکل ۱۰ دو منحنی خطای توأم و مجموع خطای تک تک پارامترها را برای زاویه صعود، عوارض زمین و سرعت سکوی متحرک نشان می‌دهد. از شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که خطای عوامل مختلف تاثیر کمی بر هم دارند. و لذا می‌توان خطای توأم آنها را برابر مجموع خطای هریک از آنها در نظر گرفت.



شکل ۱۰. افت عملکرد به ازای خطای تخمین سرعت سکوی متحرک با فضای کلاتر توسعه یافته



شکل 11. اطلاعات یک سلول فاصله [11]

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N_s} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2N_s} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{N_t,1} & x_{N_t,2} & \dots & x_{N_t,N_s} \end{bmatrix} - z_s^{-1} \begin{bmatrix} x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1(N_s+1)} \\ x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2(N_s+1)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{N_t,2} & x_{N_t,3} & \dots & x_{N_t(N_s+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \dots & \bar{x}_{1N_s} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \dots & \bar{x}_{2N_s} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \bar{x}_{N_t,1} & \bar{x}_{N_t,2} & \dots & \bar{x}_{N_t,N_s} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Converting a row vector $\rightarrow [\bar{x}_{11} \bar{x}_{12} \dots \bar{x}_{1N_s} \bar{x}_{21} \bar{x}_{22} \dots \bar{x}_{2N_s} \dots \bar{x}_{N_t,1} \bar{x}_{N_t,2} \dots \bar{x}_{N_t,N_s}]$

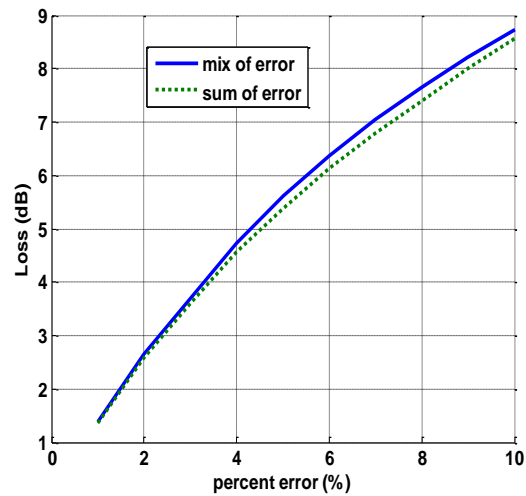
برای جلوگیری از حذف سیگنال مطلوب، بردار قید هدف را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$\mathbf{q} = [1 z_s \dots z_s^{N_s-1} z_t z_t z_s \dots z_t z_s^{N_s-1} \dots \dots z_t^{N_t-1} z_t^{N_t-1} z_s \dots z_t^{N_t-1} z_s^{N_s-1}] \quad (12)$$

بردار وزن دهی پردازش وفقی \mathbf{w} از حل معادله (13) به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix} \mathbf{w} = \mathbf{T} \mathbf{w} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{w} = (\mathbf{T}^H \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^H \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

تعداد درجات آزادی و تعداد معادلات (سطرهای ماتریس \mathbf{T})، دو پارامتری هستند که در خطای مسئله مینیمم‌سازی تأثیر دارند. تعداد درجات آزادی، حداکثر نسبت سیگنال به تداخل قابل دست‌یابی را مشخص می‌کند در حالی که تعداد معادلات، بیانگر میزان نزدیک شدن به حداکثر سیگنال به تداخلی است که توسط تعداد درجات آزادی تعیین شده است. برای حل یکتای معادله



شکل 10. خطای مجموع و مجموع خطای زاویه صعود، عوارض زمین و سرعت سکوی متحرک

4. روش حوزه مستقیم داده

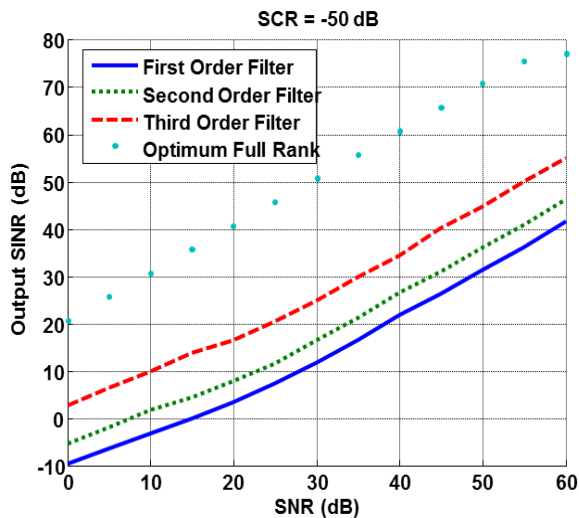
در صورتی که تخمین‌گر مناسبی از پارامترها در اختیار نباشد، می‌توان از روش حوزه مستقیم داده¹ استفاده کرد. با توجه به رابطه (1)، سیگنال دریافتی، تمام المان‌های آرایه در تمام دوره CPI دارای دامنه‌ای ثابت و اختلاف فازهایی مشخص است. بدین معنا که سیگنال دریافتی هر المان نسبت به همسایه خود دارای اختلاف فاز معینی است. $z_s = e^{j2\pi f_{sp}}$ اختلاف فاز از یک المان به المان دیگر و $z_t = e^{j2\pi f_d}$ اختلاف فاز بین یک پالس تا پالس بعدی است. برای تحقق روش D3 ابتدا بردار سیگنال دریافتی را به صورت (10) بازنویسی می‌کنیم. سطر z -ام از این ماتریس، بردار دریافتی از تمام آرایه در دوره زمانی z -ام است.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{MN} \end{bmatrix} \quad (10)$$

برای پیاده‌سازی روش D3 ابتدا یک پنجره با ابعاد $(N_t \times N_s)$ بر روی داده‌های دریافتی در نظر می‌گیریم. برای هر پنجره دسته معادلات $x_{11} - z_t^{-1} x_{21}, x_{11} - z_s^{-1} x_{12}, x_{11} - z_t^{-1} z_s^{-1} x_{22}$ محاسبه می‌شود تا هدف از مولفه دریافتی حذف شود و فضای تداخل خالص به دست آید. سطرهای ماتریس به دست آمده طبق رابطه (11) پشت سر هم چیده شده تا سطرهای ماتریس \mathbf{F} ایجاد گردد. با هر موقعیت قرارگیری پنجره، سه سطر از ماتریس \mathbf{F} ساخته می‌شود [10-18].

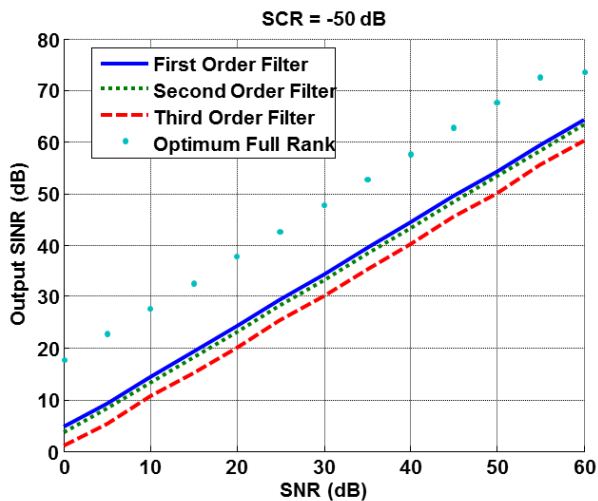
¹ Direct Data Domain (D3)

لازم برای حل بردار ضرایب به دست آید. ایده استفاده از فیلتر مرتبه دوم را می‌توان تعمیم داد. ضرایب فیلتر برای مرتبه‌های بزرگتر از یک، مطابق با ضرایب بسط دو جمله به دست می‌آید. در شکل (۱۳) تعداد المان‌ها ۱۰ و تعداد پالس‌ها ۱۲ است. در این حالت ابعاد پنجره در هر سه فیلتر مرتبه یک، دو و سه 6×6 انتخاب شده است. تعداد داده‌های کمکی در حالت مرتبه یک، ۷۲، دو، ۷۵ و سه، ۴۰ می‌باشد.



شکل ۱۳. مقایسه عملکرد فیلتر D3 برای فیلتر مرتبه یک، دو و سه با ۱۰ المان و ۱۲ پالس و ابعاد پنجره 6×6

در شکل ۱۴ عملکرد فیلتر را بر حسب مرتبه فیلتر برای تعداد المان‌های کمکی به ترتیب ۴۸، ۴۵ و ۲۰ برای فیلتر مرتبه یک، دو و سه می‌باشد. در این حالت بر خلاف شکل ۱۳، عملکرد فیلتر مرتبه یک بهتر از بقیه شده است.

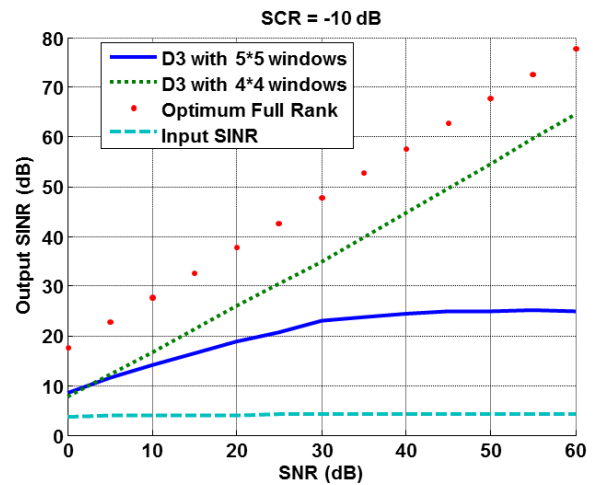


شکل ۱۴. مقایسه عملکرد فیلتر D3 برای فیلتر مرتبه یک، دو و سه با ۸ المان و ۸ پالس و ابعاد پنجره 4×4

(۱۳) باید تعداد معادلات (سطرهای ماتریس \mathbf{T}) حداقل برابر ابعاد بردار \mathbf{w} ، $N_t \times N_s$ باشد. افزایش ابعاد پنجره N_t و N_s موجب کاهش تعداد سطرهای ماتریس \mathbf{T} می‌شود. در صورتی که N_s عددی دلخواه و ثابت باشد، N_t از رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$N_t \leq \frac{3N \times M - 3N_s \times M + 1}{3N - 2N_s} \quad (14)$$

در شکل ۱۲ نسبت سیگنال به تداخل خروجی بر حسب نسبت سیگنال به نویز برای روش D3 با پنجره 5×5 و 4×4 رسم شده است. کلیه پارامترهای شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ است. نسبت سیگنال به تداخل -10 dB انتخاب شده است. منحنی بهینه تمام مرتبه با فرض معلوم بودن ماتریس کواریانس تداخل و استفاده از رابطه (۶) به دست آمده و منحنی بهینه، مربوط به روش بهینه با ابعاد کاهش یافته است. اگرچه انتخاب پنجره 5×5 باعث حداکثر شدن تعداد درجات آزادی می‌شود ولی تعداد معادلات با این پنجره ۲۷ است، که اندکی از ابعاد مسئله بیشتر می‌باشد. ولی از آنجا که تعداد معادلات برای پنجره 4×4 برابر ۴۸ است (سه برابر درجات آزادی معادلات کمکی داریم)، عملکرد آن نیز در مقایسه با پنجره 5×5 بهتر است.

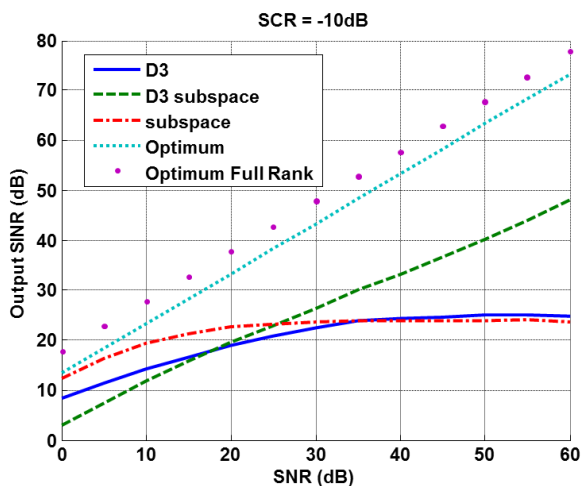


شکل ۱۲. نسبت سیگنال به تداخل خروجی بر حسب سیگنال به نویز با پنجره 3×6 و 5×5

۴-۱. استفاده از فیلتر با مرتبه بیشتر

به منظور افزایش عملکرد روش D3 افزایش مرتبه فیلتر را پیشنهاد می‌دهیم به این صورت که می‌توان به معادلات (۱۱) به چشم فیلتر مرتبه یک نگاه کرد. در فیلتر مرتبه دو، نیاز به جابه‌جایی پنجره به اندازه دو واحد است. برای هر پنجره دسته معادلات $x_{11} - 2z_t^{-1}x_{21} + z_t^{-2}x_{31}$ ، $x_{11} - 2z_s^{-1}x_{12} + z_s^{-2}x_{13}$ و $x_{11} - 2z_t^{-1}z_s^{-1}x_{22} + z_t^{-2}z_s^{-2}x_{33}$ محاسبه می‌شود. بنابراین در این حالت نسبت به فیلتر مرتبه یک تعداد سطرهای ماتریس \mathbf{F} کاهش می‌یابد. در نتیجه ابعاد پنجره باید کاهش یابد تا معادلات

عملکرد می‌گردد. این درحالی است که برای نسبت سیگنال به نویز کمتر از ۲۵ dB، روش فضای معین کلاتر به تنهایی عملکرد بهتری دارد چرا که وقتی نسبت سیگنال به نویز کاهش پیدا کند داده‌های دریافتی بی‌ارزش می‌شود. استفاده از داده‌های دریافتی در این حالت نه تنها کمکی به بهبود روش فضای معین نمی‌کند بلکه عملکرد آن را نیز کاهش می‌دهد.



شکل ۱۶. تلفیق روش D3 و فضای معین کلاتر با تخمین نسبی ۵ درصد پارامترهای رادار هواپایه

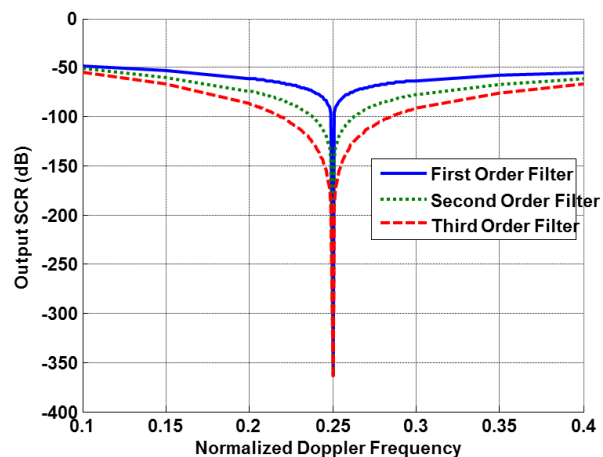
۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش‌هایی را مطرح کردیم که بدون استفاده از سلول‌های مجاور به عملکرد قابل قبولی در مقایسه با فیلتر وینر دست یابیم. در صورت وجود تجهیزات ناوبری پیشرفته مانند INS، که بتوان سرعت، جهت حرکت و ارتفاع سکوی متحرک را با دقت بسیار بالا تخمین زد، روش فضای معین کلاتر عملکرد بسیار مطلوبی خواهد داشت در غیر این صورت می‌توان از روش حوزه مستقیم داده استفاده کرد. اگر چه در نگاه اول افت عملکرد این روش بالا به نظر می‌آید ولی با انتخاب هوشمندانه ابعاد پنجره و استفاده از مرتبه‌های بالاتر، می‌توان عملکرد روش حوزه مستقیم داده را بهبود داد.

۷. مراجع

- [1] L. E. Brennan and I. S. Reed, "Theory of adaptive radar," IEEE Trans. on aerospace and electronic systems, vol. AES-9, pp. 237-252, March 1973.
- [2] J. Ward, "Space-Time adaptive processing for airborne radar," MTI Lincoln Laboratory, MTI Technical report 1015, December 1994.
- [3] A. M. Haimovich and Y. Bar-Ness, "An eigenanalysis interference canceler," Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 39, no. 1, pp. 76-84, Jan.1991. doi: 10.1109/78.80767
- [4] A. Haimovich, "The eigencanceler: adaptive radar by eigenanalysis methods," Aerospace and Electronic Systems,

با افزایش مرتبه فیلتر، قدرت حذف مؤلفه سیگنال مطلوب از داده‌های دریافتی بیشتر می‌شود. در نتیجه در مسئله مینیمم‌سازی مقید، قید مسئله کمتر در مؤلفه‌ای که قصد مینیمم کردن آن را داریم ظاهر می‌شود. در شکل ۱۵، حذف سیگنال مطلوب با فرکانس داپلر نرمالیزه ۰/۲۵ از مؤلفه کلاتر دریافتی برای فیلتر مرتبه یک، دو و سه مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، عرض باند و میزان صفر ایجاد شده در فرکانس نرمالیزه ۰/۲۵ در فیلتر مرتبه سوم بیشتر است.



شکل ۱۵. نسبت سیگنال به تداخل بعد از حذف سیگنال مطلوب برای فرکانس نرمالیزه هدف ۰/۲۵

در توجیه شکل (۱۴-۱۳) باید به این نکته اشاره کرد که اگرچه در حالت فیلتر مرتبه سوم قدرت حذف سیگنال مطلوب از سیگنال تداخل بیشتر است ولی عملکرد فیلتر به عوامل مختلف از جمله تعداد معادلات و تعداد المان و پالس بستگی دارد. اگر تعداد المان و پالس کم باشد بهتر است که از فیلتر مرتبه یک استفاده شود چرا که مرتبه بیشتر تعداد معادلات و ابعاد پنجره را کاهش می‌دهد. این درحالی است که اگر ابعاد مسئله بزرگ باشد، استفاده از فیلتر با مرتبه بیشتر علی‌رغم کاهش ابعاد فیلتر و تعداد معادلات عملکرد بهتری دارد.

۵. تلفیق فضای معین کلاتر و روش حوزه مستقیم داده

همان‌طور که در بخش سه بیان شد، با تخمین پارامترهای رادار هواپایه می‌توان ماتریس تداخل را بدون استفاده از داده‌های کمکی تخمین زد. برای بهبود عملکرد روش D3 می‌توان از فضای کلاتر تخمین زده استفاده کرد. برای استفاده از این روش کافی است که فضای کلاتر تخمین زده شده را به‌عنوان معادلات کمکی به ماتریس T اضافه کنیم. در شکل ۱۶، فضای کلاتر با ۵ درصد خطای نسبی سرعت، زاویه صعود و عوارض زمین به‌دست آمده است. در صورتی که نسبت سیگنال به نویز بیشتر از ۲۵ dB باشد، استفاده توأم از روش D3 و روش فضای معین کلاتر باعث بهبود

- IEEE Transactions on, vol. 32, no. 2, pp. 532-542, April 1996.
- [5] J. S. Goldstein and I. S. Reed, "Reduced-rank adaptive filtering," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 2, pp. 492-496, Feb. 1997.
- [6] M. L. Honig and J. S. Goldstein, "Adaptive reduced-rank interference suppression based on the multistage Wiener filter," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 6, pp. 986-994, Jun. 2002.
- [7] R. Klemm, "Adaptive clutter suppression for airborne phased array radars," *IEEE*, vol. 130, pp. 125-131, 1983.
- [8] W. Xiaoqin, W. Anhong, L. Linsheng, and H. Chongzhao, "Direct data domain approach to space-time adaptive signal processing," *Control, Automation, Robotics and Vision Conference, ICARCV 2004 8th*, vol. 3, pp. 2070-2075, 6-9 Dec. 2004.
- [9] W. Xiaoqin and H. Chongzhao, "Direct data domain approach to space-time adaptive processing," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 59-64, March 2006.
- [10] J. Zhao, Z. Zhaoda, and T. Z. Xuhang, "A modified direct data domain method in spacetime adaptive processing," *Robotics, Automation and Mechatronics, 2008 IEEE Conference on*, pp. 1154-1157, 21-24 Sept. 2008.
- [11] J. T. Carlo, T. K. Sarkar, and M. C. Wicks, "A least squares multiple constraint direct data domain approach for STAP," *Radar Conference, Proceedings of the 2003 IEEE*, pp. 431-438, 8 May 2003.

Clutter Mitigation in Airborne Radar Using Deterministic Subspace Clutter and Direct Data Domain

E. Rezagholizadeh*, M. A. Sebt

K. N. Toosi University of Technology

(Received: 04/11/2014, Accepted: 31/10/2015)

Abstract

Space-time adaptive processing is a useful technique for clutter mitigation in airborne radars. space-time adaptive processing algorithms usually require estimation of interference covariance matrix with limited training data and high complexity in processing. To overcome these problems, in this paper, deterministic clutter subspace and the direct data domain method are introduced. Two methods are presented. In the first proposed method, filter coefficients are calculated by estimating airborne radar parameters and also calculation of interference covariance matrix. The sensitivity of estimated parameters is also computed. By extending clutter subspace, the suggested method could get more robust against parameter estimation. In the other proposed method, the direct data domain is employed for calculating the coefficients vector by reducing the size of filters. Finally, the performance of the suggested algorithms is improved by utilizing other methods such as using more taps and deterministic clutter subspace.

Keywords: Space-time adaptive processing, Airborne radar, Deterministic clutter subspace, Direct data domain method.

* Corresponding author E-mail: ehsanrezagholizadeh@gmail.com