

مقایسه عملکرد زاویه‌سنجی رادار MIMO هم‌مکان شناختی و رادار آرایه فازی

سیدعلی موسوی^۱، محمود فرهنگ^{۲*}، محمدعلی مسندی شیرازی^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- استاد، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۵/۱۰/۱۳؛ پذیرش: ۹۶/۰۹/۱۳)

چکیده

این مقاله به بررسی و مقایسه زاویه‌سنجی رادار MIMO هم‌مکان شناختی و رادار آرایه فازی می‌پردازد. رادار MIMO هم‌مکان شناختی در هر مرحله از ارسال و دریافت سیگنال، شکل موج ارسالی را به صورت بهینه برپایه اطلاعاتی که از مشاهدات مراحل قبل به‌دست آمده است، طراحی می‌کند و در طول همین طراحی، پارامترهای هدف را نیز تخمین می‌زند. معیار بهینه‌سازی شکل موج ارسالی در هر مرحله در رادار MIMO هم‌مکان شناختی کمینه‌کردن کران کرامر- رانو بیزی (BCRB) می‌باشد. برای تخمین زاویه هدف در رادار آرایه فازی از روش زاویه‌سنجی مونوپالس استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برخلاف تصور موجود، زاویه‌سنجی با پردازش هم‌فاز رادار آرایه فازی بر زاویه‌سنجی رادار MIMO هم‌مکان شناختی با برخورداری از چندگانگی شکل موج برتری دارد. رادار آرایه فازی قادر است با پیچیدگی پیاده‌سازی بسیار کمتر از رادار MIMO شناختی به عملکردی بهتر از آن، از نظر میانگین مربع خطا و بایاس تخمین زاویه هدف، دست یابد.

واژگان کلیدی

رادار MIMO هم‌مکان شناختی، رادار آرایه فازی، کران کرامر- رانو بیزی (BCRB)، زاویه‌سنجی مونوپالس

۱- مقدمه

می‌گیرد. توجه به این نکته لازم است که علی‌رغم این‌که استفاده از فیدبک غالباً باعث بهبود عملکرد سیستم می‌شود، اگر به صورت ناصحیح به‌کار برده شود می‌تواند عامل افت عملکرد باشد. بنابراین، باید در طراحی ارتباط بین فرستنده و گیرنده دقت بسیاری صورت پذیرد تا رادار در تمام زمان‌ها به صورت پایدار و قابل اطمینان عمل کند.

یکی از مراحل اساسی در طراحی سیستم پردازشی رادار شناختی، استفاده از تمامی اطلاعات در دسترس در جهتی است که سیگنال ارسالی از فرستنده به‌گونه‌ای انتخاب گردد که منجر به بهترین نتایج در تخمین پارامترهای اهداف شود. از این‌رو، بهینه‌سازی شکل موج ارسالی در رادار شناختی مورد توجه زیادی قرار گرفته است.

ترکیب ایده رادار شناختی و یکی دیگری از فناوری‌های نوین راداری، یعنی رادار MIMO^۲ در سال‌های اخیر مورد توجه برخی محققان قرار گرفته است. مبنای این پیشنهاد، استفاده توأم از دایورسیتی^۳ (چندگانگی) شکل موجی موجود در رادار MIMO و هوشمندی موجود در رادار شناختی در جهت بهبود عملکرد کلی رادار است.

رادار شناختی^۱ یک رادار هوشمند مدرن است که شامل فیدبک از گیرنده تا فرستنده، بلوک یادگیری و فرستنده وفقی است. این رادار، با تطبیق شکل موج ارسالی، پرتو آنتن و دیگر پارامترهای خود با محیط می‌تواند آشکارسازی، تخمین و ردگیری هدف را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. این رادار اطلاعاتی که به‌طور مستقیم در هر مرحله به‌دست می‌آورد، اطلاعاتی که از مراحل قبل به‌دست آورده و اطلاعاتی که می‌تواند از خارج پردازشگر (به عنوان مثال به صورت نقشه کلاتر) دریافت کند را به‌کار می‌گیرد تا عملکرد خود را بهبود بخشد. توانایی رادار شناختی در تاثیرگذاری بر مشاهدات آینده و تطبیق‌پذیری آن باعث می‌شود که تخمین دقیق‌تری از پارامترهای هدف داشته باشد. رادار شناختی علاوه بر گیرنده باید بتواند فرستنده را نیز به‌روزرسانی کند [۱]. شکل (۱) بیانگر همین موضوع است.

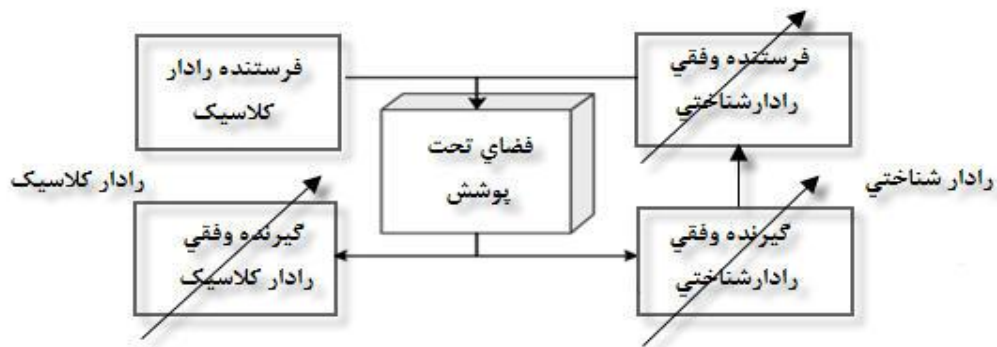
سه عامل اصلی در رادار شناختی که براساس آن‌ها از رادار کلاسیک متمایز می‌شود، عبارتند از: ۱- پردازش سیگنال هوشمند. ۲- تطبیق‌پذیری فرستنده علاوه بر گیرنده. ۳- فیدبک از گیرنده تا فرستنده. طی حلقه فیدبک فرآیند یادگیری از محیط صورت

2- Multiple-Input Multiple-Output

3- Diversity

* نویسنده مسئول: mfarhang@shirazu.ac.ir

1- Cognitive Radar



شکل (۱): مقایسه ساختار پایه بین رادار شناختی و رادارهای کلاسیک

دارد، کانال را مورد بررسی قرار می دهد؛ در واقع این بدین مفهوم است که شکل موج ارسالی می تواند به صورت مداوم و بر پایه اطلاعاتی که از مشاهدات قبلی خود از محیط و اهداف بدست آورده است، تطبیق داده شود. در این مقاله طراحی شکل موج رادار MIMO هم مکان شناختی به صورت بهینه در نظر گرفته می شود و در این مسیر تخمینی از پارامترهای هدف نیز بدست خواهد آمد. در سال های اخیر طراحی شکل موج رادار MIMO براساس معیارهای مختلف به طور وسیع مورد بررسی قرار گرفته است. بهینه سازی شکل موج برای موقعیت یابی تک هدفه رادار MIMO در [۵] بررسی شده است که برای تحقق این امر از کران پایین کران-راو (CRB^۵) استفاده شده است. در [۶] نیز طراحی شکل موج بهینه در رادار MIMO شناختی مورد بررسی قرار گرفته است، که معیارهای این طراحی نیز کرانهای BCRB^۶ و RMB^۷ می باشد. در این مقاله برای طراحی شکل موج بهینه رادار MIMO هم مکان شناختی، مینیمم کردن کران BCRB به عنوان معیار انتخاب شده است و عملکرد رادار با شکل موج بهینه در تخمین جهت اهداف با یک رادار آرایه فازی که از روش زاویه سنجی مونوپالس برای تخمین زاویه ی هدف استفاده می کند مقایسه شده است.

در ادامه، در بخش ۲ مدل سیستم رادار MIMO هم مکان شناختی و رادار آرایه فازی را معرفی کرده و در بخش سوم به مساله طراحی شکل موج بهینه رادار MIMO هم مکان شناختی براساس معیار BCRB خواهیم پرداخت و نشان می دهیم درحالتی که تنها تخمین یک پارامتر هدف (مانند جهت) مدنظر است، فرستنده رادار MIMO در حقیقت به یک رادار آرایه فازی ساده خواهد شد. سپس در بخش چهارم زاویه سنجی مونوپالس در رادار آرایه فازی را به اختصار شرح داده و با کمک نتایج شبیه سازی در بخش پنجم برتری عملکرد آرایه فازی در زاویه سنجی را نشان خواهیم داد.

رادارهای آرایه فازی^۱ را می توان حالت خاصی از رادار MIMO هم مکان دانست که فرستنده آن ضرابی (مختلط) از یک شکل موج مشخص را ارسال می کند [۲]؛ درحالی که فرستنده های رادار MIMO در حالت کلی هریک می توانند به طور مستقل از دیگری شکل موجی متفاوت را ارسال کنند (البته تفاوت های اساسی در گیرنده این دو دسته رادار وجود دارد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت). لازم به ذکر است که از بدو معرفی رادارهای MIMO در سال ۲۰۰۴ میلادی، بین پژوهشگران رادار آرایه فازی که از دهه ۱۹۶۰ میلادی شناخته شده بود و پژوهشگران رادار MIMO هم مکان همواره اختلاف نظرهایی وجود داشته است. پژوهشگران رادار MIMO معتقد هستند که استفاده از این روش به دلیل دارا بودن چندگانگی شکل موج، مزایای زیادی را به سیستم ارائه می دهد. از سوی دیگر، پژوهشگران رادار آرایه فازی بر این عقیده هستند که این رادار به دلیل ارسال ضرابی از یک سیگنال خاص و استفاده از پردازش همدوس^۲ برتری هایی را از نظر تئوری و عملی دارا خواهد بود [۳،۴]؛ از جمله این که رادار آرایه فازی پیچیدگی محاسباتی^۳ کمتری را دارا است و طراحی و پیاده سازی آن نیز ساده تر است. اخیراً نیز رادار آرایه فازی MIMO که ترکیبی از رادارهای آرایه فازی و رادارهای MIMO می باشد مورد توجه قرار گرفته است [۳].

اما آن چه که در این مقاله به آن پرداخته می شود، مقایسه ای بین عملکرد رادار آرایه فازی و رادار MIMO هم مکان شناختی در زاویه سنجی است. در رادار MIMO هم مکان شناختی به جای ارسال یک قطار پالس^۴ با شکل موجی از پیش تعریف شده، در هر مرحله هریک از شکل موج های قطار پالس به صورت وقتی برپایه داده های دریافتی قبلی تعیین می شوند. همان طور که بیان شد سیستم رادار شناختی به صورت پیوسته با استفاده از اطلاعاتی که از مشاهدات قبلی، پایگاه داده خارجی و اولویت های وظیفه اش در دسترس

5- Cramér-Rao Bound

6- Bayesian Cramér-Rao Bound

7- Reuven-Messer Bound

1- Phased-Array

2- Coherent Processing

3- Computational Complexity

4- Pulse Train

به صورت زیر قابل بیان است:

$$\mathbf{X}_k = \sum_{m=1}^M \alpha_m \mathbf{a}_R(\varphi_m) \mathbf{a}_T^T(\varphi_m) \mathbf{S}_k + \mathbf{N}_k \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_k$$

از رابطه (۲) تابع انتقال \mathbf{H}_k به سادگی قابل تشخیص می‌باشد. در رابطه فوق \mathbf{X}_k و \mathbf{S}_k و \mathbf{N}_k به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{X}_k = [\mathbf{x}_{k,1}, \dots, \mathbf{x}_{k,L}] \quad ; \quad \mathbf{S}_k = [\mathbf{s}_{k,1}, \dots, \mathbf{s}_{k,L}] \quad (3)$$

$$\mathbf{N}_k = [\mathbf{n}_{k,1}, \dots, \mathbf{n}_{k,L}]$$

در واقع بردار نمونه \mathbf{X}_k در رابطه (۱) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\mathbf{x}_{k,l} = \mathbf{H}_k(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{s}_{k,l} + \mathbf{n}_{k,l} \quad (4)$$

$$l = 1, \dots, L \quad ; \quad k = 1, 2, \dots$$

که در آن، $\mathbf{x}_{k,l} \in \mathbb{C}^{N_t}$ و $\mathbf{s}_{k,l} \in \mathbb{C}^{N_r}$ و $\mathbf{n}_{k,l} \in \mathbb{C}^{N_r}$ به ترتیب l امین بردار نمونه سیگنال دریافتی، سیگنال ارسالی و نویز در مرحله k ام می‌باشد و L تعداد کل نمونه‌های هر مرحله است. ستون‌های ماتریس نویز \mathbf{N}_k مستقل و با توزیع یکسان مختلط متقارن دایروی گوسی^۶ با میانگین صفر و ماتریس کواریانس \mathbf{R} فرض شده است که در ادامه برابر با $\mathbf{R} = \sigma^2 \mathbf{I}$ در نظر گرفته می‌شود. ماتریس $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ نیز بیانگر تابع انتقال سیستم در مرحله k ام می‌باشد که به بردار پارامتر $\boldsymbol{\theta}$ وابسته است. بردار تصادفی $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^Q$ می‌تواند شامل جهت هدف، تضعیف دامنه سیگنال هدف یا دیگر پارامترهای محیطی و آرایه‌ای باشد و دارای تابع توزیع احتمال $f_{\boldsymbol{\theta}}(\cdot)$ فرض می‌شود. \mathbf{H}_k تابعی معلوم و شناخته‌شده در نظر گرفته شده است و همان‌طور که نشان داده شد برابر با حاصل ضرب تضعیف مختلط، بردار هدایت فرستنده و بردار هدایت گیرنده است. بردار هدایت گیرنده و فرستنده به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathbf{a}_R(\varphi_m) = [e^{-j\omega_c \tau_{R,1}(\varphi_m)}, \dots, e^{-j\omega_c \tau_{R,N_r}(\varphi_m)}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{a}_T(\varphi_m) = [e^{-j\omega_c \tau_{T,1}(\varphi_m)}, \dots, e^{-j\omega_c \tau_{T,N_t}(\varphi_m)}]^T$$

آرایه‌های فرستنده و گیرنده به صورت یکنواخت^۷ و خطی در نظر گرفته شده است و هر دو آرایه دارای فاصله بین المان برابر با نصف طول موج هستند ($\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{2}$). بنابراین، بردارهای هدایت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathbf{a}_R(\varphi_m) = [1, e^{-j\pi \sin(\varphi_m)}, \dots, e^{-j\pi(N_r-1)\sin(\varphi_m)}]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{a}_T(\varphi_m) = [1, e^{-j\pi \sin(\varphi_m)}, \dots, e^{-j\pi(N_t-1)\sin(\varphi_m)}]^T$$

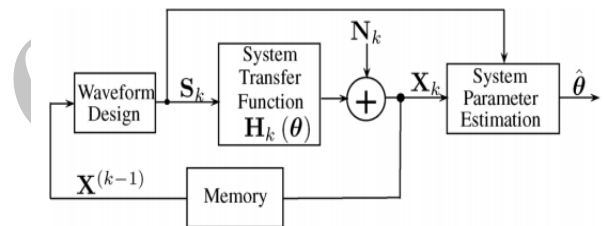
انرژی سیگنال ارسالی نیز دارای شرط $\text{tr}(\mathbf{S}_k \mathbf{S}_k^H) = E$ است که E

۲- مدل سازی سیستم

در این بخش مدل سیستم رادار MIMO هم‌مکان شناختی و رادار آرایه فازی را معرفی کرده و مساله بهینه سازی موردنظر را شرح خواهیم داد.

۲-۱- رادار MIMO هم‌مکان شناختی

شکل (۲)، بلوک دیاگرام یک سیستم رادار شناختی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، سیگنال ارسالی فرستنده رادار در مرحله k ام پس از برخورد با هدف یا اهداف موردنظر و جمع شدن با نویز به گیرنده رادار می‌رسد. مرحله بعد از ارسال سیگنال در فرستنده تا دریافت سیگنال بازگشتی به گیرنده رادار، به صورت تابع انتقال \mathbf{H}_k در نظر گرفته شده است. پس از پردازش در گیرنده رادار تخمینی از پارامترهای هدف به دست می‌آید. تفاوت رادار شناختی با رادارهای متداول در وجود یک مسیر فیدبک از گیرنده تا فرستنده است، به گونه‌ای که سیگنال ارسالی در مرحله k ام، \mathbf{S}_k ، براساس سیگنال‌های دریافتی در مراحل قبل $\mathbf{X}^{(k-1)}$ طراحی می‌شود.



شکل (۲): بلوک دیاگرام رادار شناختی [۶]

رادار در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت تک پایه و دارای دو دسته آنتن آرایه هم‌مکان با N_r فرستنده و N_t گیرنده می‌باشد. مدل بردار سیگنال دریافتی در حضور M هدف به صورت زیر است [۷]:

$$\mathbf{x}_k(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_m e^{-i\omega_{D_m} t} \mathbf{a}_R(\varphi_m) \mathbf{a}_T^T(\varphi_m) \mathbf{s}_k(t - \tau_m) + \mathbf{n}_k(t) \quad t \in [0, T_0] \quad (1)$$

که در آن، α_m تضعیف مختلط^۱، φ_m جهت^۲، τ_m تاخیر انتشار^۳ و ω_{D_m} شیفت فرکانس داپلر^۴ هدف m ام است و $\mathbf{a}_R(\cdot) \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ و بردارهای هدایت^۵ آرایه‌های گیرنده و فرستنده هستند. $\mathbf{a}_T(\cdot) \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ بردار نویز در مرحله k ام می‌باشد. از آنجا که در این مقاله بررسی عملکرد رادار MIMO شناختی در زاویه‌سنجی مدنظر می‌باشد، با فرض معلوم بودن فرکانس داپلر و تاخیر (از نتایج مرحله جستجو)، مدل ارائه شده در رابطه (۱) پس از نمونه برداری

- 1- Complex Attenuation
- 2- Direction
- 3- Propagation Delay
- 4- Doppler Frequency Shift
- 5- Steering Vector

6- Snapshot

7- Complex Circularly Symmetric Gaussian

8- Uniform

هم‌مکان شناختی از حل مسئله بهینه‌سازی (۱۱) با معیار کمینه‌کردن BCRB به دست می‌آید.

۲-۲- رادار آرایه فازی

در رادار آرایه فازی سیگنال فرستنده‌ها به صورت هم‌دوس^۴ ارسال می‌شود [۹]. سیگنال ارسالی در جهت زاویه تخمین زده شده از هدف (در مرحله جستجو)، به صورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{S}_{PH} = \beta \mathbf{a}_T^*(\hat{\varphi}). \mathbf{1}_{1 \times L} \quad (12)$$

که در آن، $\hat{\varphi}$ تخمینی از زاویه هدف است که بعد از الگوریتم جستجو به دست می‌آید و β ضریب دامنه سیگنال ارسالی است که با توجه به روابط انرژی سیگنال ارسالی محاسبه می‌شود؛ این بدین معنی است که در طراحی سیگنال برای سناریوهای متفاوت انرژی سیگنال ارسالی ($\text{tr}(\mathbf{S}_k \mathbf{S}_k^H) = E$) را ثابت فرض کردیم؛ بنابراین داریم:

$$\beta = \sqrt{\frac{E}{L \cdot N_T}} \quad (13)$$

رادار آرایه فازی را در مرحله ارسال سیگنال (فرستنده) می‌توان معادل با یک رادار MIMO مرتبه یک دانست؛ لیکن باید توجه کرد که در مرحله دریافت (گیرنده) رادارهای آرایه فازی متداول با رادارهای MIMO تفاوت اساسی دارند. به‌طور خاص، در بحث زاویه‌سنجی که در این مقاله مورد بحث قرار می‌گیرد، رادارهای آرایه فازی متداول از روش مونوپالس^۵ استفاده می‌کنند درحالی‌که رادار MIMO از روش‌های پردازش سیگنال خاص خود استفاده می‌کند.

در ادامه پس از معرفی روش طراحی شکل موج بهینه رادار MIMO شناختی و چگونگی تخمین جهت هدف در آن، زاویه‌سنجی مونوپالس در رادار آرایه فازی را به اختصار شرح داده و عملکرد دو سیستم را در سناریوهای مشابه مقایسه خواهیم کرد.

۳- طراحی شکل موج بهینه رادار MIMO هم‌مکان شناختی

در این بخش به بیان چگونگی حل مساله بهینه سازی فوق و طراحی شکل موج بهینه رادار MIMO هم‌مکان شناختی براساس معیار BCRB خواهیم پرداخت.

کل انرژی ارسالی و $\text{tr}(\cdot)$ بیانگر عملگر trace می‌باشد. از آن‌جا که قبل از شروع به کار رادار اطلاعات خاصی از زاویه سمت هدف در دسترس نیست و همچنین، حضور هدف در هر زاویه‌ای هم احتمال با زاویه دیگر است؛ بنابراین، تابع توزیع احتمال پارامتر زاویه سمت هر یک از اهداف در قالب الگوریتم جستجوی رادار، به صورت یکنواخت در فاصله بین a تا b در نظر گرفته شود؛ یا به عبارت دیگر:

$$\varphi_m \sim U(a, b) \quad 1 \leq m \leq M \quad (7)$$

بازه a تا b ، بازه‌ای از زوایا است که رادار آن را به‌عنوان بازه حضور هدف در الگوریتم جستجو دریافت می‌کند. پارامتر تضعیف دامنه مختلط نیز دارای تابع توزیع احتمال گوسی دایروی مختلط با میانگین صفر و واریانس $\sigma_{\alpha_m}^2$ در نظر گرفته شده است:

$$\alpha_m \sim \mathcal{N}^c(0, \sigma_{\alpha_m}^2) \quad (8)$$

معمولاً مقدار $\sigma_{\alpha_m}^2$ به صورت دلخواه بزرگ انتخاب شود که این نشان‌دهنده عدم اطلاعات آماری پیشین^۱ از دامنه است. بنابراین، المان‌های بردار پارامتر مجهول در حالت کلی به صورت زیر هستند که از هم مستقل آماری فرض شده‌اند:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta} &= [\boldsymbol{\varphi}^T, \text{Re}(\boldsymbol{\alpha}^T), \text{Im}(\boldsymbol{\alpha}^T)]^T \\ \boldsymbol{\varphi} &= [\varphi_1, \dots, \varphi_M] \quad ; \quad \boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \dots, \alpha_M] \end{aligned} \quad (9)$$

مطلوب مسئله رادار MIMO هم‌مکان شناختی، طراحی ماتریس سیگنال ارسالی در مرحله k ام (که با \mathbf{S}_k نمایش داده می‌شود) بر مبنای مشاهدات قبلی ($\mathbf{X}^{(k-1)}$) است که به صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

$$\mathbf{X}^{(k-1)} = [\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{k-1}] \quad (10)$$

سیگنال ارسالی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که با قید ثابت‌ماندن کل انرژی ارسالی، یک تابع هزینه را بهینه سازد:

$$\begin{aligned} &\underset{\mathbf{S}_k}{\text{optimize}} C(\mathbf{S}_k, \mathbf{X}^{(k-1)}) \\ &\text{s.t. } \text{tr}(\mathbf{S}_k \mathbf{S}_k^H) = E \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن، $C(\cdot, \cdot)$ بیانگر تابع هزینه (هدف^۲) می‌باشد. از آن‌جا که یافتن رابطه تحلیلی برای حداقل میانگین مربع خطا (MMSE^۳) در این‌گونه مسائل دشوار است، غالباً کمینه‌سازی کران پایین کرامر-رائو برای MSE به‌عنوان معیار بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، سیگنال ارسالی هر مرحله در رادار MIMO

1- A Priori
2- Objective Or Utility Function
3- Minimum Mean Square Error

4- Coherent
5- Monopulse

۳-۱- بهینه‌سازی شکل موج ارسالی

برای طراحی سیگنال ارسالی رادار MIMO هم‌مکان شناختی با استفاده از معیار BCRB به صورت زیر عمل می‌کنیم. از آن‌جا که بهینه‌سازی کران BCRB برحسب سیگنال ارسالی تنها از طریق ماتریس کوواریانس، یعنی $\mathbf{R}_{S_k} \triangleq \frac{1}{L} \mathbf{S}_k \mathbf{S}_k^H$ به \mathbf{S}_k وابسته است [۶]، ابتدا ماتریس کوواریانس سیگنال ارسالی بهینه را محاسبه کرده و سپس با تجزیه آن سیگنال ارسالی را به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_{S_k} &= \underset{\mathbf{R}_{S_k}}{\operatorname{argmin}} \operatorname{tr}(\mathbf{W}_k \mathcal{C}_k^{\text{BCRB}}) \\ \text{s.t. } \operatorname{tr}(\mathbf{R}_{S_k}) &= \frac{E}{L}, \quad \mathbf{R}_{S_k} \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن، $\mathcal{C}_k^{\text{BCRB}}$ کران شرطی BCRB (برابر با معکوس ماتریس اطلاعات فشر شرطی) در مرحله k ام و \mathbf{W}_k یک ماتریس قطری مثبت معین است که برای وزن‌دهی پارامترهای مختلف در تابع هزینه نهایی به کار می‌رود. می‌توان نشان داد که رابطه (۱۴) به صورت مسئله SDP^۲ زیر قابل بیان است [۶]:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_{S_k} &= \underset{\mathbf{R}_{S_k}}{\operatorname{argmin}} \min_{\{t_i\}_{i=1}^Q} \sum_{l=1}^Q w_l t_l \\ \text{s.t. } \begin{bmatrix} J_{P_{k-1}} + \Delta J_{D_k} & e_i \\ e_i^T & t_i \end{bmatrix} &\geq 0 \quad i = 1, \dots, Q \\ \operatorname{tr}(\mathbf{R}_{S_k}) &= E/L, \quad \mathbf{R}_{S_k} \geq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن:

$$(16)$$

$$\begin{aligned} J_{P_{k-1}} &= J_{I_{k-1}} + J_{N_{k-1}} \\ &+ 2L \sum_{m=1}^{k-1} \operatorname{Re}\{\mathbf{Q}_I [\bar{\Gamma}_k(\mathbf{X}^{(k-1)}) \odot (\mathbf{1}_{Q \times Q} \otimes \mathbf{R}_{S_m}^T)] \mathbf{Q}_I^T\} \end{aligned}$$

$$[J_{I_{k-1}}]_{i,j} \triangleq -E \left(\frac{\partial^2 \log f_{\theta}}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \Big|_{\mathbf{X}^{(k-1)}} \right)$$

$$[J_{N_{k-1}}]_{i,j} = -2 \sum_{m=1}^{k-1} \operatorname{Re}\{E[\operatorname{tr}(\mathbf{X}_m - \mathbf{H}_k \mathbf{S}_m)^H \mathcal{H}_{i,j,m} \mathbf{S}_m] | \mathbf{X}^{(k-1)}]\}$$

$$\mathcal{H}_{i,j,m}(\theta) \triangleq \frac{\partial^2 \mathbf{H}_m(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j}$$

$$\mathbf{Q}_I \triangleq \mathbf{I}_Q \otimes \mathbf{1}_{1 \times Nt}$$

$$\bar{\Gamma}_k(\mathbf{X}^{(k-1)}) \triangleq E \left(\hat{\mathcal{H}}_k^H \mathbf{R}^{-1} \hat{\mathcal{H}}_k | \mathbf{X}^{(k-1)} \right)$$

$$\Delta J_{D_k} = 2L \operatorname{Re}\{\mathbf{Q}_I [\bar{\Gamma}_k(\mathbf{X}^{(k-1)}) \odot (\mathbf{1}_{Q \times Q} \otimes \mathbf{R}_{S_k}^T)] \mathbf{Q}_I^T\}$$

به $\{t_i\}_{i=1}^Q$ متغیرهای کمکی هستند. منظور از \otimes ، \odot ، $\operatorname{Re}(\cdot)$

ترتیب عملگر بخش حقیقی، ضرب هادامارد^۳ و ضرب کرونیگر^۴ می‌باشد. ماتریس $\mathbf{1}_{Q \times Q}$ یک ماتریس $Q \times Q$ می‌باشد که همه درایه‌های آن 1 است و e_i بیانگر i امین ستون ماتریس همانی می‌باشد. لذا با حل مسئله (۱۵) می‌توان \mathbf{R}_S هر مرحله و در نهایت سیگنال ارسالی بهینه در هر مرحله را به دست آورد.

در حل مساله بهینه‌سازی SDP فوق برای یک سیستم رادار MIMO کلی، قیدی بر مرتبه^۵ \mathbf{R}_{S_k} اعمال نمی‌شود. لیکن در صورتی که بخواهیم شکل موج بهینه را در یک رادار آرایه فازی بیابیم، قید $\operatorname{rank}(\mathbf{R}_{S_k}) = 1$ به مساله بهینه‌سازی فوق افزوده می‌شود. اضافه‌شدن این شرط باعث می‌شود که مسئله بهینه‌سازی به یک مساله بسیار پیچیده از نوع NP-HARD تبدیل شود [۷]. با این وجود، درحالی‌که تنها تخمین یک پارامتر مدنظر است ($Q = 1$) می‌توان نشان داد که این مساله راه‌حلی به فرم بسته دارد که به صورت زیر قابل بیان است [۱۲]:

$$\bar{\mathbf{R}}_{S_k} = \left(\frac{E}{L} \right) \cdot \bar{\mathbf{u}}_k \bar{\mathbf{u}}_k^H \quad (17)$$

که در آن، $\bar{\mathbf{u}}_k$ بردار ویژه متناظر با بیشینه مقدار ویژه $\Gamma_k(\mathbf{X}^{(k-1)})$ می‌باشد. رابطه فوق به وضوح نشان می‌دهد که ماتریس کوواریانس بهینه از مرتبه یک خواهد بود؛ بدین معنی که درحالی‌که تخمین تنها یک پارامتر مدنظر است فرستنده بهینه یک رادار آرایه فازی خواهد بود.

زاویه هدف در هر مرحله براساس تخمین MMSE محاسبه می‌شود. با توجه به این‌که در این مسئله اطلاعات پیشین در هر مرحله از عملکرد رادار در اختیار قرار دارد، تخمین گر MMSE به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{\theta} = E[\theta | \mathbf{X}^{(k-1)}] = \int \theta \cdot f_{\theta | \mathbf{X}^{(k-1)}} d\theta \quad (18)$$

۳-۲- محاسبه توابع توزیع احتمال پسین

ساختار روابط بالا شامل محاسباتی برحسب تابع توزیع احتمال پسین $f_{\theta | \mathbf{X}^{(k-1)}}$ می‌باشد. محاسبه تابع توزیع احتمال پسین به صورت بازگشتی می‌باشد. با در نظر گرفتن رابطه‌های زیر، تابع $f_{\theta | \mathbf{X}^{(k-1)}}$ به دست می‌آید [۸]:

$$f_{\theta | \mathbf{X}^{(k-1)}} = \frac{F_{k-1}(\theta)}{f_{\mathbf{X}^{(k-1)}}} \quad k = 2, 3, \dots \quad (19)$$

که در آن، $F_{k-1}(\theta)$ به صورت بازگشتی زیر محاسبه می‌شود:

3- Hadamard Product

4- Kronecker Product

5- Rank

1- Conditional Fisher Information Matrix

2- Semidefinite Programming

۴- زاویه‌سنجی مونوپالس در رادار آرایه فازی

این روش، یک روش عملی و پرکاربرد برای پیدا کردن زاویه هدف در رادار آرایه فازی است. این روش مزایای زیادی نسبت به دیگر روش‌های زاویه‌سنجی از جمله پرش پی در پی پرتو و مرور مخروطی دارد. این روش زاویه‌سنجی براساس دو پارامتر مجموع و تفاضل سیگنال دریافتی در گیرنده انجام می‌شود. پارامتر مجموع و تفاضل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Sigma_{1 \times 1} = \mathbf{1}_{N_r \times 1}^T \cdot \mathbf{y}_{N_r \times 1} \quad (23)$$

$$\Delta_{1 \times 1} = \mathbf{d}_{N_r \times 1}^T \cdot \mathbf{y}_{N_r \times 1}$$

که در آن، بردار \mathbf{d} برای حالت ۶ آنتن گیرنده بدین صورت تعریف می‌شود:

$$\mathbf{d} = [1, 1, 1, -1, -1, -1]^T \quad (24)$$

و همچنین، بردار \mathbf{y} حاصل جمع تمام نمونه‌های سیگنال گیرنده‌ها می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{y}_{N_r \times 1} = \mathbf{X}_{N_r \times L} \cdot \mathbf{1}_{L \times 1} \quad (25)$$

با توجه به روابط رادار آرایه فازی، تخمین زاویه هدف برابر است با:

$$\hat{\varphi} = \frac{4}{\pi \cdot N_r} \text{im} \left(\frac{\Delta}{\Sigma} \right) \quad (26)$$

دقت زاویه‌سنجی در این روش از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{\text{mono pulse}} = \frac{\theta_{3\text{dB}}}{1.5\sqrt{2 \cdot k \cdot \text{SNR}}} \quad (27)$$

که در آن، k تعداد مراحل ارسال و دریافت سیگنال است. توضیحات بیشتر درباره این روش و اقسام آن (مونوپالس فاز و دامنه) در [۱۱] آمده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به کمک شبیه‌سازی و نتایج عددی عملکرد رادار MIMO هم‌مکان شناختی و رادار آرایه فازی را در ردیابی و زاویه سنجی با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. از این‌رو فرض می‌کنیم در مرحله جستجو هدف با دقتی به اندازه پهنای پرتو آنتن کشف شده است (در این جا به مقایسه الگوریتم جستجو نمی‌پردازیم، چرا که در این صورت پارامترهای دیگری از جمله تعداد اهداف و همچنین پارامترهای مرتبط با آشکارسازی و ... نیز مطرح خواهند شد که با تاثیر مستقیم در نتیجه‌گیری، مقایسه را بسیار پیچیده خواهد نمود).

رادارهای آرایه فازی در قالب الگوریتم جستجو، محیط و بازه

$$F_{k-1}(\theta) = F_{k-2}(\theta) \cdot f_{\mathbf{X}_{k-1}|\mathbf{X}^{(k-2)},\theta} \quad (20)$$

$$F_0(\theta) \triangleq f_{\theta}, \quad f_{\mathbf{X}_1|\mathbf{X}^{(0)},\theta} = f_{\mathbf{X}_1|\theta}$$

با استفاده از قضیه بیز، رابطه بالا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_{k-1}(\theta) = F_0(\theta) \cdot \prod_{m=1}^{k-1} f_{\mathbf{X}_m|\mathbf{X}^{(m-1)},\theta} \quad (21)$$

$$= f_{\mathbf{X}_1|\theta} \cdot F_0(\theta) \prod_{m=2}^{k-1} f_{\mathbf{X}_m|\mathbf{X}^{(m-1)},\theta}$$

$$= f_{\mathbf{X}_2|\mathbf{X}_1,\theta} \cdot \prod_{m=3}^{k-1} f_{\mathbf{X}_m|\mathbf{X}^{(m-1)},\theta} = \dots$$

$$= f_{\mathbf{X}_{k-1},\dots,\mathbf{X}_1,\theta} = f_{\mathbf{X}^{(k-1)},\theta}$$

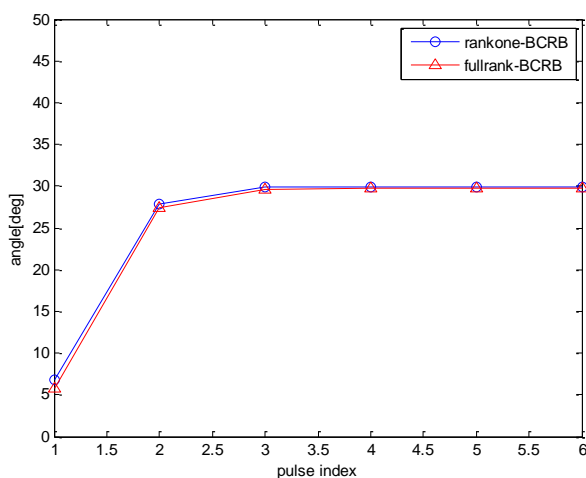
بنابراین، با استفاده از قضیه بیز خواهیم داشت:

$$\frac{F_{k-1}(\theta)}{f_{\mathbf{X}^{(k-1)}}} = \frac{1}{f_{\mathbf{X}^{(k-1)}}} f_{\mathbf{X}^{(k-1)},\theta} = f_{\theta|\mathbf{X}^{(k-1)}} \quad (22)$$

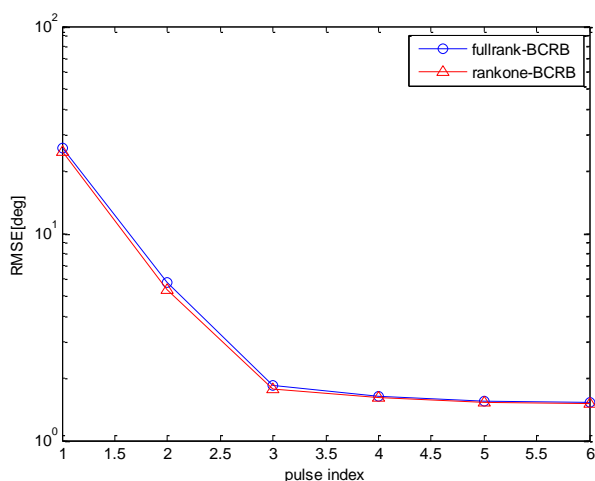
برای محاسبه معادله بازگشتی بالا در ابتدا نیاز است که تابع توزیع احتمال به فرم $f_{\mathbf{X}_k|\mathbf{X}^{(k-1)},\theta}$ محاسبه شود. از رابطه (۲) نتیجه می‌شود که $(\mathbf{X}_k|\mathbf{X}^{(k-1)}, \theta)$ یک متغیر گوسی مختلط با توزیع $\mathcal{N}^c(\mathbf{H}_k(\theta)\mathbf{S}_k(\mathbf{X}^{(k-1)}), \mathbf{R})$ می‌باشد؛ همچنین، مخرج رابطه بالا یک فاکتور نرمالیزه‌کننده (مستقل از θ) است که نقشی در بهینه‌سازی فوق ندارد و می‌تواند نادیده گرفته شود. بنابراین، در هر مرحله یک تابع گوسی به صورت فوق در تابع $f_{\theta|\mathbf{X}^{(k-1)}}$ مرحله قبل ضرب می‌شود و در واقع بعد از مرحله k ام، $f_{\theta|\mathbf{X}^{(k-1)}}$ برابر با حاصل ضرب $k-1$ تابع گوسی در یک تابع یکنواخت می‌باشد. از آن جا که حاصل ضرب دو تابع گوسی، خود یک تابع گوسی است با میانگین و واریانس جدیدی که برحسب میانگین و واریانس دو تابع قبلی قابل محاسبه است [۱۰]، در هر مرحله تنها با یک تابع گوسی که در یک تابع یکنواخت ضرب می‌شود (گوسی بریده‌شده) سر و کار خواهیم داشت.

محاسبات امید ریاضی در روابط قسمت قبل را می‌توان به روش انتگرال‌گیری مونت- کارلو و با تولید نمونه‌هایی که دارای تابع توزیع $f_{\theta|\mathbf{X}^{(k-1)}}$ (یک تابع گوسی بریده‌شده) باشند به سادگی محاسبه کرد. این درحالی است که در مراجع دیگر مانند [۶]، استفاده از روش متروپولیس هستینگ^۲ برای تولید نمونه‌ها پیشنهاد شده است که دارای پیچیدگی بسیار بالایی است.

1- Truncated Gaussian
2- Metropolis Hastings



شکل (۳): زاویه تخمینی هدف در سناریوی جستجو رادار MIMO هم‌مکان شناختی



شکل (۴): میزان RMSE در سناریوی جستجو رادار MIMO هم‌مکان شناختی

با توجه به اشکال فوق مشاهده می‌کنیم که تخمین زاویه صورت گرفته توسط رادار MIMO شناختی دارای بایاس^۱ است ولی میزان بایاس و همچنین، خطای تخمین با افزایش تعداد پالس ارسالی کاهش می‌یابد.

شکل‌های (۵) و (۶) الگوهای پرتویی^۲ بهینه‌شده ارسالی و نیز تابع توزیع پسین را برای رادار MIMO شناختی در دو حالت جستجو و ردیابی نشان می‌دهد. الگوی پرتویی ارسالی رادار به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$G_k(\varphi) = \mathbf{a}_T^T(\varphi_m) \mathbf{R}_{S_k} \mathbf{a}_T^*(\varphi_m) \quad (29)$$

تحت پوشش خود را به قسمت‌هایی به اندازه پهنای پرتو تقسیم کرده، وجود یا عدم وجود هدف را بررسی می‌کند و در صورت وجود، زاویه هدف را با خطای حداکثر به اندازه پهنای پرتو به عنوان خروجی الگوریتم جستجو اعلام می‌کند. برای دستیابی به چنین نتیجه‌ای رادار باید چندین مرتبه سیگنال ارسال و دریافت کند تا بتواند تمام بازه موردنظر را بررسی نماید. به عنوان مثال، اگر پهنای پرتو حدود ۱۵ درجه باشد و بازه تحت پوشش حدود ۱۸۰ درجه باشد رادار باید ۱۲ بار سیگنال ارسال و دریافت نماید تا الگوریتم جستجو را به خوبی انجام دهد. اما در رادار MIMO این چنین نیست و رادار MIMO تمام بازه زاویه‌ای موردنظر را یکجا بررسی می‌کند. در این حالت، تفاوت مراحل جستجو و ردیابی را می‌توان در اطلاعاتی پیشین مورد استفاده در الگوریتم پردازشی رادار MIMO شناختی دانست؛ بدین معنی که توزیع پیشین زاویه در مرحله جستجو در یک بازه وسیع (مثلاً نزدیک به ۱۸۰ درجه) در نظر گرفته می‌شود، در حالی که در مرحله ردیابی توزیع پیشین زاویه هدف مورد استفاده در الگوریتم پردازشی رادار در بازه‌ای بسیار محدودتر خواهد بود.

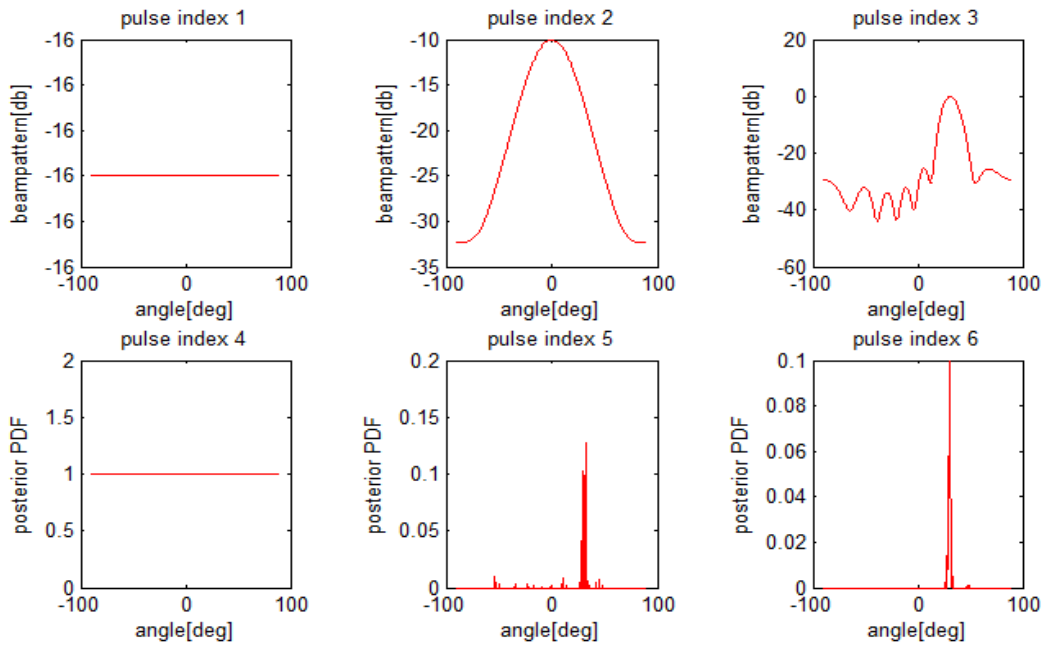
برای روشن‌تر شدن بحث‌های بعدی و آشنایی بیشتر با عملکرد الگوریتم‌های تخمین زاویه در رادار MIMO هم‌مکان شناختی، ابتدا با یک مثال عملکرد آن را در مرحله جستجو بررسی می‌کنیم و سپس به بررسی و مقایسه زاویه‌سنجی دو رادار یادشده در ردیابی می‌پردازیم.

رادار MIMO هم‌مکان شناختی با تعداد المان‌های فرستنده و گیرنده یکسان و برابر با ۶ را در نظر می‌گیریم. در شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب زاویه تخمینی هدف و میزان RMSE برای ۵۰۰ بار تکرار آزمایش مربوط به الگوریتم جستجوی رادار MIMO هم‌مکان شناختی در SNR=20 dB نشان داده شده است. نسبت سیگنال به نویز به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

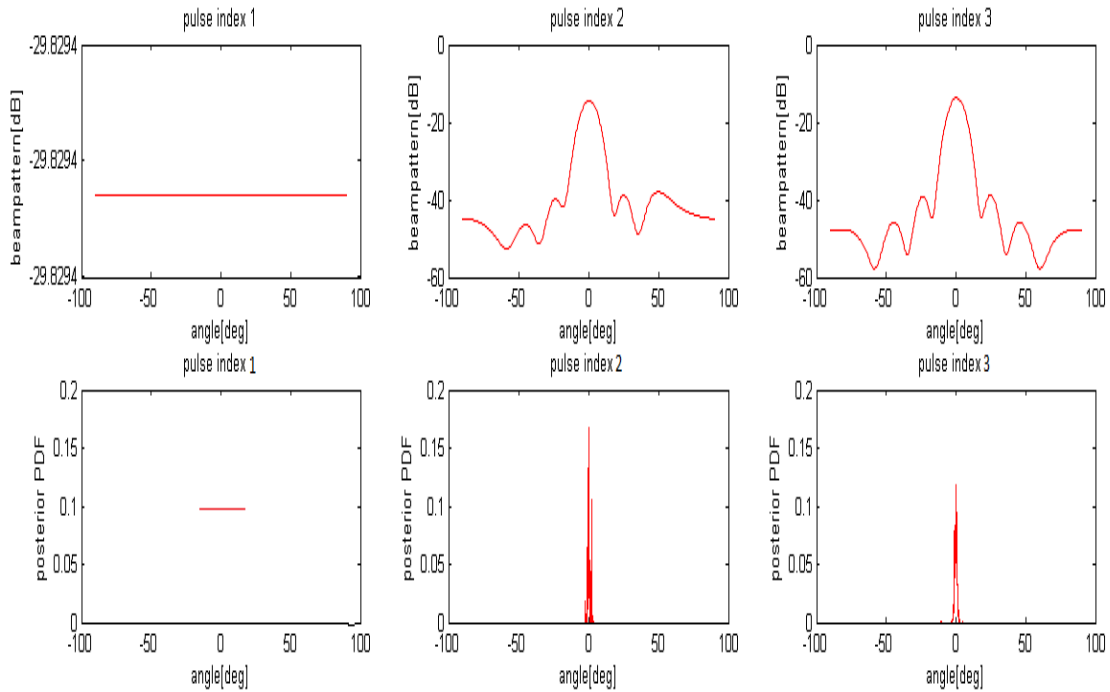
$$\text{SNR} = |\alpha|^2 \cdot E \cdot N_t \cdot N_r / \sigma^2 \quad (28)$$

این دو شکل برحسب تعداد مراحل ارسال و دریافت سیگنال رسم شده‌اند. زاویه هدف در این شکل، ۳۰ درجه فرض شده است. دو نمودار موجود در هر شکل مربوط به روش بهینه‌سازی به کاررفته در طراحی سیگنال می‌باشد. در نموداری که با full-rank مشخص شده مساله بهینه‌سازی رابطه (۱۴) بدون قیدی بر مرتبه \mathbf{R}_{S_k} به صورت عددی حل شده است و نمودار rank-one از حل به فرم بسته (۱۷) استفاده کرده است. همان‌گونه که مشخص است طبق انتظار استفاده از دو روش به عملکرد مشابهی منجر خواهند شد.

1- Bias
2- Beam-Pattern

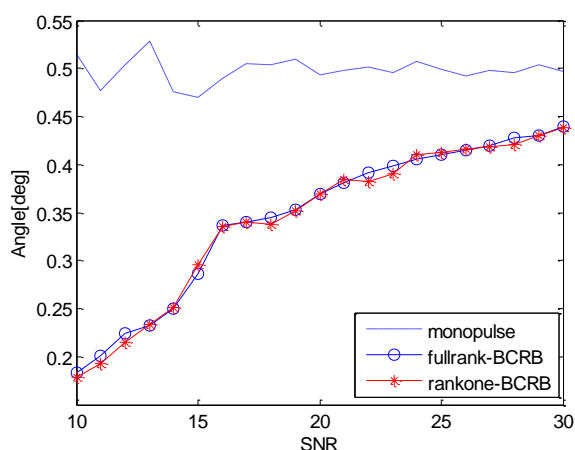


شکل (۵): الگوی پرتوی ارسالی و تابع توزیع چگالی احتمال پسین در سناریوی جستجو رادار MIMO هم‌مکان شناختی

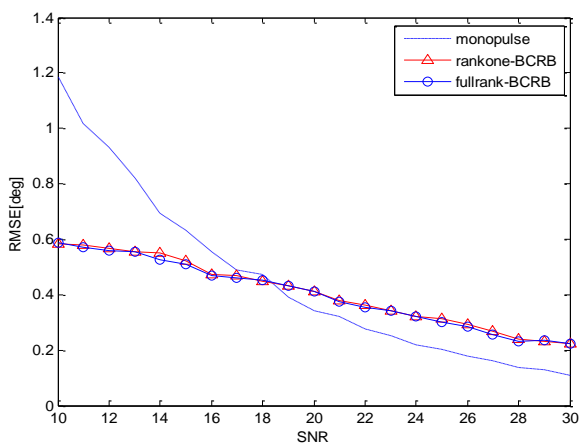


شکل (۶): الگوی پرتوی ارسالی و تابع توزیع چگالی احتمال پسین در سناریوی ردیابی رادار MIMO هم‌مکان شناختی

رادار MIMO هم‌مکان شناختی دارای بایاس است، درحالی‌که زاویه‌سنجی مونوپالس رادار آرایه فازی دارای تخمین بدون بایاس از زاویه هدف است. همان‌طور که در بالا توضیح داده شد، در رادار MIMO شناختی مفروض، در هر مرحله تابع گوسی بریده شده $f_{\theta|X^{(k-1)}}$ دارای واریانس کمتری خواهد بود و میانگین آن نیز بهبود می‌یابد، لیکن با این وجود بدون بایاس نخواهد شد. در نقطه مقابل، برتری تخمین مونوپالس رادار آرایه فازی علاوه بر سادگی الگوریتم در بدون بایاس بودن آن است.



شکل (۷): زاویه تخمینی هدف در زاویه‌سنجی رادار MIMO هم‌مکان شناختی و رادار آرایه فازی



شکل (۸): میزان RMSE در زاویه‌سنجی رادار MIMO هم‌مکان شناختی و رادار آرایه فازی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی عملکرد رادار MIMO هم‌مکان شناختی و رادار آرایه فازی در زاویه‌سنجی نشان دادیم که برخلاف تصور رایج، رادار MIMO شناختی برتری بر رادار آرایه فازی نخواهد داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اگرچه در SNRهای پایین

همان‌طور که انتظار می‌رود و در این دو شکل نیز مشخص است، با گذشت زمان و دریافت پالس‌های بیشتر پیک الگوی پرتویی به موقعیت هدف نزدیک‌تر می‌شود و همچنین، تابع توزیع چگالی احتمال پسین نیز با کاهش این گستردگی بر روی هدف متمرکز می‌شود. دلیل این تمرکز، دقیق‌تر شدن تخمین زاویه هدف است که در هر مرحله بهبود می‌یابد. همان‌طور که در این دو شکل مشخص است، در ابتدای جستجو یا ردیابی تابع توزیع به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده و دلیل آن هم این است که در این مرحله، اطلاعاتی از موقعیت هدف در اختیار رادار نیست و برای رادار احتمال حضور هدف در همه زوایای تحت پوشش (کل بازه ۱۸۰ درجه در مرحله جستجو و در مرحله ردیابی برابر با اندازه پهنای پرتو) یکسان است؛ اما در مراحل بعدی به مرور اطلاعات رادار از موقعیت هدف بیشتر شده و تخمین بهتری را نتیجه می‌گیرد. این شکل همچنین، عملکرد فیدبک و توانایی رادار را در به‌روزرسانی فرستنده نشان می‌دهد که از آن تفاوت عملکرد رادار غیرشناختی در مقایسه با رادار شناختی مشخص است. اندازه محور عمودی در نمودارهای تابع پسین از آن‌جا که نرمالیزه نشده‌اند حائز اهمیت نیست. در الگوریتم جستجو هدف در ۳۰ درجه و در الگوریتم ردیابی هدف در ۵/۰ درجه فرض شده است.

حال جهت مقایسه عملکرد زاویه‌سنجی دو سیستم، در سناریوی رادار آرایه فازی فرض می‌کنیم هدفی آشکار شده است و زاویه‌سنجی آن مطلوب ما می‌باشد و در سناریوی رادار MIMO هم‌مکان شناختی فرض می‌کنیم هدف در بخشی از محیط تحت پوشش رادار کشف شده است؛ ولی حضور هدف در همه زاویه‌های بازه‌ای به اندازه پهنای پرتو برای پردازش‌گر هم احتمال است و به‌دست‌آوردن جهت دقیق هدف در آن بازه مدنظر است. در رادار MIMO هم‌مکان شناختی از تخمین‌گر MMSE و در رادار آرایه فازی از روش زاویه‌سنجی مونوپالس برای تخمین زاویه هدف استفاده می‌کنیم. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب زاویه تخمینی هدف و میزان RMSE را برای ۵۰۰ بار تکرار آزمایش، مربوط به الگوریتم ردیابی رادار آرایه فازی و رادار MIMO هم‌مکان شناختی با سیگنال بهینه‌ارسالی در مرحله ششم ($k = 6$)، برحسب SNR نشان می‌دهد. تعداد المان‌های آرایه فرستنده و گیرنده یکسان و برابر با ۶ در نظر گرفته می‌شود و هدف در زاویه ۰/۵ درجه فرض شده است.

همان‌طور که از این اشکال مشخص است عملکرد زاویه‌سنجی مونوپالس رادار آرایه فازی بهتر از رادار MIMO شناختی است. نکته بسیار مهم در مورد شکل (۸) این است که علی‌رغم این‌که ظاهراً در SNRهای پایین عملکرد رادار MIMO هم‌مکان شناختی بهتر از رادار آرایه فازی است، با توجه به شکل (۷)، تخمین زاویه

خطای تخمین در رادار MIMO شناختی کمتر است، اما وجود بایاس در تخمین صورت گرفته توسط این رادار مانعی مهم در استفاده از این روش است. بررسی و مقایسه منصفانه الگوریتم جستجو در این دو دسته رادار به مطالعات بیشتری نیازمند است.

۷- مراجع

- [1] S. Haykin, "Cognitive radar: A way of the future," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 23, no. 1, pp. 30–40, January 2006.
- [2] P. Stoica, J. Li, and Y. Xie, "On probing signal design for MIMO radar," IEEE Trans. Signal Process., vol. 55, no. 8, pp. 4151–4161, Aug. 2007.
- [3] A. Hassanien and S. Vorobyov, "Phased-MIMO radar: a trade off between phased-array and MIMO radars," IEEE Trans. Signal Process., vol. 58, no. 6, June 2010.
- [4] Eli Brookner, "MIMO Radar Demystified and Where it Makes Sense to Use," Raytheon Co., IEEE, 2013.
- [5] K. W. Forsythe and D. W. Bliss, "Waveform correlation and optimization issues for MIMO radar" in Proc. 39th Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput., Pacific Grove, CA, pp. 1306–1310, Nov. 2005.
- [6] W. Huleihel, J. Tabrikian, and R. Shavit, "Optimal Adaptive Waveform design for Cognitive MIMO Radar," IEEE Trans. Signal Process., vol. 61, no. 20, 2013.
- [7] J. Li and P. Stoica, "MIMO Radar Signal Process," Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009.
- [8] S. M. Kay, "Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory," Prentice Hall PTR, 1998.
- [9] G. Hua and S. Abeysekera, "A comparison on DOA parameter identifiability for MIMO and phased-array radar," In Proc. of the Int. Conf. on Information, Communications and Signal Processing (ICICS), 2013, 1-5.
- [10] M. Abramowitz and I. A. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions," National Bureau of Standards, Washington DC, 1972.
- [11] M. I. Skolnik (ed.), "Radar Handbook," 3rd Edition, McGraw Hill, 2008.
- [12] H. Wasim, J. Tabrikian, and R. Shavit, "Optimal sequential waveform design for cognitive radar," Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2012 IEEE International Conference, IEEE, 2012.

A Comparison of the Tracking Performance of Cognitive Co-Located MIMO and Phased-Array Radars

S. A. Mousavi, M. Farhang^{*}, M. A. Masnadi Shirazi

Shiraz University

(Received: 02/01/2017, Accepted: 04/12/2017)

Abstract

In this paper, we analyze and compare the tracking performance of cognitive co-located MIMO and phased-array radars. The cognitive MIMO radar optimizes its transmitted signal based on information from previous observations, and meanwhile obtains an estimate of the target parameters. The optimization criterion for the design of the transmitted signal is minimizing the Bayesian Cramer-Rao Bound (BCRB). The monopulse tracking method is assumed to be used in the phased-array radar. The simulation results show that the phased-array radar outperforms the cognitive MIMO radar in the tracking performance, despite the waveform diversity presented in MIMO radars. The phased-array radar has a much lower complexity and achieves a better estimate of the target angle in terms of the mean-square error and bias of the estimation.

Keywords: Cognitive Co-Located MIMO Radar, Phased-Array Radar, Bayesian Cramer-Rao Bound (BCRB), Monopulse Tracking