

بهبود مکان‌یابی در رادار MIMO با استفاده از اطلاعات پیشین

مجید زارعی^{۱*}، جواد رنجبر^۲، فرهاد صادقی آملو^۳، جعفر خلیل‌پور^۴

۱- استادیار، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)^۲ و ۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)^۴، ۴- دانشیار، دانشگاه پدافند هوایی خاتم‌الانبیاء (ص)
(دریافت: ۹۷/۱۲/۱۷؛ پذیرش: ۹۸/۰۹/۰۸)

چکیده

دسته جدیدی از سامانه‌های رادار بنام رادارهای MIMO در دهه گذشته مطرح گردیده‌اند. این سامانه‌ها مزیت‌های بسیاری را از لحاظ آشکارسازی و تخمین پارامترهای اهداف نسبت به سامانه‌های قبل به ارمغان آورده‌اند. با توجه به محدودیت‌هایی که روش‌های مکان‌یابی مرسوم دارند، جهت استفاده از تمام مزیت‌های رادارهای MIMO نیاز به استفاده از روش‌های جدید برای پردازش سیگنال است. در این مقاله تخمین DOA برای رادار MIMO با استفاده از روش‌های حسگری فشرده بررسی گردیده است. با توجه به این که در کاربردهای عملی همچون تخمین DOA اطلاعات پیشین درباره محل اهداف وجود دارد، با استفاده از وزن‌دهی مناسب در روش پیشنهادی (P_{1,2,w})، بازیابی جهت، دامنه و تفکیک‌پذیری اهداف نتایج مطلوب‌تری داشته و با تعداد اندازه‌گیری کمتر انجام گردیده است. به طوری که مقدار ۲۳٪ بهبود نسبت به روش‌های رایج مشاهده می‌شود. مسئله بازیابی برای دو ماتریس اندازه‌گیری بررسی گردیده است و طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها با انتخاب ماتریس اندازه‌گیری گوسی می‌توان بازیابی سیگنال را با ۸٪ اندازه‌گیری کمتر نسبت به ماتریس اندازه‌گیری واحد ناقص انجام داد.

واژگان کلیدی

رادار MIMO، مکان‌یابی، تخمین DOA، حسگری فشرده، کاهش تعداد اندازه‌گیری

۱. مقدمه

تخمین DOA^۴ یکی از نیازهای اساسی برای سامانه‌های رادار است. روش‌های مرسوم برای تخمین DOA در سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌گردند [۴]: روش‌های شکل‌دهی پرتو مانند Capon [۵]، روش‌های زیر فضا مانند MUSIC [۶] و روش‌های پارامتری مانند NLS [۷]. هر یک از این روش‌ها دارای محدودیت‌های مشخصی می‌باشند. به‌طور مثال در MUSIC و NLS تعداد اهداف باید مشخص باشد. Capon و MUSIC برای تخمین دقیق از تعداد تصاویر لحظه‌ای^۷ بزرگ استفاده می‌نمایند. برای NLS تعیین دقیق نقطه آغازین برای مسئله بهینه‌سازی نیاز است. دسته دیگری از روش‌ها با عنوان بیان تنک^۸ سیگنال یا حسگری فشرده^۹ برای تخمین طیف و در حالت خاص‌تر برای تخمین DOA معرفی گردیده‌اند [۸]. روش‌های حسگری فشرده قابلیت استفاده در حالت‌هایی همچون تعداد اهداف نامشخص، تعداد تصاویر لحظه‌ای محدود (و حتی با یک تصویر لحظه‌ای) و اهداف همبسته^{۱۰} را دارا می‌باشند.

آشکارسازی، مکان‌یابی و ردیابی اهداف جزو کاربردهای اولیه رادار می‌باشند. محدود بودن تعداد اندازه‌گیری‌ها^۱ و کم بودن SNR^۲ جزو چالش‌های مکان‌یابی می‌باشد. یکی دیگر از چالش‌ها جداسازی اهداف نزدیک به هم از لحاظ مکان یا داپلر است [۱]. در رادارهای MIMO^۳، آرایه فرستنده با شکل موج‌های متعامد به‌طور هم‌زمان تغذیه می‌گردد. با توجه به تعامد بین شکل موج‌های ارسالی سیگنال دریافتی در آرایه گیرنده پردازش می‌گردد. رادارهای MIMO با توجه به مکان قرارگیری آنتن‌های آرایه فرستنده و گیرنده به دودسته هم‌مکان [۲] و گسترده [۳] تقسیم‌بندی می‌گردند. بسته به اینکه از کدام ساختار استفاده گردد، مزیت‌هایی همچون افزایش تعداد اهداف قابل آشکارسازی، افزایش تفکیک‌پذیری فضایی، بهبود توانایی مقابله با تداخل و بسیاری مزیت‌های دیگر فراهم می‌گردد که این سامانه‌ها نسبت به رادارهای مرسوم همچون رادار آرایه فازی دارا می‌باشند.

^۴ Direction of Arrival (DOA)

^۵ Multiple Signal Classification

^۶ Nonlinear Least Square

^۷ Snapshots

^۸ Sparse

^۹ Compressive Sensing

^{۱۰} Correlated

*رایانامه نویسنده مسئول: majidzarie@yahoo.com

^۱ Measurement

^۲ Signal to Noise Ratio (SNR)

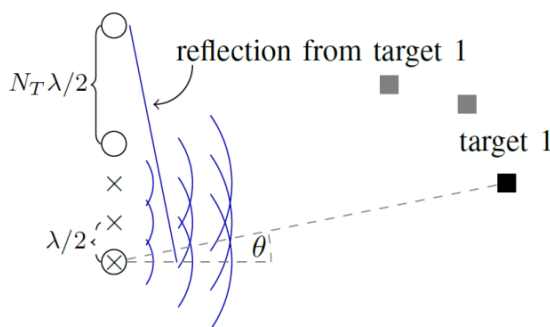
^۳ Multiple Input Multiple Output (MIMO)

در بخش ۲، مدل سامانه برای تخمین DOA معرفی گردیده است. در ادامه روش بازیابی سیگنال استفاده شده توضیح داده شده است. در بخش ۳، روش پیشنهادی با استفاده از اطلاعات پیشین توضیح داده شده است. در بخش ۴، ابتدا عملکرد روش های تخمین جهت مقایسه شده است و در ادامه عملکرد روش پیشنهادی با شبیه سازی برای دو ماتریس اندازه گیری توضیح داده شده است. در نهایت در بخش ۵ نتیجه گیری بیان شده است.

۲. مدل سامانه

یک رادار MIMO با N_T آنتن فرستنده و N_R آنتن گیرنده در نظر گرفته شده است که به صورت هم مکان قرار گرفته اند. S هدف را در میدان دور نسبت به آرایه و در یک صفحه با آنتن ها در نظر گرفته شده است. در شکل (۱) مدل سامانه نشان داده شده است. در این مقاله برای سادگی فضا را دوبعدی در نظر گرفته ایم. نتایج کار را می توان برای فضای سه بعدی هم بسط داد. فرض شده است که آنتن های فرستنده و گیرنده به ترتیب در فاصله $\lambda/2$ و $N_T \lambda/2$ از هم قرار گرفته باشند. در این رابطه λ معکوس فرکانس حامل است. انتخاب این فاصله برای آنتن ها حداکثر تعداد آنتن برای آرایه مجازی با $N_T N_R$ آنتن را به دست می دهد. بردار منیفلد آرایه مجازی با رابطه زیر تعریف می گردد:

$$\mathbf{a}(\theta) = \mathbf{b}(\theta) \otimes \mathbf{c}^T(\theta) \quad (1)$$



شکل (۱): رادار MIMO. \times بیانگر آنتن های فرستنده و 0 بیانگر آنتن های گیرنده است [۱۳].

در رابطه فوق، $c(\theta)$ و $b(\theta)$ به ترتیب بردار منیفلد آرایه فرستنده و گیرنده می باشند. سیگنال باند پایه دریافتی در زمان t و در آنتن $r=0,1,\dots,N_R-1$ که مجموع بازتاب های سیگنال های تغذیه $s_j, j=0,1,\dots,N_T-1$ است، دارای رابطه زیر است.

روش های نرم $l_{1,2}$ [۹] و $l_{q,2}$ [۱۰] و [۱۱] برای بازیابی سیگنال تنک بلاکی^۱ معرفی گردیده اند که در بخش ۲-۲ نحوه استفاده از این روش ها برای تخمین DOA توضیح داده شده است.

پارامترهای مؤثر در تعداد اندازه گیری ها برای بازیابی سیگنال در یک سامانه MIMO تعداد آنتن های فرستنده و گیرنده، پهنای باند سیگنال ارسالی و زمان مشاهدات در گیرنده می باشند [۱۳-۱۲]. استفاده از روش هایی برای تخمین DOA با تعداد اندازه گیری کمتر دارای دلایل متعددی است. به طور مثال در کاربردهای رادار در وسایل نقلیه به دلیل محدودیت جا در تعبیه آنتن ها و همچنین جابه جایی زیاد (کاهش زمان همدوسی کانال) تعداد اندازه گیری های ممکن کاهش می یابد [۱۴]. در کاربردهایی مانند انتقال هم زمان انرژی و داده که در زمان یکسان یا از حسگرهای یکسان به صورت هم زمان به منظور انجام هر دو عمل استفاده می گردد، نیاز است که با تعداد اندازه گیری کمتر تخمین انجام گردد [۱۵].

در کارهای قبل در تخمین DOA از اطلاعات پیشین استفاده شده است. در [۱۶-۱۷] با اطلاع از بخش فضایی^۲ که اهداف در آن قرار دارند، ماتریس شکل دهی پرتو^۴ فرستنده باهدف افزایش SNR در گیرنده طراحی گردیده است. در [۱۸] با اطلاع از بخشی که جمر^۵ در آن قرار دارد ماتریس شکل دهی پرتو در گیرنده جهت کاهش اثر جمر در تخمین DOA طراحی گردیده است. هر دو کار از MUSIC برای تخمین استفاده کرده اند [۱۹]. مسئله بازیابی سیگنال تنک را با استفاده از اطلاعات پیشین معرفی کرده است. در پردازش سیگنال های رادار، یک مهندس رادار از محدوده سرعت پرواز یک هواپیما یا محدوده ای از زوایا که هدف در آن قرار دارد اطلاع دارد. در این مقاله با استفاده از احتمال حضور هدف در بخش های مختلف فضا تخمین DOA انجام گردیده است. روش پیشنهادی با بهره گیری از مزیت های روش های حسگری فشرده، امکان تخمین DOA را با تعداد اندازه گیری کمتر فراهم می نماید. همچنین اثر انتخاب ماتریس اندازه گیری در دو مثال بر روی تعداد اندازه گیری لازم برای بازیابی زاویه و دامنه هدف با خطای کم بررسی گردیده است. در مثال اول ماتریس اندازه گیری گوسی انتخاب گردیده است و در مثال دوم ماتریس واحد ناقص^۶ انتخاب شده است.

¹ Norm
² Block Sparse
³ Space Sector
⁴ Beamforming
⁵ Jammer
⁶ Partial Identity

حالتی که تنها تخمین DOA مدنظر است، ماتریس مشبک \mathbf{F} را با رابطه $F = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_q)] \in \mathbb{C}^{q \times q}$ تعریف می‌نمایند که به آن ماتریس منیفلد آرایه می‌گویند. ماتریس اندازه‌گیری دارای ابعاد $m \times q$ است. در این روابط q تعداد کلاسترهای زاویه‌ای برای تقسیم فضا است که در شکل (۲) نشان داده شده است و m تعداد اندازه‌گیری‌ها نامیده می‌شود. با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و کاربردهای ذکر شده نیاز به کاهش تعداد اندازه‌گیری‌ها برای تخمین است. با توجه به توضیحات بیان شده بدیهی است که رابطه (۵)، بیان معادل رابطه (۴) می‌باشد. تعریف سیگنال دریافتی به صورت رابطه (۵) امکان بازیابی با تعداد نمونه‌های کمتر با استفاده از روش‌های حسگری فشرده امکان‌پذیر می‌گردد. با گرفتن k تصویر لحظه‌ای برای معادله (۵) می‌توان نوشت:

$$Y \triangleq [y(1), \dots, y(k)] = \mathbf{A}\mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{E} \quad (۶)$$

که در رابطه فوق، $X = [x(1), \dots, x(k)] \in \mathbb{C}^{q \times k}$ و همچنین \mathbf{E} نیز به‌طور مشابه تعریف می‌گردد.

۲-۲. مقایسه روش‌های تخمین DOA

برای سیگنال تنک بلاکی $x \in \mathbb{R}^n$ که از پشت سر هم قرار گرفتن q بلاک $\theta_b, b=1, \dots, q$ تشکیل شده است. پشتیبان بلاک را مجموعه‌ای از بلاک‌ها با نرم l_2 غیر صفر تعریف می‌نمایند. یک سیگنال تنک بلاکی با استفاده از مسئله بهینه‌سازی زیر قابل بازیابی است.

$$P_{0.2}: \min_{z \in \mathbb{R}^n} \|z\|_{0.2} := \sum_{b=1}^q 1_{\|z\theta_b\|_2 > 0} \quad (۷)$$

$$s.t. y = \mathbf{A}z$$

که در رابطه فوق، $\mathbf{1}_b$ تابع مشخصه رخداد \mathcal{E} است. این مسئله پیچیدگی زمانی بالایی دارد. [۹ و ۲۲] نشان داده‌اند که مسئله فوق را می‌توان به صورت مسئله ساده‌شده برای بهینه‌سازی $l_{1,2}$ تعریف کرد.

$$P_{1.2}: \min_{z \in \mathbb{R}^n} \|z\|_{1.2} := \sum_{b=1}^q \|z\theta_b\|_2 \quad (۸)$$

$$s.t. y = \mathbf{A}z$$

روش‌های دیگری نیز برای ساده کردن و قابل حل شدن نرم $l_{q,2}$ پیشنهاد گردیده است. دو روش SVD- l_1 [۲۳] و $l_{q,2}$ [۱۰-۱۱] جزو روش‌هایی هستند که کاربرد آن‌ها در تخمین DOA سیگنال‌های تنک بررسی گردیده است. SVD- l_1 مانند روش‌های زیر فضا از یک مرحله SVD استفاده می‌نماید و سپس بازیابی سیگنال تنک را با مسئله حداقل سازی l_1 حل می‌نماید. این روش نیاز به اطلاع اولیه از تعداد اهداف دارد و در صورتی که تعداد اهداف مشخص نباشد، عملکرد تخمین افت می‌نماید. روش

$$y_r(t) = \sum_{k=0}^{S-1} x_k e^{i2\pi r N_T \beta_k} \sum_{j=0}^{N_T-1} e^{i2\pi j \beta_k} s_j(t - \tau_k) e^{i2\pi \theta_k t} + n(t) \quad (۲)$$

در این رابطه، θ_k و $\tau_k \cdot \beta_k \in [0, 1]$ ، $b_k \in \mathbb{C}$ به ترتیب ضریب تضعیف (مرتبط با سطح مقطع راداری هدف)، پارامتر زاویه، تأخیر و جابه‌جایی داپلر هدف k ام می‌باشند. این پارامترها با رابطه زیر با زاویه، فاصله و سرعت هدف ارتباط دارند [۲۰].

$$\beta = \sin(\theta), \tau = \frac{2r}{c}, \theta = 2\lambda^{-1}v \quad (۳)$$

با توجه به این که سیگنال y_r دارای باند محدود و تقریباً زمان محدود است، می‌توان آن را با $L = \mathbf{B}\mathbf{T}$ نمونه مشخص نمود [۱۳]. با تعریف بردار $r \triangleq [\beta, \tau, \theta]$ رابطه (۲) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد [۲۱].

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 \\ \mathbf{y}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{N_R-1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{e}, \mathbf{z} = \sum_{k=0}^{S-1} x_k f(\mathbf{r}_k) \quad (۴)$$

در رابطه فوق، $[f(\mathbf{r})]_{v,k,p} = e^{i2\pi(v\beta + k\tau + p\theta)}$ است و $L = 2N + 1$ که $v = 0, 1, \dots, N_T N_R - 1, k, p = -N, \dots, N$ است. ماتریس اندازه‌گیری نامیده می‌شود.

۱-۲. بهبود مشبک^۱

با توجه به این که پارامترهای اهداف مقادیر پیوسته می‌باشند و بازیابی را بر روی یک مشبک بزرگ^۲ در نظر می‌گیرند که فاصله‌بندی مشبک به صورت $(1/N_T N_R, 1/B, 1/T)$ است. با توجه به محدودیت‌های فیزیکی امکان ریزتر کردن مشبک وجود ندارد و برای کاهش خطای بازیابی نیاز است که مشبک ریزتر در نظر گرفته شود. در [۲۱] مدل رابطه زیر برای ریزتر کردن مشبک بیان گردیده است.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (۵)$$

در این رابطه، بردار $\mathbf{r}_k = [\beta, \tau, \theta]$ بر روی یک مشبک با فاصله‌بندی $q_1, q_2, q_3 \geq L = 2N + 1$ قرار گرفته است. برای

¹ Grid
² Coarse grid

برای اعمال تعداد L وزن w در q ناحیه (کلاستر) به ازای ω_i ‌های به‌دست‌آمده، می‌توان از رابطه ۱۲ استفاده نمود. در این رابطه ماتریس تبدیل $D \in \mathbb{C}^{q \times L}$ یک ماتریس باینری بوده و وظیفه آن توزیع صحیح وزن‌های w می‌باشد.

$$\mathbf{w} = \mathbf{D}\boldsymbol{\omega} \quad (12)$$

$$\mathbf{D}_{q \times L} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{L_1} & \mathbf{0}_{L_1} & \cdots & \mathbf{0}_{L_1} \\ \mathbf{0}_{L_2} & \mathbf{1}_{L_2} & \cdots & \mathbf{0}_{L_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{L_L} & \mathbf{0}_{L_L} & \cdots & \mathbf{1}_{L_L} \end{bmatrix} \quad (13)$$

اعمال ضرایب احتمالات به‌طور معکوس موجب خواهد شد که هنگام اعمال شرط تنک کردن، خطای بازسازی کاهش یافته و احتمال آشکارسازی در نواحی که احتمال وجود هدف در آن‌ها بیشتر است، افزایش پیدا کند. این کار باعث بازسازی سیگنال (منابع سیگنال یا همان جهت ورود سیگنال) به‌صورت فشرده و با تعداد کمتری نمونه‌های اندازه‌گیری (حسگری فشرده) و در عین حال با خطای کمتر بازسازی خواهد شد.

۴. نتایج شبیه‌سازی

در شکل‌های (۳-۵) روش پیشنهادی $P_{1,2,w}$ با روش‌های Capon، MUSIC و JLZA از نظر توانایی تشخیص موقعیت اهداف، مقدار دامنه متناسب با سطح مقطع راداری اهداف دور از هم و قدرت تشخیص اهداف نزدیک به هم (تفکیک‌پذیری)، به‌منظور تخمین DOA مقایسه گردیده است. در این شبیه‌سازی‌ها تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده به ترتیب برابر $N_R = 5$ و $N_T = 5$ در نظر گرفته شده است. تعداد کلاسترهای زاویه‌ای و تعداد تصاویر لحظه‌ای به ترتیب برابر $q = 100$ ، $m = 25$ و $k = 100$ است.

در شکل‌های (۳-۴) هدف، مقایسه روش‌های Capon، JLZA و MUSIC با روش پیشنهادی، از نظر توانایی تشخیص موقعیت اهداف و مقدار دامنه متناسب با سطح مقطع راداری اهداف دور از هم، در شرایط بدون نویز (شکل ۳) و حضور نویز (شکل ۴) می‌باشد. در شکل (۳) موقعیت اهداف در ۳۹، ۵۳ و ۴۷-درجه و SNR=5 dB در نظر گرفته شده است. تمامی روش‌ها از نظر توانایی تشخیص موقعیت اهداف و مقدار دامنه متناسب با سطح مقطع راداری دارای عملکردی مناسب بوده به جز روش JLZA که دامنه متناسب با سطح مقطع راداری را به‌درستی تخمین نکرده است. در شکل (۴) موقعیت اهداف در ۳۹، ۵۳ و ۴۷-درجه و SNR=0 dB در نظر گرفته شده است. در این شرایط با

دیگر که با نام JLZA [۱۱] نیز شناخته می‌گردد، نیازی به اطلاع اولیه از تعداد اهداف ندارد. تنها عیب این روش افت عملکرد برای اهداف نزدیک به هم در SNR‌های پایین است. عملکرد روش‌های حسگری فشرده با روش‌های پیشین برای اهداف نزدیک به هم و نویزی در بخش ۴ مقایسه گردیده است.

۳. روش پیشنهادی

چالش اصلی در بازبانی یک سیگنال تنک بلاکی، پیدا کردن پشتیبان‌های بلاک می‌باشد. در صورتی که اطلاعات تکمیلی در خصوص پشتیبان بلاک‌ها وجود داشته باشد، می‌توان معادله بهینه‌سازی (۸) را با تعداد کمتری اندازه‌گیری حل نمود. در کاربردهای عملی، یک مهندس رادار از احتمال وجود اهداف در بخش‌های مختلف فضا اطلاع دارد. تقسیم فضا به بخش‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. انتظار می‌رود با داشتن اطلاعات پیشین بازبانی محل پشتیبان‌های بلاک‌ها با تعداد اندازه‌گیری‌های کمتر انجام شود. در روش پیشنهادی رابطه (۸) به‌صورت وزن‌دار نوشته شده و اطلاعات پیشین به وزن‌های معادله بهینه‌سازی فوق اعمال شده است. به‌منظور انجام این کار بایستی معادله (۸) به‌صورت زیر بیان شود.

$$P_{1,2,w}: \min_{\mathbf{z} \in \mathbb{R}^n} \|\mathbf{z}\|_{1,2,w} := \sum_{b=1}^q w_b \|\mathbf{z} \boldsymbol{\theta}_b\|_2 \quad (9)$$

$$s.t. \mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{z}$$

که در رابطه فوق $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_q]^T$ است. برای محاسبه وزن‌های فوق از احتمال موجود اهداف در بعضی از نواحی به‌عنوان اطلاعات پیشین استفاده می‌شود. با فرض اینکه فضای \mathbb{R}^n به q بلوک $\{v_1, v_2, \dots, v_q\}$ تقسیم‌بندی شده باشد و با فرض این‌که بردار تنک $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ دارای پشتیبان بلاک B باشد، می‌توان L تا تخمین برای پشتیبان‌های بلوکی $P_i \subseteq \{v_1, v_2, \dots, v_q\}$ با دقت زیر محاسبه نمود [۱۹]:

$$\alpha_i = \frac{|P_i \cap B|}{|P_i|}, \quad i = 1, \dots, L \quad (10)$$

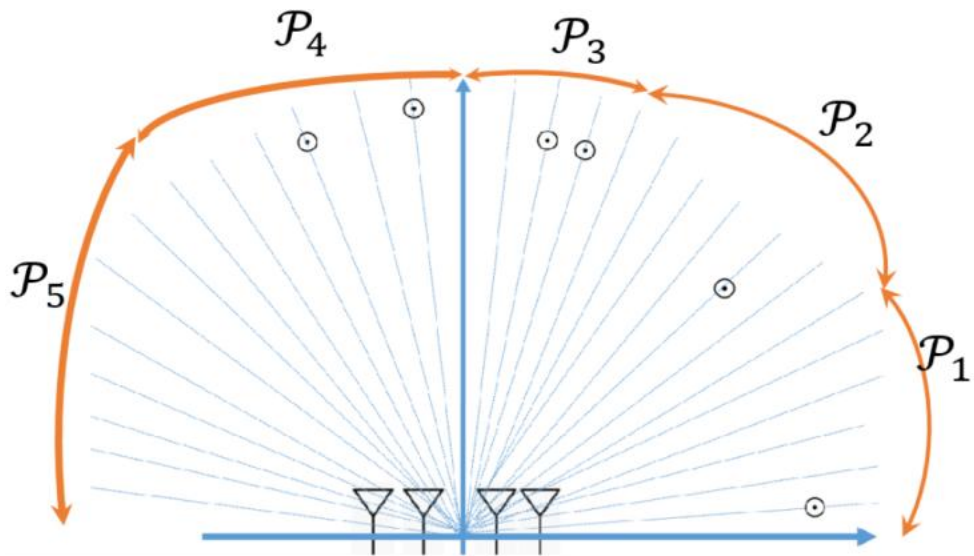
که در آن، P_i مجموعه پشتیبان‌های مرتبط با زیر فضای i ام است. عملگر $|\cdot|$ سایز مجموعه را به دست می‌دهد. در روش پیشنهادی مقاله، وزن‌ها با نسبت معکوس احتمال حضور اهداف در هر بخش از فضا به معادله (۹) اعمال می‌شوند. با توجه به اینکه مسئله بهینه‌سازی تعریف‌شده در رابطه (۹) یک مسئله حداقل‌سازی است، جهت اعمال اثر وزن‌ها با توجه به احتمال قرارگیری اهداف از رابطه (۱۱) استفاده گردیده است.

$$\omega_i = \frac{1}{\alpha_i} \quad (11)$$

$$|\omega_i| = L_i, \quad i = 1, \dots, L$$

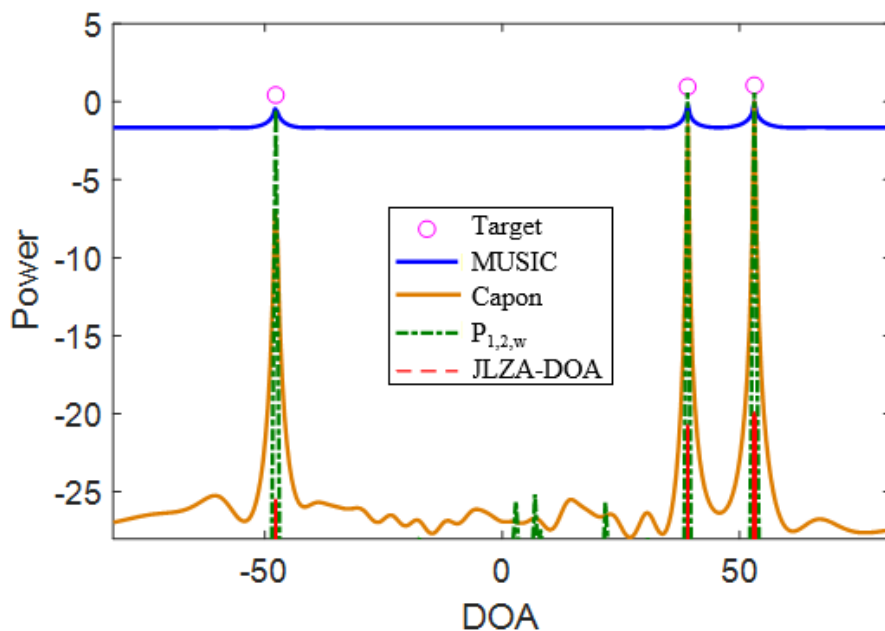
روش MUSIC مقدار دامنه متناسب با سطح مقطع راداری بهتر تخمین زده است. در این حالت‌ها دامنه متناسب با سطح مقطع راداری اهداف دور از هم توسط روش پیشنهادی به میزان -21 dB در حالت بدون نویز و -25 dB در حالت نویزی، نسبت به روش JLZA بهتر تخمین زده شده است.

وجود این روش Capon و JLZA توانایی تشخیص موقعیت اهداف را دارند ولی دامنه هدف که متناسب با سطح مقطع راداری آن می‌باشد را به درستی تخمین نزنده‌اند که بیانگر حساسیت این روش‌ها نسبت به سطح نویز می‌باشد. در این حالت روش پیشنهادی و روش MUSIC از نظر هر دو معیار، عملکرد مطلوبی داشته‌اند هر چند روش پیشنهادی نسبت به

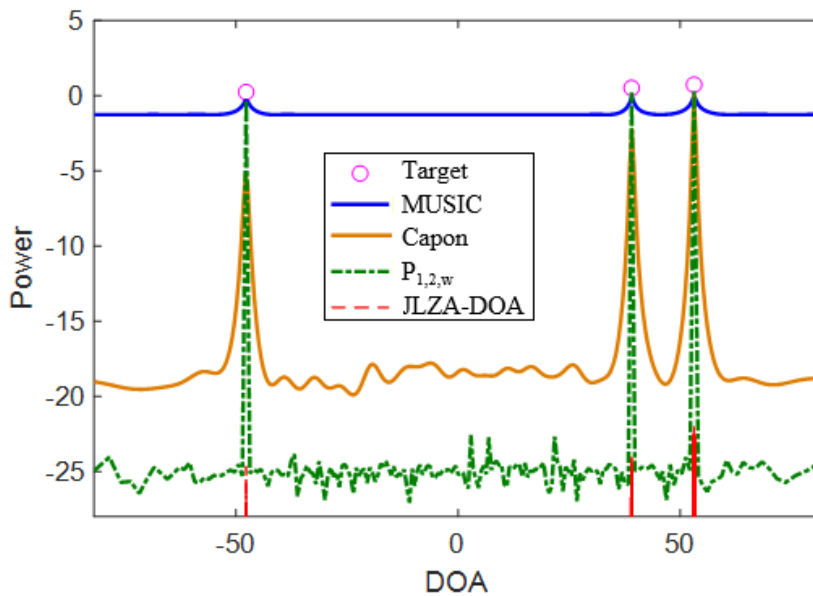


شکل (۲): تقسیم فضا به $q = 30$ کلاستر زاویه‌ای با $L = 5$ ناحیه فضایی که احتمالات هر ناحیه به ترتیب برابر $\alpha_1 = \frac{1}{6}$ و $\alpha_2 = \frac{1}{6}$ و $\alpha_3 = \frac{1}{2}$

$$\alpha_4 = \frac{1}{3} \text{ و } \alpha_5 = 0$$



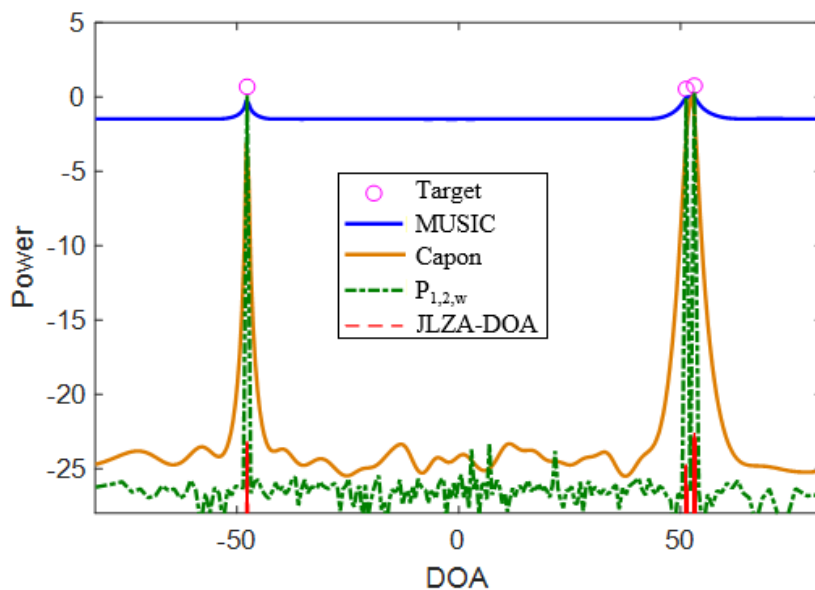
شکل (۳): مقایسه روش پیشنهادی و سایر روش‌ها از نظر توانایی تشخیص موقعیت اهداف و مقدار دامنه متناسب با سطح مقطع راداری اهداف دور از هم، در شرایط بدون نویز



شکل (۴): مقایسه روش پیشنهادی و سایر روش‌ها از نظر توانایی تشخیص موقعیت اهداف و مقدار دامنه متناسب با سطح مقطع راداری اهداف دور از هم، در شرایط حضور نویز

به طوری که روش‌های MUSIC و Capon به کلی قادر به موقعیت-یابی اهدافی با ۲ درجه اختلاف زاویه‌ای را نداشته‌اند، در صورتی که روش پیشنهادی علاوه بر تشخیص موقعیت اهداف فوق، در تخمین دامنه متناسب با سطح مقطع راداری اهداف نزدیک به هم، به مقدار -25 dB تخمین دقیق‌تری نسبت به روش JLZA زده است.

در شکل (۵) روش‌های مذکور از نظر تفکیک‌پذیری و قدرت تشخیص اهداف نزدیک به هم مورد با در نظر گرفتن موقعیت اهداف در 53° ، 51° و -47° درجه و $SNR=5$ dB مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد روش پیشنهادی و روش JLZA برخلاف روش‌های Capon و MUSIC توانایی تخمین DOA اهداف نزدیک به هم را دارا می‌باشند.



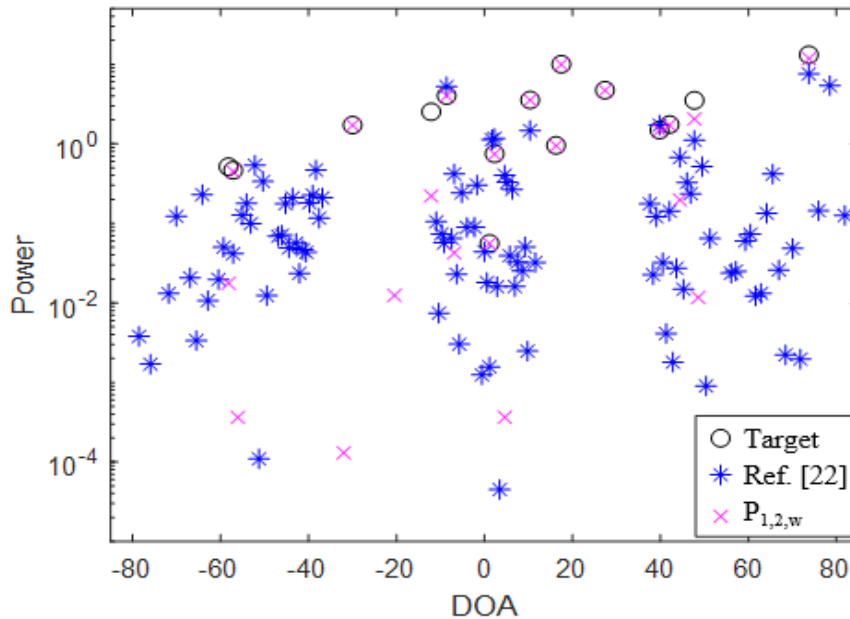
شکل (۵): مقایسه روش پیشنهادی و سایر روش‌ها از نظر قدرت تشخیص اهداف نزدیک به هم، در شرایط بدون نویز

قرار گرفته است. در این شکل‌ها $S=15$ هدف در نظر گرفته‌ایم که در نیم فضای بین $[-90^\circ, 90^\circ]$ پخش گردیده‌اند. این فضا

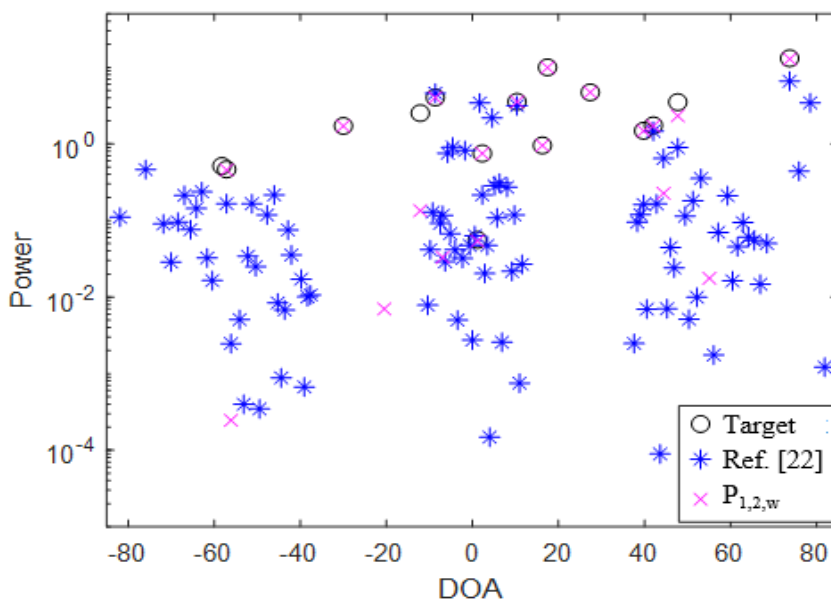
در شکل‌های (۶-۷) روش پیشنهادی $P_{1,2,w}$ و مرجع [۲۲] با ماتریس‌های اندازه‌گیری گوسی و واحد ناقص مورد ارزیابی

مثال بررسی گردیده است. در حالت اول ماتریس اندازه‌گیری گوسی $A \in \mathbb{C}^{m \times q}$ و حالت دوم ماتریس اندازه‌گیری واحد ناقص (ماتریس است که m سطر از q سطر ماتریس واحد به صورت تصادفی انتخاب شده است) انتخاب گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که معادله بهینه‌سازی وزن‌دار با تعداد نمونه اندازه‌گیری کمتری توانسته نتایج بهتری داشته باشد.

به $q=100$ مشبک زاویه‌ای تقسیم گردیده است. با توجه به اینکه در مسائل عملی مهندسی رادار از احتمال وجود اهداف در نواحی مختلف فضا اطلاع دارند، احتمال حضور اهداف در نواحی مختلف به صورت $\alpha_1 = \frac{1}{6}$ و $\alpha_2 = \frac{1}{6}$ و $\alpha_3 = \frac{1}{2}$ و $\alpha_4 = \frac{1}{3}$ و $\alpha_5 = 0$ در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل معرفی شده در رابطه (۶) و انتخاب تعداد اندازه‌گیری‌ها برابر با $m = 30$ دو



شکل (۶): مقایسه روش پیشنهادی $P_{1,2,w}$ و مرجع [۲۲] با ماتریس اندازه‌گیری گوسی



شکل (۷): مقایسه روش پیشنهادی $P_{1,2,w}$ و مرجع [۲۲] با ماتریس اندازه‌گیری واحد ناقص

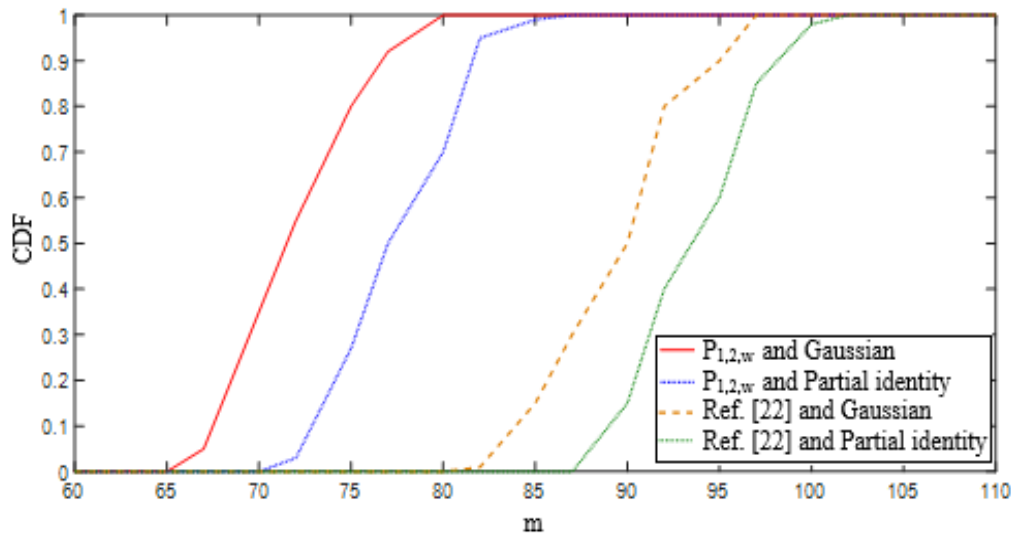
خطای بازیابی با استفاده از دو نوع ماتریس اندازه‌گیری و مقایسه روش پیشنهادی $P_{1,2,w}$ و مرجع [۲۲] می‌باشد. با توجه به نتایج، با استفاده از ماتریس اندازه‌گیری گوسی و وزن دهی مناسب

در شکل (۸) تابع توزیع تجمعی برای بازیابی دامنه و جهت اهداف با شرط $\|x - \hat{x}\|_2 \leq 10^{-4}$ رسم گردیده است. این نمودار بیانگر تعداد اندازه‌گیری لازم برای رسیدن به مقدار مطلوب

روش مورد مقایسه، بهبود داشته است. طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل فوق با انتخاب ماتریس اندازه‌گیری گوسی به جای ماتریس اندازه‌گیری واحد ناقص، می‌توان بازیابی سیگنال را با ۸٪ اندازه‌گیری کمتر انجام داد.

می‌توان با تعداد اندازه‌گیری کمتر به مقدار خطای مورد نیاز رسید.

همان‌گونه که در شکل فوق دیده می‌شود، روش پیشنهادی از نظر تعداد اندازه‌گیری‌های مورد نیاز، حدود ۲۳٪ نسبت به



شکل (۸): مقایسه تعداد اندازه‌گیری‌های مورد نیاز روش پیشنهادی $P_{1,2,w}$ و مرجع [۲۲] با ماتریس‌های اندازه‌گیری گوسی و ماتریس اندازه‌گیری واحد ناقص با استفاده از تابع توزیع تجمعی

پیشنهادی از نظر تعداد اندازه‌گیری‌های لازم، دارای بهترین نتیجه بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله تخمین DOA مبتنی بر حسگری فشرده با استفاده از اطلاعات پیشین درباره یافتن اهداف در بخش‌های مختلف فضا بررسی گردید. در روش پیشنهادی $P_{1,2,w}$ ، اطلاعات پیشین در قالب ضرایب ماتریس اندازه‌گیری گوسی و واحد ناقص به صورت معکوس مقادیر احتمال وجود هدف در بخش‌های مختلف فضای سیگنال به معادله بهینه‌سازی پیشنهادی اعمال گردید. این فرایند باعث کاهش خطای بازسازی و افزایش احتمال آشکارسازی در نواحی می‌شود که احتمال وجود هدف در آن‌ها بیشتر است. از طرفی این کار باعث می‌شود بازسازی سیگنال به صورت فشرده انجام شود. روش پیشنهادی از نظر توانایی تشخیص موقعیت اهداف و مقدار دامنه متناسب با سطح مقطع راداری اهداف دور از هم و نزدیک به هم در شرایط بدون نویز و حضور نویز و همچنین تعداد اندازه‌گیری‌های لازم جهت تخمین DOA، با روش‌های رایج مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از نظر همه معیارهای مذکور از نتایج بهتری برخوردار بوده است. به‌ویژه از نظر تشخیص موقعیت اهداف در حضور نویز و تشخیص موقعیت اهداف نزدیک به هم نسبت به برخی روش‌های رایج که حتی برخی از آن‌ها قادر به تفکیک اهداف نزدیک به هم نیز نبوده‌اند، از نتایج بسیار مطلوب‌تری برخوردار بوده است. همچنین روش

۶. منابع

- [1] T. Strohmer and H. Wang, "Adventures in Compressive Sensing Based MIMO Radar," *Excursions in Harmonic Analysis*, vol. 3, pp. 285-326, 2015.
- [2] J. Li and P. Stoica, "MIMO Radar with Colocated Antennas," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 106-114, 2007.
- [3] A. Haimovich, R. Blum, and L. Cimini, "MIMO Radar with Widely Separated Antennas," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 1, pp. 116-129, 2008.
- [4] P. Chung, M. Viberg, and J. Yu, "DOA Estimation Methods and Algorithms," *Academic Press Library in Signal Processing*, pp. 599-650, 2014.
- [5] J. Capon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, 1969.
- [6] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, 1986.
- [7] A. Zoubir, M. Viberg, S. Theodoridis, and R. Chellappa, "Array and statistical signal processing," *Academic Press*, 2013.
- [8] Z. Yang, J. Li, P. Stoica, and L. Xie, "Sparse methods for direction-of-arrival estimation," *Academic Press Library in Signal Processing*, vol. 7, pp. 509-581, 2018.
- [9] E. Candes and T. Tao, "Decoding by Linear Programming," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 12, pp. 4203-4215, 2005.

- [17] S. A. Moghaddasi, H. Khaleghi, and M. Fallah, "Beam Pattern Design in Phased MIMO Radars for Known Target Locations," *Journal of Radar*, vol. 3, no. 4, pp. 25-32, 2016. (In Persian)
- [18] Y. Li, S. A. Vorobyov, and A. Hassani, "MIMO radar capability on powerful jammers suppression," 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Florence, pp. 5277-5281, 2014.
- [19] D. Needell, "Weighted L1-minimization for sparse recovery under arbitrary prior information," *Information and Inference: A Journal of the IMA*, vol. 6, no. 3, 2017.
- [20] M. Rossi, A. M. Haimovich, and Y. C. Eldar, "Spatial Compressive Sensing for MIMO Radar," In *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 2, pp. 419-430, 2014.
- [21] R. Heckel and M. Soltanolkotabi, "Generalized Line Spectral Estimation via Convex Optimization," In *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 64, no. 6, pp. 4001-4023, 2018.
- [22] D. L. Donoho, "For most large underdetermined systems of linear equations the minimal 1- norm solution is also the sparsest solution," *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 59, no. 6, pp. 797-829, 2006.
- [23] D. Malioutov, M. Cetin, and A. S. Willsky, "A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays," In *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 8, pp. 3010-3022, 2005.
- [10] Jiadong Shang, Zulin Wang, and Qin Huang, "A Robust Algorithm for Joint Sparse Recovery in Presence of Impulsive Noise," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 8, pp. 1166-1170, 2015.
- [11] M. Hyder and K. Mahata, "Direction-of-Arrival Estimation Using a Mixed L2,0 Norm Approximation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, pp. 4646-4655, 2010.
- [12] R. Heckel, V. I. Morgenshtern, and M. Soltanolkotabi, "Super-resolution radar," *Information and Inference: A Journal of the IMA*, vol. 5, no. 1, pp. 22-75, 2016.
- [13] R. Heckel, "Super-resolution MIMO radar," 2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Barcelona, pp. 1416-1420, 2016.
- [14] I. Bilik et al., "Automotive MIMO radar for urban environments," 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf), Philadelphia, PA, pp. 1-6, 2016.
- [15] T. D. Ponnimbaduge Perera, D. N. K. Jayakody, S. K. Sharma, S. Chatzinotas, and J. Li, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges," In *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 264-302, 2018.
- [16] A. Khabbazibasmenj, A. Hassani, S. A. Vorobyov, and M. W. Morency, "Efficient Transmit Beam-space Design for Search-Free Based DOA Estimation in MIMO Radar," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 6, pp. 1490-1500, 2014.

Improvement of Positioning in MIMO Radar Using Prior Information

M. Zareie^{*}, J. Ranjbar, F. Sadeghi Almaloo, J. Khalilpour

^{*} Khatam al-Anbia Air Defense Academy, Tehran, Iran

(Received: 08/03/2019, Accepted: 29/11/2019)

Abstract

A new category of radar systems that have been introduced in the last decade are MIMO radars. These systems have many advantages in terms of detecting and estimating target parameters compared to the previous systems. Due to the limitations of conventional positioning methods, to utilize all the advantages of MIMO radars, it is necessary to use new methods for signal processing. In this paper, the DOA estimation for MIMO radar is investigated using compact sensor methods. Given that in practical DOA estimation applications, there exists a prior information about the location of targets, in the proposed method(P1,2,w) by applying appropriate weighting, retrieving direction, amplitude and resolution of targets is done with smaller number of measurements and has better results. In this case, a 23% improvement over conventional methods is observed. Also, the recovery problem has been investigated for two measuring matrices, and according to the simulation results, the signal can be recovered with 8% less measurements by selecting the Gaussian measurement matrix instead of the partial identity measurement matrix.

Keywords: MIMO Radar, Positioning, DOA Estimation, Compact Sensor, Reduced Number of Measurements

^{*} Corresponding author E-mail: majidzarie@yahoo.com