

تحلیل CRLB تخمین موقعیت هدف در رادارهای MIMO غیرفعال مبتنی بر GSM

سید محمد سجادی¹، حسین خوشبین²

¹ دانشگاه فردوسی مشهد، sajjadi335@yahoo.com

² دانشگاه فردوسی مشهد، khoshbian@um.ac.ir

چکیده - رادارهای چندورودی-چندخروجی با استفاده از چندگانگی فضایی یا چندگانگی شکل موج توانسته‌اند باعث بهبود عملکرد رادار گردند. استفاده از پردازش چندورودی-چندخروجی در رادارهای چندپایه‌ای غیرفعال - که در این مقاله برای اولین بار پیشنهاد می‌گردد - می‌تواند باعث افزایش SNR و کاهش زمان انتگرال‌گیری در گیرنده و همچنین بهبود پوشش رادار گردد. در این مقاله، کران پایین کران-راو برای تخمین موقعیت هدف با استفاده از این رادارها محاسبه می‌گردد و بر اساس آن کاهش زمان انتگرال‌گیری و بهبود پوشش رادار بر اثر افزایش تعداد آنتن‌های دریافت و ارسال در رادار غیرفعال مبتنی بر GSM نمایش داده می‌شود. کلیدواژه- رادار چندپایه‌ای غیرفعال، رادار چندورودی-چندخروجی، کران پایین کران-راو.

از جمله رادارهای چندپایه‌ای که از مدت‌ها پیش مورد توجه بوده است، رادار چندپایه‌ای غیرفعال است [9]، [10]. این رادارها با وجود مزایایی از قبیل هزینه‌ی پایین و احتمال آشکار شدن کم¹ دچار مشکلاتی نظیر زمان انتگرال‌گیری طولانی و نقاط کور هستند. با توجه به آن که فرستنده‌های مورد استفاده در این رادارها (روشن‌کننده‌های در دسترس²) به شکل ذاتی بر هم متعامدند و الگوی آنتن‌های ارسال این فرستنده‌ها همه‌جهته یا نزدیک به آن است، امکان طراحی رادار MIMO غیرفعال فراهم است. با استفاده از این نوع پردازش می‌توان مشکلات رادارهای غیرفعال را کاهش داد.

برای بررسی عملکرد این رادارها، این مقاله به بررسی کران پایین کران-راو³ برای تخمین موقعیت هدف در فضای سه بعدی توسط رادارهای MIMO می‌پردازد. ابتدا در بخش 2 مدل مورد استفاده معرفی می‌گردد و سپس کران کران-راو برای واریانس خطای تخمین محاسبه می‌گردد. در بخش 3، ابتدا اثر افزایش زمان شبیه‌سازی و افزایش SNR بر CRLB در رادار MIMO غیرفعال مبتنی بر GSM نمایش داده می‌شود. سپس اثر افزایش تعداد آنتن‌ها بر بهبود خطای تخمین و همچنین بهبود پوشش فضایی رادار نشان داده می‌شود. در نهایت مقاله در بخش 4 جمع‌بندی می‌شود.

1- مقدمه

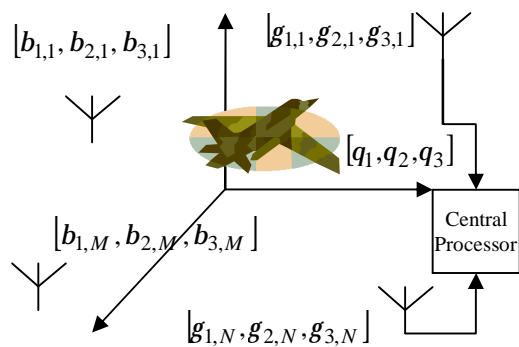
استفاده از چند فرستنده و چند گیرنده‌ی راداری از مدت‌ها پیش تحت عنوان رادار چندپایه‌ای (Multistatic) مطرح بوده است [1]. در این رادارها هر یک از گیرنده‌ها به شکل مجزا سیگنال دریافتی را پردازش کرده، نتایج پردازش را به یک مرکز پردازشی ارسال می‌کنند که با ترکیب داده‌ها به بهبود پارامترهای تخمین‌زده شده می‌پردازد. پردازش هم‌زمان سیگنال‌های راداری دریافتی در گیرنده، چنان‌چه در مخابرات چندورودی-چندخروجی مطرح می‌شود، در اوایل دهه‌ی حاضر آغاز شد [2] و به سرعت نام رادار چندورودی-چندخروجی (MIMO) را به خود گرفت [3]. در این رادارها، بر خلاف رادارهای آرایه‌ی فازی از شکل موج‌های متعامد و بر خلاف رادارهای Multistatic، از المان‌های آنتنی همه‌جهته و پردازش همدوس در گیرنده استفاده می‌شود.

تحقیقات بر روی رادار MIMO از آن تاریخ تا کنون به سرعت در حال گسترش است، و به تدریج دو جهت‌گیری متفاوت یافته است، که دو ساختار متفاوت از رادارهای MIMO را مورد بررسی قرار می‌دهند: رادار با آنتن‌های هم‌مکان [3] و [4]، و رادار با آنتن‌های دور از هم [5] - [8]. در رادارهای با آنتن‌های دور از هم، از چندگانگی فضایی و چندگانگی RCS بهره گرفته می‌شود و الگوی آنتن‌ها همه‌جهته هستند.

¹ Low Probability of Detection (LPD)

² Illuminators of Opportunity

³ Cramer-Rao Lower Band (CRLB)



شکل 1: رادار چندورودی-چندخروجی با آنتن‌های با فاصله از هم و هدف توزیع شده

شده از هدف بین هر یک از زوج‌های فرستنده و گیرنده. در کل N گیرنده رادار MIMO، $M(N+1)$ متغیر تصادفی مختلط وجود دارد، که همه‌ی آنها توزیع گوسی دارند. بنابراین توزیع سیگنال دریافتی نیز گوسی خواهد بود.

همچنین همبستگی بین سیگنال دریافتی در گیرنده‌های n_1 و n_2 ، اگر موقعیت فرستنده‌ها و گیرنده‌ها به شکلی باشد که هر زوج فرستنده-گیرنده RCS مستقلی را ببیند و همچنین نویز دریافتی در آنها ناهمبسته باشد، صفر است. شرایط برقراری این ناهمبستگی در [5] بررسی شده‌اند.

اگر K نمونه‌ی زمانی، از سیگنال‌های دریافتی و ارسالی را داشته باشیم، تعداد کل نمونه‌های سیگنال دریافتی برابر KN خواهد بود. می‌توانیم سیگنال دریافتی را به شکلی مرتب کنیم که بردارهای ممان اول و دوم به شکل زیر در آیند.

$$\boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\theta}) = [m_1[1] \dots m_1[K] \quad \mathbf{L} \quad m_N[K]]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1(\boldsymbol{\theta}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2(\boldsymbol{\theta}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_N(\boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن $\mathbf{0}$ یک ماتریس صفر با ابعاد $K \times K$ است و عناصر ماتریس‌های $\boldsymbol{\mu}_n(\boldsymbol{\theta})$ و $\mathbf{C}_n(\boldsymbol{\theta})$ به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$[\boldsymbol{\mu}_n(\boldsymbol{\theta})]_k = m_n[k] = m_n[k | \boldsymbol{\theta}] \quad (7)$$

$$= \sum_{m=1}^M A_{m,n}(\boldsymbol{\theta}) e^{-2j\text{pf}_m t_{m,n}} s_m[k - t_{m,n}] E\{a_{m,n}\}$$

$$[\mathbf{C}_n(\boldsymbol{\theta})]_{kl} = \sum_{m=1}^M A_{m,n}(\boldsymbol{\theta})^2 s_m[k - k_{m,n}] s_l^*[l - k_{m,n}] E\{|a_{m,n}|^2\} + s_v^2 d(k-l)$$

2- مدل رادار چند ورودی-چند خروجی و تحلیل CRLB

مدل رادار MIMO در شکل 1 نمایش داده شده است. M فرستنده‌ی مخبراتی یا راداری و N گیرنده‌ی راداری به شکل توزیع شده قرار گرفته، از نظر زمانی با هم هم‌زمان می‌شوند. همچنین یک هدف در فضا قرار گرفته است. مختصات هدف با $m=1, \dots, M$ مختصات فرستنده‌های $\boldsymbol{\theta} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ با $B_m = [b_{1,m} \ b_{2,m} \ b_{3,m}]^T$ و مختصات گیرنده‌های $n=1, \dots, N$ با $\boldsymbol{\Gamma}_n = [g_{1,n} \ g_{2,n} \ g_{3,n}]^T$ مشخص می‌شوند. فرض می‌شود که هدف توزیع شده است، به شکلی که چنانچه در [5] نشان داده شده است، سطح مقطع راداری مشاهده‌شده از زوایای مختلف غیر یکسان، و در صورت فاصله‌ی زیاد زاویه‌ی مشاهده از هم مستقل خواهد بود.

در باند پایه در گیرنده‌ی n ام، با فرض هدف ایستادن، سیگنال دریافتی زمان‌گسسته به شکل زیر است:

$$r_n[k] = \sum_{m=1}^M \left[H_{m,n} e^{-j2\text{pf}_m(t_n + t_m)} \times s_m[k - t_m - t_n] \right] + v_n[k] \quad (1)$$

$$= \sum_{m=1}^M a_{m,n} A_{m,n} e^{-j2\text{pf}_m t_{m,n}} s_m[k - t_{m,n}] + v_n[k]$$

که در آن $s_m[k]$ نمونه‌ی سیگنال ارسالی از فرستنده m ام در لحظه‌ی k است؛ t_m ، t_n و $t_{m,n}$ به ترتیب تأخیر مسیر بین فرستنده m و هدف، هدف و گیرنده‌ی n و فرستنده‌ی m با گیرنده‌ی n هستند؛ $A_{m,n}$ تضعیف مسیر بین فرستنده‌ی m و گیرنده‌ی n است؛ $a_{m,n}$ مقدار RCS دوپایه‌ای مختلط مشاهده شده از هدف در مکان گیرنده n بر اثر سیگنال فرستنده m است که به شکل مجموعه‌ای از متغیرهای i.i.d با توزیع گوسی مختلط و متوسط غیر صفر فرض می‌گردد. $H_{m,n}$ نیز ضریب کانال است که از ضرب دو پارامتر فوق به دست می‌آید. v_n نیز نویز دریافتی در گیرنده n است. در صورت فرض پخش در فضای آزاد برای سیگنال‌های ارسالی به هدف و دریافتی از آن، پارامترهای $t_{m,n}$ و $A_{m,n}$ بر اساس مکان هدف، فرستنده‌ها و گیرنده‌ها به شکل زیر قابل نوشتن هستند:

$$t_{m,n}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{|B_m - \boldsymbol{\theta}| + |\boldsymbol{\Gamma}_n - \boldsymbol{\theta}|}{c} \quad (2)$$

$$A_{m,n}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{4p|B_m - \boldsymbol{\theta}|^2} \cdot \frac{1}{4p|\boldsymbol{\Gamma}_n - \boldsymbol{\theta}|^2} \quad (3)$$

در رابطه (1) $M+1$ متغیر تصادفی وجود دارد. این متغیرهای تصادفی عبارتند از نویز دریافتی از هدف و RCS دیده

که

$$d(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

با توجه به توزیع گوسی موجود، عناصر ماتریس فیشر $\mathbf{I}(\Theta)$ به شکل زیر قابل نوشتن است [11]:

$$\mathbf{I}(\Theta)_{ij} = 2 \operatorname{Re} \left\{ \left[\frac{\partial \boldsymbol{\mu}(\Theta)}{\partial q_i} \right]^H \mathbf{C}^{-1}(\Theta) \left[\frac{\partial \boldsymbol{\mu}(\Theta)}{\partial q_j} \right] \right\} + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left[\mathbf{C}^{-1}(\Theta) \frac{\partial \mathbf{C}(\Theta)}{\partial q_i} \mathbf{C}^{-1}(\Theta) \frac{\partial \mathbf{C}(\Theta)}{\partial q_j} \right] \quad (10)$$

$$= 2 \operatorname{Re} \sum_{n=0}^N \left[\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_n(\Theta)}{\partial q_i} \right]^H \mathbf{C}_n^{-1}(\Theta) \left[\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_n(\Theta)}{\partial q_j} \right] + \frac{1}{2} \sum_{n=0}^N \operatorname{tr} \left[\mathbf{C}_n^{-1}(\Theta) \frac{\partial \mathbf{C}_n(\Theta)}{\partial q_i} \mathbf{C}_n^{-1}(\Theta) \frac{\partial \mathbf{C}_n(\Theta)}{\partial q_j} \right] \quad (11)$$

که در آن $[\cdot]^H$ مزدوج ترانهاده است.

با محاسباتی طولانی، و با استفاده از کوچک بودن پهنای باند سیگنال نسبت به فرکانس حامل (Ultrawideband) نبودن سیگنال، می توان نشان داد که مشتق $\boldsymbol{\mu}$ به شکل زیر در می آید:

$$\left[\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_n(\Theta)}{\partial q_i} \right]_k = \sum_{m=1}^M E \left\{ \mathbf{a}_{m,n} \right\} \left[\frac{2pf_m}{c} \left[\frac{(b_{i,m} - q_i)}{|B_m - \Theta|} + \frac{(g_{i,n} - q_i)}{|\Gamma_n - \Theta|} \right] \times A_{m,n} \times e^{-j2pf_m t_{m,n}} s_m[k - k_{m,n}] \right] \quad (12)$$

همچنین مشتق \mathbf{C} به شکل رابطه‌ی 13 (پایین صفحه) آمده است.

3- شبیه‌سازی‌ها

با توجه به استفاده از شکل و دامنه‌ی سیگنال در CRLB محاسبه‌شده، اثر شکل موج و SNR در گیرنده در محاسبات باید

لحاظ گردند. برای این منظور در شبیه‌سازی‌ها از سیگنال باند پایه‌ی ایستگاه پایه‌ی GSM، استفاده گردیده است.

سیگنال باند پایه‌ی ایستگاه پایه‌ی GSM در شکاف‌های زمانی مختلف سیگنال‌های مختلفی، نظیر کانال فرکانس (FCH)، کانال همزمان‌سازی (SCH)، کانال درخواست دسترسی (RACH)، کانال کنترلی همگانی و مخصوص، و کانال‌های ارتباط داده و صوت اختصاصی را شامل می‌شود. هر یک از شکاف‌های زمانی حدود 577 میکروثانیه طول دارد، که بیش از 31 میکروثانیه از آن برابر صفر است. جزئیات مشخصات این کانال در [12] آمده است.

در شبیه‌سازی اول هندسه‌ی شبیه‌سازی‌ها به شکل تصادفی پیاده‌سازی گشته و تعداد 8 هندسه‌ی تصادفی مختلف بررسی گردیده‌اند و نتایج ارائه‌شده میانگین حاصل از این شبیه‌سازی‌ها است. توزیع موقعیت در هر یک از ابعاد برای فرستنده‌ها، گیرنده‌ها و اهداف یک توزیع یک‌نواخت بین 0 تا 10 کیلومتر برای ابعاد x و y بوده است و در بعد z هدف در ارتفاع 1 کیلومتر و فرستنده‌ها و گیرنده‌ها به شکل تصادفی در ارتفاع بین 0 تا 30 متر قرار گرفته‌اند. سه حالت مختلف 3 آنتن ارسال و دریافت، 1 آنتن ارسال و سه آنتن دریافت، و 2 آنتن ارسال و دریافت بررسی و مقایسه شده‌اند. مکان آنتن‌ها در سه حالت مطابق با هم است و در هر حالت تعداد مورد نیاز از آنتن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

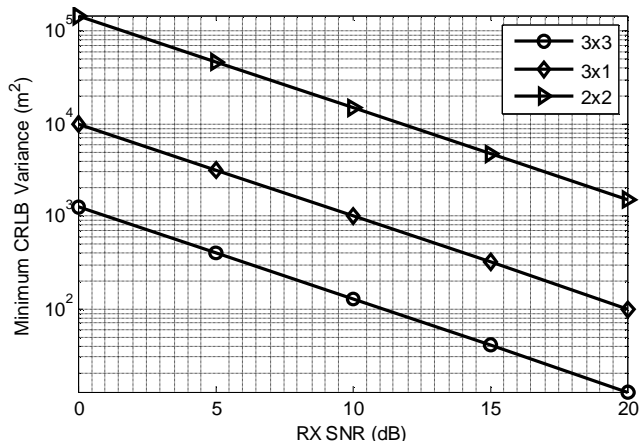
برای تحلیل نتایج از نسبت سیگنال به نویز متوسط پیش از پردازش در گیرنده‌ها استفاده می‌شود، که برابر است با:

$$SNR_{rx} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\sum_{m=1}^M A_{m,n}^2 |a_{m,n}|^2 S_m}{MS_v^2} \quad (14)$$

که در آن S_m توان سیگنال‌های ارسال‌شده از فرستنده‌ی m است. در شکل 2 نمودار متوسط کران پایین کرامر-راو برای تخمین موقعیت در بعد x با ابعاد بلوک مختلف بر اساس SNR_{rx}

$$\left[\frac{\partial \mathbf{C}_n(\Theta)}{\partial q_j} \right]_{kl} = 2 \sum_{m=1}^M A_{m,n}^2 \left[s_m[k - k_{m,n}] E \left\{ \mathbf{a}_{m,n} \right\} \right]^2 \left(\begin{aligned} & \left(\frac{(g_{i,n} - q_i)}{|\Gamma_n - \Theta|^2} \left[\frac{1}{|\Gamma_n - \Theta|} s_m[l - k_{m,n}] + \frac{f_s}{2c} [s_m[l - k_{m,n}] - s_m[l - k_{m,n} - 1]^*] \right] + \right. \\ & \left. \frac{(b_{i,m} - q_i)}{|B_m - \Theta|^2} \left[\frac{1}{|B_m - \Theta|} s_m[l - k_{m,n}] + \frac{f_s}{2c} [s_m[l - k_{m,n}] - s_m[l - k_{m,n} - 1]^*] \right] \right) \\ & + s_m[l - k_{m,n}]^* E \left\{ \mathbf{a}_{m,n} \right\} \right]^2 \left(\begin{aligned} & \left(\frac{(g_{i,n} - q_i)}{|\Gamma_n - \Theta|^2} \left[\frac{1}{|\Gamma_n - \Theta|} s_m[k - k_{m,n}] + \frac{f_s}{2c} [s_m[k - k_{m,n}] - s_m[k - k_{m,n} - 1]] \right] + \right. \\ & \left. \frac{(b_{i,m} - q_i)}{|B_m - \Theta|^2} \left[\frac{1}{|B_m - \Theta|} s_m[k - k_{m,n}] + \frac{f_s}{2c} [s_m[k - k_{m,n}] - s_m[k - k_{m,n} - 1]] \right] \right) \end{aligned} \right) \quad (13)$$

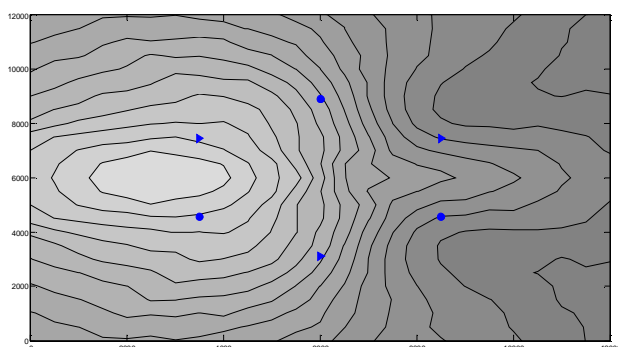
ترسیم شده است.



شکل 3: نمودار متوسط کران پایین کرامر-راوو برای واریانس تخمین موقعیت در جهت x بر حسب SNR گیرنده در 10 بار تکرار، برای چیدمان و تعداد مختلف آنتن‌های فرستنده و گیرنده، سایز بلوک 1024.

شبیه‌سازی بعدی برای بررسی پوشش رادار صورت گرفته است. در این شبیه‌سازی رادارها در رؤوس یک 6 ضلعی منتظم قرار گرفته‌اند. SNR_{rx} روی 15 dB ثابت شده است و از شبیه‌سازی با بلوک‌های 64 نمونه‌ای استفاده گردیده است. هر شبیه‌سازی 8 بار تکرار شده و نمودارهای حاصل از متوسط‌گیری نتایج آنها به دست آمده‌اند.

شکل 4 و 5 کانتور مینیمم واریانس خطا برای بعد x را در دو حالت 3x3 و 2x2 نمایش می‌دهند. رنگ نمودارها بر اساس لگاریتم واریانس خطا است، و از واریانس خطای 0.57 (سفید) تا 3.6e5 (سیاه) گسترده می‌شود. از مقایسه‌ی دو شکل مشخص می‌شود که پوشش در رادار با سه فرستنده یکنواخت‌تر و در عین حال در تمام فضا با خطای کم‌تر است. کاهش شدید افت کیفیت در فضای خارج از شش ضلعی در حالت 3x3 نسبت به 2x2 قابل توجه است.

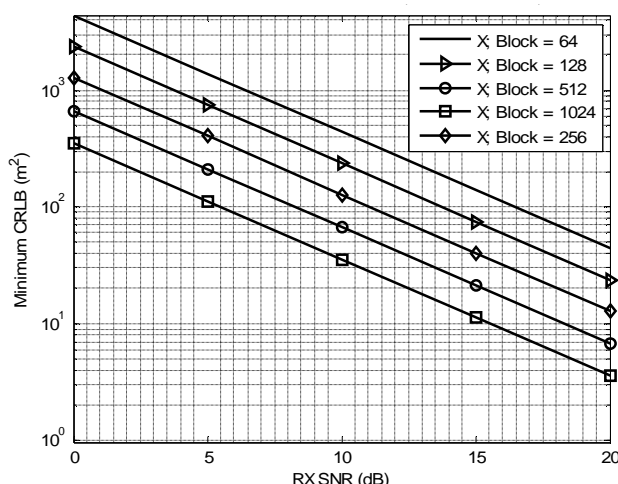


شکل 4: کانتور مینیمم واریانس خطا در حالت 3 آنتن دریافت و ارسال با قرارگیری در رؤوس 6 وجهی منتظم. مثلث‌ها نماد فرستنده‌ها و دایره‌ها نماد گیرنده‌ها هستند. رنگ روشن نماینده‌ی واریانس خطای بهتر است.

با توجه به شکل 2 مشخص می‌شود که کران پایین واریانس خطا به شکل معکوس با افزایش توان ارتباط داشته، با هر 3 dB افزایش توان دریافت، نصف می‌شود. همچنین کران پایین واریانس خطا با افزایش طول بلوک نیز تقریباً به شکل معکوس مرتبط است و با 2 برابر شدن آن تقریباً نصف می‌شود. مقدار واقعی تغییر واریانس خطا تقریباً معادل 0/53 است.

بنابراین افزایش طول بلوک تقریباً عملکرد یکسانی دارد، به شکلی که می‌توان نتایج حاصل از افزایش طول بلوک را با افزایش SNR پیش‌بینی کرد. از این رو در شبیه‌سازی‌ها برای کاهش زمان شبیه‌سازی به جای SNRهای پایین‌تر با تعداد نمونه‌ی بیشتر، از SNR بالاتر و تعداد نمونه‌ی کم‌تر بهره گرفته شده است.

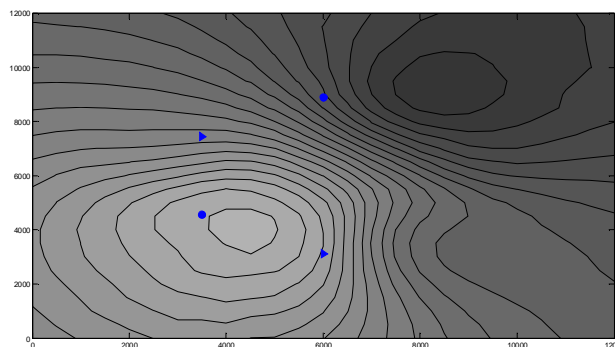
شکل 3 نتایج همین شبیه‌سازی برای طول بلوک 1024 برای تعداد مختلف آنتن‌های ارسال و دریافت را نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل معلوم است، تغییر سازمان‌دهی از حالت 1x3 به 2x2 باعث بهبود حدود 11 dB و افزایش تعداد آنتن‌ها به 3x3 باعث 9 dB بهبود بیشتر گردیده است. به این ترتیب افزایش تعداد آنتن‌ها از حالت 1x3 به 3x3 باعث می‌شود نیاز به حدود 20 dB توان دریافتی کم‌تر در گیرنده وجود داشته باشد، یا به شکل معادل زمان انتگرال‌گیری تا حدود 100 مرتبه کاهش یابد. در این شبیه‌سازی بهبود قابل توجه عملکرد بین دو حالت 1x3 و 2x2، که تعداد آنتن یکسانی دارند نیز قابل توجه است. این نتیجه که در شبیه‌سازی بعدی نیز تأیید می‌شود نمایانگر نقش تعداد فرستنده‌ها در کیفیت رادار است.



شکل 2: نمودار متوسط کران پایین کرامر-راوو برای واریانس تخمین موقعیت در جهت x بر حسب SNR گیرنده در 8 بار تکرار، برای سایز بلوک‌های تخمین مختلف، و تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده 3.

on *Signal Processing and Applications*, Brisbane, pp. 511-514, 1999.

- [10] D. K. P. Tan, H. Sun, Y. Lu, M. Lesturgie and H. L. Chan, "Passive radar using Global System for Mobile communication signal: theory, implementation and measurements," *IEEE Proc. on Rada, Sonar and Navigation*, Vol. 152, No. 3, pp. 116-123, June 2005.
- [11] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory*. Prentice Hall, pp. 47-50, 1993.
- [12] European Telecommunications Standards Institute, "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Multiplexing and multiple access on the radio path," *European Telecommunications Standards Institute, ETSI EN 300 908 V8.5.1*, 2000. [Online]. Available: <http://www.etsi.org>. [Accessed: Nov. 2009].



شکل 5: شکل 6: کانتور مینیمم واریانس خطا در حالت 3 آنتن دریافت و یک آنتن ارسال با قرارگیری در رؤوس 6 وجهی منتظم. مثلث نماد فرستنده و دایره نماد گیرنده‌ها هستند. رنگ روشن نماینده‌ی واریانس خطای بهتر است.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای تحلیل عملکرد رادارهای MIMO با آنتن‌های با فاصله از هم در تخمین موقعیت هدف، کران پایین کران-راوو محاسبه گردید. سپس با شبیه‌سازی این کران برای رادارهای غیر فعال با استفاده از سیگنال GSM، نشان داده شد که می‌توان به وسیله‌ی پردازش MIMO و افزایش تعداد آنتن‌ها، به بهبود قابل توجهی در این رادارها، از دو جهت کاهش زمان انتگرال‌گیری همدوس در گیرنده و همچنین افزایش سطح پوشش راداری دست یافت.

مراجع

- [1] J. I. Glaser, "Fifty years of bistatic and multistatic radar", *IEEE Proceedings*, Vol. 133, No. 7, pp. 596-603, 1986.
- [2] C. Baixiao, Z. Shouhong, W. Yajun and W. Jun, "Analysis and Experimental Results on Sparse-array Synthetic Impulse and Aperture Radar," *Proc. CIE Int. Conf. on Radar*, Shanghai, pp. 76-80, 2001.
- [3] C. Baixiao, Z. Shouhong, W. Yajun and W. Jun, "Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Radar and Imaging: Degrees of Freedom and Resolution," *Proc. 37th Asim. Conf. on Signals, Systems & Computers*, pp. 54-59, 2003.
- [4] L. Xu, J. Li and P. Stoica, "Target Detection and Parameter Estimation for MIMO Radar Systems", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 44, No. 3, pp. 927-939, July 2008.
- [5] E. Fishler, A. Haimovich, R. S. Blum, L. J. Cimini, Jr., D. Zhizhik and R. A. Velenzuela, "Spatial Diversity in Radars—Models and Detection Performance", *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 54, No. 3, pp. 823-838, March 2006.
- [6] A. De Maio and M. Lops, "Design Principles of MIMO Radar Detectors", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 43, No. 3, pp. 886-897, July 2007.
- [7] M. D. Migliore, "Some physical limitations in the performance of statistical multiple-input multiple-output RADARs", *IET Microwave, Antennas & Propagation*, Vol. 2, No. 7, pp. 650-658, October 2008.
- [8] M. D. Migliore, " Adaptive detectors with diagonal loading for airborne multi-input multi-output radar", *IET Radar, Sonar and Navigation*, Vol. 3, No. 5, pp. 493-501, October 2009.
- [9] M. A. Ringer and G. J. Frazer, "Waveform Analysis of Transmissions of Opportunity for Passive Radar," *Proc. Int. Symp.*