



Angle Estimation of Unresolved Targets in Monopulse Radar via Creating Multiple Antenna Sets Using an Extra Antenna

H.Rezaei^{1*}, M.Sebt², N.Zarei³, G.Saadati Moghadam³

¹: Assistant Professor, Khatam Al-Anbia Air Defense University, Tehran, Iran

(Received:2023 /04/25, Revised: 2023/06/30, Accepted: 2023/07/29, Published: 2023/08/24)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.2.1.4>

Abstract

Conventional monopulse radar cannot detect the direction of two closely-spaced targets in one resolution cell by utilizing the monopulse ratio. In this paper, virtual amplitude-comparison monopulse signals are generated from the received phase-comparison monopulse signals, then a method is presented to estimate the angles of two unresolved targets using a single snapshot of four independent channels. If both targets have the same azimuth or elevation angle, the proposed scheme cannot detect their angles; so, an additional antenna is used to detect such targets' angles. In this study, the antenna array is divided into multiple overlapping sets, to detect the direction of two targets in two different coordinates. Combining the outputs from multiple antenna sets improves the angle estimation performance and accuracy. The impact of SNR, the angle difference between the targets, and the phase difference of target signals on the accuracy of angle estimation have also been explained. In the following the effectiveness of the proposed method is validated by comparing the exact solutions and simulations.

Keywords: : Monopulse radar, Unresolved targets, Direction of arrival estimation.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: habibrezaei64@ihu.ac.ir

تخمین زاویه اهداف مبهم در رادار مونو پالس از طریق ایجاد مجموعه آنتن های متعدد با استفاده از یک آنتن اضافی

حبیب رضایی^{*۱}، محمدعلی سبط^۲، نادعلی زارعی^۳، گودرز سعادتی مقدم^۴

۱- استادیار، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا، تهران، ایران، ۲- دانشیار، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران، ۳- استادیار، ۴-

استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷، انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.7.8>



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

رادارهای مونو پالس مرسوم نمی‌توانند جهت دو هدف نزدیک به هم را که در یک سلول رزولوشن قرار دارند، با استفاده از نسبت مونو پالس تشخیص دهند. در این مقاله، سیگنال‌های مونو پالس مقایسه دامنه به صورت مجازی از سیگنال‌های دریافتی رادار مونو پالس مقایسه فاز تولید می‌شوند، سپس روشی برای تخمین زوایای دو هدف مبهم نزدیک به هم با استفاده از یک پالس دریافتی از چهار کانال مستقل ارائه می‌شود. اگر دو هدف دارای زاویه سمت یا ارتفاع یکسانی باشند، روش پیشنهادی نمی‌تواند زاویه‌های آن‌ها را تشخیص دهد، لذا، از یک آنتن اضافی برای تشخیص زوایای چنین اهدافی استفاده می‌شود. در این مطالعه، آرایه آنتن به چند مجموعه که با هم همپوشانی دارند تقسیم می‌شود تا جهت ورود اهداف را در دو مختصات متفاوت تشخیص دهند. ترکیب خروجی‌های مجموعه آنتن‌ها، عملکرد و دقت تخمین زاویه را بهبود می‌دهد. در ادامه تأثیر SNR، تفاوت زاویه بین اهداف و اختلاف فاز سیگنال‌های دو هدف متمایز بر دقت تخمین زاویه بررسی شده است. اثربخشی و کارایی روش پیشنهادی با مقایسه روابط و شبیه‌سازی‌های دقیق تأیید می‌شود.

کلیدواژه‌ها: رادار زمین نفوذ، رادار هوا پایه، نویز فاز.

۱- مقدمه

داشت، لذا، این امر سبب می‌شود زاویه تشخیص داده شده خطای قابل توجهی داشته باشد [۱-۳]. رادارها می‌توانند اهداف مبهم (اهدافی که در یک سلول راداری قرار دارند) را با بهبود دقت سلول رزولوشن شناسایی کنند، اما رادارها در بهبود عرض بیم، دقت فاصله و رزولوشن دوپلر محدودیت دارند [۱]. دکوی کشتی فریب زاویه مؤثری را علیه رادارهای مونو پالس ایجاد می‌کند. RCS فریب ایجاد شده توسط دکوی کشتی بیشتر از هدف واقعی است، بنابراین، توان سیگنال فریب بیشتر از هدف واقعی در سیگنال دریافتی رادار است. توان بیشتر سیگنال فریب باعث می‌شود که زاویه تخمین زده شده توسط رادار به زاویه دکوی فریب نزدیک تر باشد، این امر سبب می‌گردد در صورت هدایت موشک توسط رادار، موشک به سمت دکوی کشتی منحرف گردد (در جنگ بالکان ۹۰ درصد موشک‌های شلیک شده به دکوی کشتی برخورد نمود). از این جهت، تخمین زاویه اهداف مبهم برای بهبود قابلیت حفاظت الکترونیکی رادارهای مونو

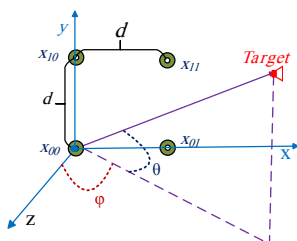
سیستم‌های راداری مونو پالس معمولاً به عنوان یک تکنیک عملی و سریع برای تعیین جهت و ردگیری هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در رادار مونو پالس مقایسه دامنه با مقایسه دامنه سیگنال‌های دریافتی، و در رادار مونو پالس مقایسه فاز (PCMR) با مقایسه فاز سیگنال‌های دریافتی، با استفاده از آنتن‌های متعدد قادر به تخمین زاویه هدف در یک پالس دریافتی هستند. این رادارها برای مقایسه سیگنال‌های دریافتی و تشخیص جهت ارتفاع و سمت هدف، تنها به یک پالس نیاز دارند. با این وجود، هنگامی که دو یا چند هدف در یک سلول رزولوشن (فاصله، عرض پرتو و دوپلر) قرار گرفته باشند، یا اثر چند مسیری وجود داشته باشد، سیگنال برگشتی از اهداف با هم همپوشانی خواهند

دقیق برای تخمین جهت ورود اهداف و زاویه اهداف استخراج شده‌اند و روش تخمین زاویه دو هدف با یک پالس بیان شده است. در بخش ۳، روش کاربردی برای تخمین زاویه اهدافی که دارای جهت ارتفاع یا سمت یکسان هستند از طریق یک آنتن اضافی ارائه شده است. در بخش ۴، تأثیر مقدار SNR، اختلاف فاز و جهت اهداف بر دقت تخمین زاویه ورود بررسی شده است، و در نهایت در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای تشخیص زاویه دو هدف مبهم برای مقادیر متفاوت SNR و جهت نسبی اهداف بیان گردیده است.

۲- روش پیشنهادی برای تخمین زاویه اهداف

مبهم

یک PCMR چهارکاناله شامل چهار فیدر آنتن است که در گوشه‌های یک مربع قرار دارند که در اصل یک آرایه دوبه‌دو است که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱). پیکربندی یک آنتن PCMR چهار کاناله

برای تک هدف، روابط فازی سیگنال چهارکاناله بدون نویز به صورت x_{00} ، x_{01} ، x_{10} و x_{11} بر حسب جهت ورود هدف به صورت زیر خواهد بود [۱۴]:

$$\begin{aligned} x_{01} &= x_{00} e^{-j\alpha} \\ x_{10} &= x_{00} e^{-j\beta} \\ x_{11} &= x_{00} e^{-j(\alpha+\beta)} \end{aligned} \quad (1)$$

که $\alpha = (2\pi d \cos \theta \sin \varphi) / \lambda$ ، $\beta = (2\pi d \sin \theta) / \lambda$ ، θ و φ به ترتیب زاویه‌های ارتفاع و سمت هدف هستند، 'd' فاصله X و Y بین آنتن‌ها و λ طول موج سیگنال دریافتی است. هنگامی که دو هدف در یک سلول رزولوشن قرار بگیرند، بدون در نظر گرفتن نویز، سیگنال‌های دریافتی آنتن‌ها به صورت زیر خواهد بود [۱۴]:

$$\begin{aligned} x_{00} &= g_a e^{-j\gamma_a} + g_b e^{-j\gamma_b} \\ x_{01} &= g_a e^{-j(\gamma_a + \alpha_a)} + g_b e^{-j(\gamma_b + \alpha_b)} \\ x_{10} &= g_a e^{-j(\gamma_a + \beta_a)} + g_b e^{-j(\gamma_b + \beta_b)} \\ x_{11} &= g_a e^{-j(\gamma_a + \alpha_a + \beta_a)} + g_b e^{-j(\gamma_b + \alpha_b + \beta_b)} \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه بالا β_a ، β_b ، α_a و α_b فاز ناشی از جهت‌های ارتفاع و سمت اهداف هستند، نمایه‌های "a" و "b" به معنای دو هدف

پالس بسیار مهم و ضروری است [۵-۴]. برای غلبه بر این محدودیت، رادارهای مونو پالس از روش‌های متفاوتی مانند روش شرمین [۱] استفاده می‌کنند، در این روش از دو پالس دریافتی و نسبت مجموع/تفاضل برای تشخیص جهت دو هدف مبهم استفاده می‌شود. با این حال، روش شرمین و سایر روش‌هایی که از دو پالس برای تفکیک اهداف استفاده می‌کنند نیاز به دو شرط دارند: اول، نسبت دامنه سیگنال‌های حاصل از دو هدف مجزا باید بین پالس‌ها ثابت باشد و دوم، اختلاف فاز بین دو هدف در دو پالس دریافتی باید متفاوت باشد. این شرط‌ها به شرایط شرمین معروف هستند [۸-۷، ۱]. برای تخمین جهت اهداف مبهم در یک سلول رادار، روش‌های مختلفی دیگری مانند استفاده از چندین گیرنده آرایه‌ای، شکل‌دهی پرتو، و حذف زیر فضایی [۱۰-۹، ۱۱] ارائه شده است. مقاله [۶] از رادار MIMO برای تخمین جهت اهداف مبهم استفاده کرده است. با این حال، این روش‌ها برای اجرا به تجهیزات اضافی نیاز دارند [۱۳-۱۲]. مقاله‌های [۱۶-۱۴] روشی عملی و مناسب برای تخمین زاویه اهداف مبهم در یک سلول رزولوشن برای PCMR را در مدت‌زمان یک پالس ارائه می‌دهند، اما روش‌های پیشنهادی آن‌ها در تشخیص زوایای اهدافی که در یک جهت سمت یا یک جهت ارتفاع قرار دارند کارایی ندارند. مقاله‌های [۱۷-۱۸] از دو آنتن اضافی برای تشخیص جهت دو هدف مبهم که زاویه یکسانی در جهت سمت یا ارتفاع دارند استفاده کرده‌اند، اما روش ارائه شده توسط آن‌ها فقط برای ساختار خاصی از مجموعه آنتن مناسب است. مقاله [۱۹] از تکنیک مونو پالس چهارکاناله مبتنی بر زیر آرایه، برای تخمین زاویه چنین اهداف مبهمی استفاده کرده است، اما این سیستم برای اجرا به آنتن‌های زیادی نیاز دارد که سبب پیچیدگی الگوریتم تشخیص می‌شود. در این تحقیق زاویه دو هدف مبهم برای یک PCMR تخمین زده می‌شود. در روش پیشنهادی، سیگنال‌های مونو پالس مقایسه دامنه به صورت مجازی از سیگنال‌های PCMR دریافتی تولید می‌شوند، سپس راه‌حلی برای تخمین جهت اهداف مبهم در مدت‌زمان یک پالس دریافتی در PCMR برای اهداف با تغییرات سریع ارائه می‌شود. علاوه بر این، می‌توان با استفاده از یک آنتن اضافی، مجموعه آنتن‌های جدید در مختصات متفاوت که دارای زاویه دید متفاوتی نسبت به مجموعه آنتن اصلی هستند ایجاد نمود. از دید مجموعه جدید دو هدف در یک سمت یا در یک ارتفاع قرار ندارند، لذا روش پیشنهادی می‌تواند زوایای دو هدفی را که در یک جهت ارتفاع یا سمت از دید PCMR قرار دارند را تخمین بزند. روش پیشنهادی عملکرد و دقت تخمین زاویه را با ترکیب خروجی‌های مجموعه آنتن‌های متعدد بهبود می‌بخشد.

ساختار مقاله شامل چند بخش است که در بخش ۲، راه‌حل‌های

$$\begin{aligned} \Sigma_{A1} &= \Sigma_{A1a} + \Sigma_{A1b} = A_a e^{-j\kappa_{a1}} + A_b e^{-j\kappa_{b1}} \\ \Delta_{A1} &= \Delta_{A1a} + \Delta_{A1b} = A_a \varphi_a e^{-j\kappa_{a1}} + A_b \varphi_b e^{-j\kappa_{b1}} \\ \Sigma_{A2} &= \Sigma_{A2a} + \Sigma_{A2b} = A_a e^{-j\kappa_{a2}} + A_b e^{-j\kappa_{b2}} \\ \Delta_{A2} &= \Delta_{A2a} + \Delta_{A2b} = A_a \varphi_a e^{-j\kappa_{a2}} + A_b \varphi_b e^{-j\kappa_{b2}} \end{aligned} \quad (۶)$$

چون دو مجموعه آنتن در ارتفاع‌های متفاوتی قرار دارند و دو هستند، لذا، $(\theta_a \neq \theta_b)$ هدف دارای زوایای ارتفاع متفاوتی اختلاف‌فاز سیگنال‌های اهداف در دو مجموعه آنتن متمایز خواهد بود، از (۶) روابط زیر قابل‌بیان است: $(\kappa_{b1} - \kappa_{a1} \neq \kappa_{b2} - \kappa_{a2})$

$$\begin{aligned} \varphi_a \Sigma_{A1} - \Delta_{A1} &= (\varphi_a - \varphi_b) \Sigma_{A1b} \\ \varphi_a \Sigma_{A2} - \Delta_{A2} &= (\varphi_a - \varphi_b) \Sigma_{A2b} = (\varphi_a - \varphi_b) \Sigma_{A1b} e^{-j(\kappa_{b2} - \kappa_{b1})} \\ \varphi_b \Sigma_{A1} - \Delta_{A1} &= (\varphi_b - \varphi_a) \Sigma_{A1a} \\ \varphi_b \Sigma_{A2} - \Delta_{A2} &= (\varphi_b - \varphi_a) \Sigma_{A2a} = (\varphi_b - \varphi_a) \Sigma_{A1a} e^{-j(\kappa_{a2} - \kappa_{a1})} \end{aligned} \quad (۷)$$

سیگنال‌های مجموع و تفاضل از (۷) به‌صورت زیر قابل‌تعریف هستند:

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_a \Sigma_{A2} - \Delta_{A2}}{\varphi_a \Sigma_{A1} - \Delta_{A1}} &= e^{-j(\kappa_{b2} - \kappa_{b1})} \\ \frac{\varphi_b \Sigma_{A2} - \Delta_{A2}}{\varphi_b \Sigma_{A1} - \Delta_{A1}} &= e^{-j(\kappa_{a2} - \kappa_{a1})} \end{aligned} \quad (۸)$$

رابطه $\left| e^{j\kappa_{a2} - \kappa_{a1}} \right|^2 = \left| e^{j\kappa_{b2} - \kappa_{b1}} \right|^2 = 1$ برقرار است، در ادامه فرض می‌شود $Z = (\varphi_a \text{ or } \varphi_b)$ [۲۰] آنگاه:

$$\frac{(Z \Sigma_{A2} - \Delta_{A2})(Z \Sigma_{A2} - \Delta_{A2})^*}{(Z \Sigma_{A1} - \Delta_{A1})(Z \Sigma_{A1} - \Delta_{A1})^*} = 1 \quad (۹)$$

معادله (۹) را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned} -2 \left[\Re(\Sigma_{A1}) \Re(\Delta_{A1}) - \Re(\Sigma_{A2}) \Re(\Delta_{A2}) + \right. \\ \left. \Im(\Sigma_{A1}) \Im(\Delta_{A1}) - \Im(\Sigma_{A2}) \Im(\Delta_{A2}) \right] Z \\ + (|\Sigma_{A1}|^2 - |\Sigma_{A2}|^2) Z^2 + [|\Delta_{A1}|^2 - |\Delta_{A2}|^2] = 0 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

در معادله فوق، $\Re(\cdot)$ و $\Im(\cdot)$ بخش‌های حقیقی و موهومی سیگنال را نشان می‌دهد. از (۱۰)، معادله درجه دوم (۱۱) استخراج می‌شود.

$$\begin{aligned} DZ^2 + EZ + F &= 0 \\ D &= |\Sigma_{A1}|^2 - |\Sigma_{A2}|^2 \\ E &= 2 \left[\Re(\Sigma_{A1}) \Re(\Delta_{A1}) - \Re(\Sigma_{A2}) \Re(\Delta_{A2}) + \right. \\ &\quad \left. \Im(\Sigma_{A1}) \Im(\Delta_{A1}) - \Im(\Sigma_{A2}) \Im(\Delta_{A2}) \right] \\ F &= |\Delta_{A1}|^2 - |\Delta_{A2}|^2 \end{aligned} \quad (۱۱)$$

اگر $\varphi_a > \varphi_b$ و $D > 0$ باشد، φ_a و φ_b به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \frac{-E + \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D} \\ \varphi_b &= \frac{-E - \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D} \end{aligned} \quad (۱۲)$$

جداگانه، و g_a, γ_a, α_a و g_b, γ_b, α_b فاز اولیه و دامنه اهداف هستند. اگر $x_{00} x_{11} = x_{10} x_{01}$ باشد، سیگنال دریافتی از یک هدف منفرد یا دو هدف مجزا با جهت ارتفاع یا سمت یکسان است، در غیر این صورت سیگنال دریافتی از دو یا چند هدف مجزا با جهات ورود متفاوت خواهد بود، لذا برای کشف زاویه ورود چنین اهدافی باید از تکنیک‌های تخمین زاویه اهداف مبهم استفاده نمود.

در روش پیشنهادی، تخمین زاویه ارتفاع و سمت اهداف در PCMR در یک پالس دریافتی اجرا می‌شود. برای تخمین زوایای اهداف از دو مجموعه آنتن مجزا استفاده می‌شود که به‌طور هم‌زمان سیگنال اهداف را دریافت می‌کنند که سیگنال دریافتی دو مجموعه آنتن دارای اختلاف‌فاز نسبت به هم هستند. ابتدا آرایه آنتن ۲*۲ موجود را به‌صورت دو آرایه آنتن افقی ۱*۲ مستقل و دو آرایه عمودی ۲*۱ مستقل فرض می‌شود. سیگنال‌های مجموع و تفاضل مجموعه آنتن اول و دوم جهت تخمین زاویه سمت $\Sigma_{A1}, \Sigma_{A2}, \Delta_{A1}$ و Δ_{A2} از (۳) قابل‌محاسبه است:

$$\begin{aligned} \Sigma_{A1} &= x_{00} + x_{01} = 2 \left[\begin{aligned} &g_a \cos(\alpha_a / 2) e^{-j(\gamma_a + \alpha_a / 2)} \\ &+ g_b \cos(\alpha_b / 2) e^{-j(\gamma_b + \alpha_b / 2)} \end{aligned} \right] \\ \Delta_{A1} &= x_{00} - x_{01} = 2j \left[\begin{aligned} &g_a \sin(\alpha_a / 2) e^{-j(\gamma_a + \alpha_a / 2)} \\ &+ g_b \sin(\alpha_b / 2) e^{-j(\gamma_b + \alpha_b / 2)} \end{aligned} \right] \\ \Sigma_{A2} &= x_{10} + x_{11} = 2 \left[\begin{aligned} &g_a \cos(\alpha_a / 2) e^{-j(\gamma_a + \alpha_a / 2 + \beta_a)} \\ &+ g_b \cos(\alpha_b / 2) e^{-j(\gamma_b + \alpha_b / 2 + \beta_b)} \end{aligned} \right] \\ \Delta_{A2} &= x_{10} - x_{11} = 2j \left[\begin{aligned} &g_a \sin(\alpha_a / 2) e^{-j(\gamma_a + \alpha_a / 2 + \beta_a)} \\ &+ g_b \sin(\alpha_b / 2) e^{-j(\gamma_b + \alpha_b / 2 + \beta_b)} \end{aligned} \right] \end{aligned}$$

در رادارهای مونو پالس مقایسه دامنه، زاویه سمت φ و زاویه ارتفاع θ به‌صورت زیر قابل‌بیان است [۱]:

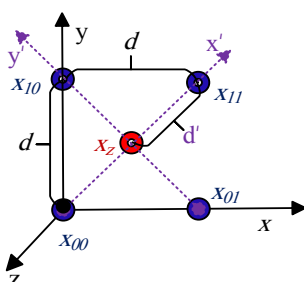
$$\begin{aligned} \Delta_{AZ} &= k_{az} \varphi \Sigma \\ \Delta_{EL} &= k_{el} \theta \Sigma \end{aligned} \quad (۴)$$

Δ_{AZ} و Δ_{EL} سیگنال‌های کانال تفاضل ارتفاع و سمت هستند، Σ سیگنال مجموع، k_{az} و k_{el} نرخ حساسیت مونو پالس برای کانال تفاضل ارتفاع و سمت هستند. برای سادگی، k_{az} و k_{el} را به یک نرمال می‌شود. فرض می‌نماییم:

$$\begin{aligned} A_a &= 2g_a \cos(\alpha_a / 2) \\ A_b &= 2g_b \cos(\alpha_b / 2) \\ \kappa_{a1} &= \gamma_a + \alpha_a / 2 \\ \kappa_{b1} &= \gamma_b + \alpha_b / 2 \\ \kappa_{a2} &= \gamma_a + \alpha_a / 2 + \beta_a \\ \kappa_{b2} &= \gamma_b + \alpha_b / 2 + \beta_b \end{aligned} \quad (۵)$$

از (۳)، (۴) و (۵) می‌توان نتیجه گرفت:

در مرکز آنتن‌های گیرنده قرار می‌گیرد. موقعیت آنتن x_z در شکل (۲) نشان داده شده است. برای تخمین زاویه اهداف با جهت یکسان، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، پیکربندی مجموعه دوم آنتن‌ها به اندازه ۴۵ درجه حول محور x چرخانده می‌شود. مختصات مجموعه اول بر اساس (x, y, z) و مختصات مجموعه دوم بر اساس (x', y', z') تعریف می‌شود. اگر مختصات مجموعه دوم $x_{00}x_{11} \neq x_z x_z$ باشد، سیگنال دریافتی از دو هدف با جهت ارتفاع یا سمت یکسان خواهد بود.



شکل (۲). مکان قرارگیری آنتن x_z و مختصات جدید

در شکل بالا d' فاصله X' و Y' بین آنتن‌های مجموعه دوم آنتن است. در صورتی که سیگنال دریافتی از دو هدف متمایز باشد، سیگنال دریافتی آنتن x_z را می‌توان به صورت نوشت:

$$x_z = g_a e^{-j(\gamma_a + \alpha_a/2 + \beta_b/2)} + g_b e^{-j(\gamma_b + \alpha_b/2 + \beta_b/2)} \quad (15)$$

اگر هدفی در زاویه سمت φ و زاویه ارتفاع θ واقع شده باشد، توسط مجموعه اصلی آنتن‌ها از طریق فازهای α و β قابل مشاهده خواهد بود. مجموعه ثانویه آنتن آن هدف را در فازهای مختلف α' و β' مشاهده خواهد کرد. می‌توان سیگنال‌های مجموع و تفاضل مجموعه آنتن اول و دوم Σ'_{Az1} ، Δ'_{Az1} ، Σ'_{Az2} و Δ'_{Az2} را از (۱۶) به دست آورد:

$$\begin{aligned} \Sigma'_{Az1} &= x_{00} + x_z \\ &= 2 \left[g_a \cos((\alpha_a + \beta_a)/4) e^{-j(\gamma_a + (\alpha_a + \beta_a)/4)} \right. \\ &\quad \left. + g_b \cos((\alpha_b + \beta_b)/4) e^{-j(\gamma_b + (\alpha_b + \beta_b)/4)} \right] \\ \Delta'_{Az1} &= x_{00} - x_z \\ &= 2j \left[g_a \sin((\alpha_a + \beta_a)/4) e^{-j(\gamma_a + (\alpha_a + \beta_a)/4)} \right. \\ &\quad \left. + g_b \sin((\alpha_b + \beta_b)/4) e^{-j(\gamma_b + (\alpha_b + \beta_b)/4)} \right] \\ \Sigma'_{Az2} &= x_z + x_{11} \\ &= 2 \left[g_a \cos((\alpha_a + \beta_a)/4) e^{-j(\gamma_a + \frac{3(\alpha_a + \beta_a)}{4})} \right. \\ &\quad \left. + g_b \cos((\alpha_b + \beta_b)/4) e^{-j(\gamma_b + \frac{3(\alpha_b + \beta_b)}{4})} \right] \\ \Delta'_{Az2} &= x_z - x_{11} \\ &= 2j \left[g_a \sin((\alpha_a + \beta_a)/4) e^{-j(\gamma_a + \frac{3(\alpha_a + \beta_a)}{4})} \right. \\ &\quad \left. + g_b \sin((\alpha_b + \beta_b)/4) e^{-j(\gamma_b + \frac{3(\alpha_b + \beta_b)}{4})} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

اگر $D < 0$ ، مقدار φ_a و φ_b جایگزین یکدیگر می‌شوند. برای تعیین زاویه ارتفاع، سیگنال مجموع، مجموعه آنتن اول و دوم Σ_{E2} و Σ_{E1} و سیگنال کانال تفاضل Δ_{E2} و Δ_{E1} به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \Sigma_{E1} &= x_{00} + x_{10} = \left[2g_a \cos(\beta_a/2) e^{-j(\gamma_a + \beta_a/2)} \right. \\ &\quad \left. + 2g_b \cos(\beta_b/2) e^{-j(\gamma_b + \beta_b/2)} \right] \\ \Delta_{E1} &= x_{00} - x_{10} = 2j \left[g_a \sin(\beta_a/2) e^{-j(\gamma_a + \beta_a/2)} \right. \\ &\quad \left. + g_b \sin(\beta_b/2) e^{-j(\gamma_b + \beta_b/2)} \right] \\ \Sigma_{E2} &= x_{01} + x_{11} = \left[2g_a \cos(\beta_a/2) e^{-j(\gamma_a + \beta_a/2 + \alpha_a)} \right. \\ &\quad \left. + 2g_b \cos(\beta_b/2) e^{-j(\gamma_b + \beta_b/2 + \alpha_b)} \right] \\ \Delta_{E2} &= x_{01} - x_{11} = 2j \left[g_a \sin(\beta_a/2) e^{-j(\gamma_a + \beta_a/2 + \alpha_a)} \right. \\ &\quad \left. + g_b \sin(\beta_b/2) e^{-j(\gamma_b + \beta_b/2 + \alpha_b)} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

از (۱۳) مقدار اختلاف فاز بین دو مجموعه آنتن $(\alpha_b - \alpha_a)$ خواهد بود و چون دامنه سیگنال‌های دریافتی در PCMR در همه آنتن‌های گیرنده یکسان است [۱]، می‌توان θ_a ، θ_b ، φ_a و φ_b را از (۱۱) و (۱۲) بدست آورد. با محاسبه θ_a ، θ_b ، φ_a و φ_b می‌توان α_x و β_x را به صورت زیر محاسبه نمود [۱۴]. (اندیس x به معنای a یا b است):

$$\begin{aligned} \alpha_x &= 2 \tan^{-1}(k_{az} \varphi_x) \\ \beta_x &= 2 \tan^{-1}(k_{el} \theta_x) \end{aligned} \quad (14)$$

روش ارائه شده، یک تکنیک کاربردی و سریع برای تخمین جهت اهداف مبهم ناشی از دکوی کششی، دو هواپیمای نزدیک به هم یا اثر چندمسیرگی در ردگیری اهداف ارتفاع پایین است.

۳- تخمین زاویه دو هدف مبهم قرار گرفته در

یک جهت ارتفاع یا سمت

هرگاه دو هدف مجزا در یک جهت ارتفاع یا سمت قرار گیرند $(\alpha_a - \alpha_b = 0 \text{ or } \beta_a - \beta_b = 0)$ مقدار اختلاف فاز بین دو مجموعه آنتن صفر و $D=0$ خواهد بود، بنابراین، الگوریتم پیشنهادی قادر به تشخیص زوایای اهداف نخواهد بود؛ لذا برای غلبه بر محدودیت الگوریتم پیشنهادی و بهبود دقت تخمین زاویه از یک آنتن اضافی (آنتن x_z) برای ایجاد مجموعه‌های جدیدی از آنتن‌ها استفاده می‌شود. در [۲۱-۲۲]، تخمین زاویه اهداف با جهت ورود سمت یا ارتفاع یکسان که دارای $\alpha=0$ یا $\beta=0$ بودند انجام شده است، اما روش ارائه شده در این مقاله، می‌تواند زاویه اهدافی با جهت ورود سمت یا ارتفاع یکسان را با هر α یا β تخمین بزند. علاوه بر این، مجموعه دوم آنتن‌ها می‌توانند زوایای اهدافی را که جهت‌های ورود متفاوتی دارند تخمین بزنند و دقت تخمین زاویه را به جهت آنکه از طریق دو مجموعه آنتن کشف می‌شود بهبود بخشند. آنتن

واقعی از دکوی کششی خواهیم بود. اگر $|\Sigma_{A1a}| < |\Sigma_{A1b}|$ آنگاه، Σ_{A1b} پاسخ سیگنال هدف فریب است. خطاهای زاویه فریب θ_b و φ_b بوده Σ_{A1a} پاسخ سیگنال هدف و خطاهای زاویه هدف واقعی θ_a و φ_a خواهد بود. اگر $|\Sigma_{A1a}| > |\Sigma_{A1b}|$ آنگاه Σ_{A1a} پاسخ سیگنال فریب، و خطای زاویه فریب θ_a و φ_a خواهد بود، Σ_{A1b} پاسخ سیگنال هدف واقعی بوده، و خطاهای زاویه هدف واقعی θ_b و φ_b به ترتیب در جهت ارتفاع و سمت هستند.

مشکل دو هدف در شرایط واقعی غیرمعمول نیست و ریاضیات و مفاهیم فیزیکی به راحتی قابل مدیریت هستند. برای سه هدف، ریاضیات یک تحلیل قطعی (یعنی تحلیلی که در آن موقعیت‌ها، دامنه‌ها و خصوصیات اهداف مشخص شده است) به طور قابل توجهی پیچیده تر می‌شود و برای بیش از سه هدف غیرعملی می‌شود. با این حال، بینش فیزیکی به دست آمده از تجزیه و تحلیل دو هدف به تفسیر مسئله چند هدف کمک می‌کند.

۴- تجزیه و تحلیل دقت تخمین زاویه

برای بررسی تأثیر اختلاف فاز اهداف و SNR بر دقت تخمین زاویه سمت، از (۳)، می‌توان (۱۲) را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} D &= 4 \times A_a A_b \sin(\psi_{A1}) \sin(\psi_{A2}) \\ E &= -4 A_a A_b \sin(\psi_{A1}) \sin(\psi_{A2}) (\varphi_a + \varphi_b) \\ F &= 4 A_a A_b \sin(\psi_{A1}) \sin(\psi_{A2}) \varphi_a \varphi_b \end{aligned} \quad (20)$$

در رابطه بالا $\psi_{A1} = \gamma_b - \gamma_a + \frac{\alpha_b - \alpha_a}{2} + \frac{\beta_b - \beta_a}{2}$ و $\psi_{A2} = (\beta_b - \beta_a)/2$ اختلاف فاز بین دو هدف در مجموعه آنتن اول و دوم است. خطای تخمین زاویه سمت با SNR هدف و $\sin(\psi_{A1}) \sin(\psi_{A2})$ ارتباط معکوس دارد. چون اختلاف فاز سیگنال دو هدف در کانال‌های گیرنده کمتر از ۹۰ درجه است ($0^\circ < \alpha_a, \alpha_b, \beta_a, \beta_b < 90^\circ$)، اگر $\beta_b = \beta_a$ یا $\psi_{A1} = 0$ باشد در رابطه (۱۲) $D=E=F=0$ خواهد بود، و زاویه تخمین زده شده با روش پیشنهادی خطای زیادی خواهد داشت. در این مورد، نمی‌توان راه حل‌های مورد انتظار را از (۱۱) بدست آورد. اختلاف زاویه ارتفاع بیشتر بین دو هدف، منجر به دقت تخمین زاویه بهتر در سمت می‌شود. برای بررسی تأثیر اختلاف فاز بر تخمین زاویه ارتفاع از (۱۲) می‌توان معادله (۱۱) را به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned} D &= 4 \times \sqrt{2g_a \cos(\beta_a/2)} \sqrt{2g_b \cos(\beta_b/2)} \sin(\psi_{E1}) \sin(\psi_{E2}) \\ E &= -4 A_{Ea} A_{Eb} \sin(\psi_{E1}) \sin(\psi_{E2}) (\theta_a + \theta_b) \\ F &= 4 A_{Ea} A_{Eb} \sin(\psi_{E1}) \sin(\psi_{E2}) \theta_a \theta_b \end{aligned} \quad (21)$$

که $\psi_{E1} = \psi_{A1}$ و $\psi_{E2} = (\alpha_b - \alpha_a)/2$ اختلاف فاز بین دو هدف در مجموعه آنتن اول و دوم هستند. خطای تخمین زاویه ارتفاع با SNR هدف و $\sin(\psi_{E1}) \sin(\psi_{E2})$ ارتباط معکوس

برای تعیین زاویه‌های ارتفاع اهداف، سیگنال مجموع مجموعه اول و دوم آنتن‌های Σ'_{E1} و Σ'_{E2} و سیگنال کانال تفاضل آن‌ها Δ'_{E1} و Δ'_{E2} به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \Sigma'_{E1} &= x_{01} + x_z \\ &= 2 \left[g_a \cos((\beta_a - \alpha_a)/4) e^{-j(\gamma_a + (3\alpha_a + \beta_a)/4)} \right. \\ &\quad \left. + g_b \cos((\beta_b - \alpha_b)/4) e^{-j(\gamma_b + (3\alpha_b + \beta_b)/4)} \right] \\ \Delta'_{E1} &= x_{01} - x_z \\ &= 2 \left[g_a \sin((\beta_a - \alpha_a)/4) e^{-j(\gamma_a + (3\alpha_a + \beta_a)/4)} \right. \\ &\quad \left. + g_b \sin((\beta_b - \alpha_b)/4) e^{-j(\gamma_b + (3\alpha_b + \beta_b)/4)} \right] \quad (17) \\ \Sigma'_{E2} &= x_z + x_{10} \\ &= 2 \left[g_a \cos((\beta_a - \alpha_a)/4) e^{-j(\gamma_a + (\alpha_a + 3\beta_a)/4)} \right. \\ &\quad \left. + g_b \cos((\beta_b - \alpha_b)/4) e^{-j(\gamma_b + (\alpha_b + 3\beta_b)/4)} \right] \\ \Delta'_{E2} &= x_z - x_{10} \\ &= 2 \left[g_a \sin((\beta_a - \alpha_a)/4) e^{-j(\gamma_a + (\alpha_a + 3\beta_a)/4)} \right. \\ &\quad \left. + g_b \sin((\beta_b - \alpha_b)/4) e^{-j(\gamma_b + (\alpha_b + 3\beta_b)/4)} \right] \end{aligned}$$

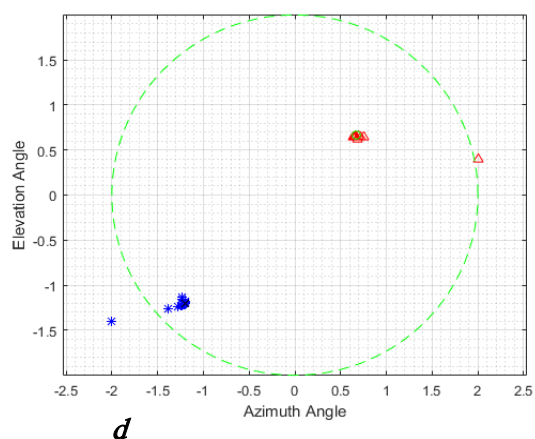
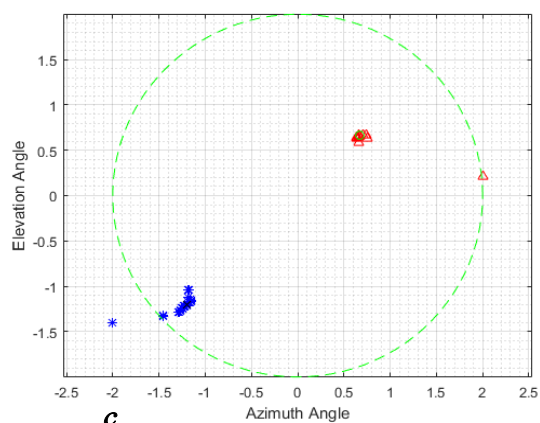
اختلاف فاز سیگنال اهداف در دو مجموعه آنتن متفاوت و دامنه سیگنال‌های دریافتی یکسان خواهد بود، بنابراین می‌توان φ' و θ' را از (۱۲، ۱۱) و α' و β' را از (۱۴) محاسبه نمود. فازهای α و β با معادلات زیر با α' و β' ارتباط داشته و به صورت زیر قابل تبدیل به یکدیگر هستند.

$$\begin{cases} \alpha' = \cos(-45)(d'/d)\alpha - \sin(-45)(d'/d)\beta = \frac{\alpha + \beta}{2} \\ \beta' = \sin(-45)(d'/d)\alpha + \cos(-45)(d'/d)\beta = \frac{-\alpha + \beta}{2} \\ \alpha = \cos(-45)(d/d)\alpha' + \sin(-45)(d/d)\beta' = \alpha' - \beta' \\ \beta = -\sin(-45)(d/d)\alpha' + \cos(-45)(d/d)\beta' = \alpha' + \beta' \end{cases} \quad (18)$$

اگر $\beta_a = \beta_b$ به دوفاز متفاوت در مختصات مجموعه آنتن‌های ثانویه منتهی می‌شود و $\alpha'_a \neq \alpha'_b$ و $\beta'_a \neq \beta'_b$ خواهد بود، بر این اساس، اگر مجموعه اول آنتن‌ها نتوانند زاویه اهداف را تخمین بزنند، تکنیک پیشنهادی از مجموعه دوم آنتن‌ها برای تخمین درست α' و β' استفاده نموده و زاویه دو هدف را استخراج می‌کند. برای شناسایی سیگنال هدف واقعی از هدف فریب (دکوی کششی)، Σ_a و Σ_b را به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

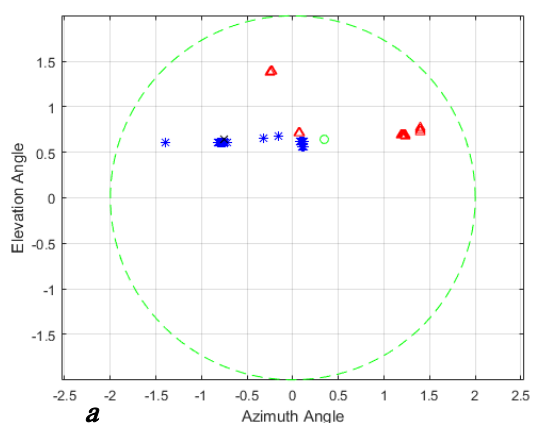
$$\begin{aligned} \Sigma_{A1a} &= \frac{\Sigma_{A1}\varphi_b - \Delta_{A1}}{\varphi_b - \varphi_a} \\ \Sigma_{A1b} &= \frac{\Sigma_{A1}\varphi_a - \Delta_{A1}}{\varphi_a - \varphi_b} \end{aligned} \quad (19)$$

برای فریب سیستم تخمین زاویه رادار، توان سیگنال فریب معمولاً بالاتر از توان سیگنال هدف واقعی است؛ لذا، بر اساس توان سیگنال، پس از جداسازی [۱۵]، قادر به شناسایی هدف



شکل (۳) (a) زاویه تخمین زده شده دو هدف مبهم توسط PCMR
مرسوم (b) نمودار پراکندگی تخمین زاویه هدف واقعی (* و دگوی فریب
(Δ) برای SNR=10dB همانند (b) به جز SNR=20dB (d) همانند (b)
به جز SNR=30dB (دایره عرض 3dB پرتو مجموع، و \times مکان هدف و
مکان دگوی فریب)

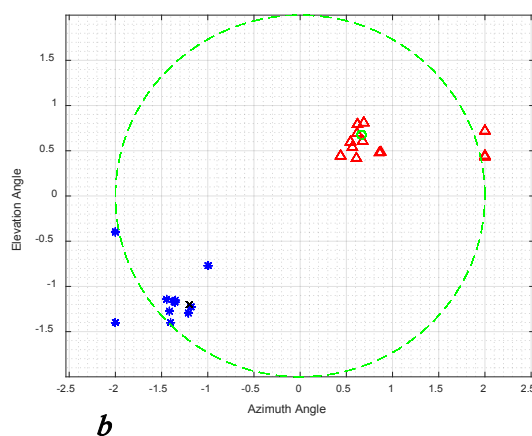
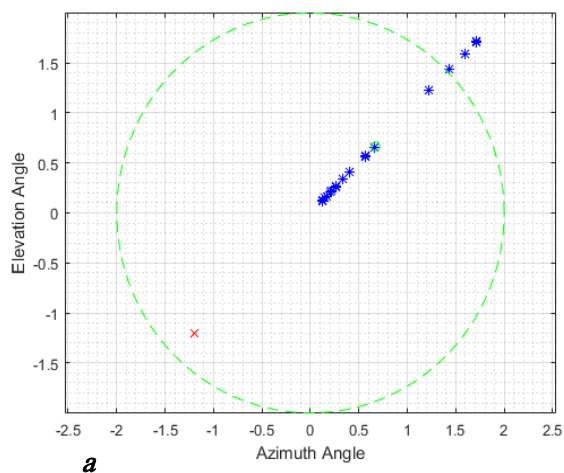
در این مرحله، شبیه‌سازی برای دو هدفی که در جهت ارتفاع
یا سمت یکسانی قرار دارند، انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی
تشخیص زاویه اهداف، برای ۲۰ پالس متوالی و SNR=20dB،
انجام شده است که نتایج آن در شکل (۴) ارائه شده است.



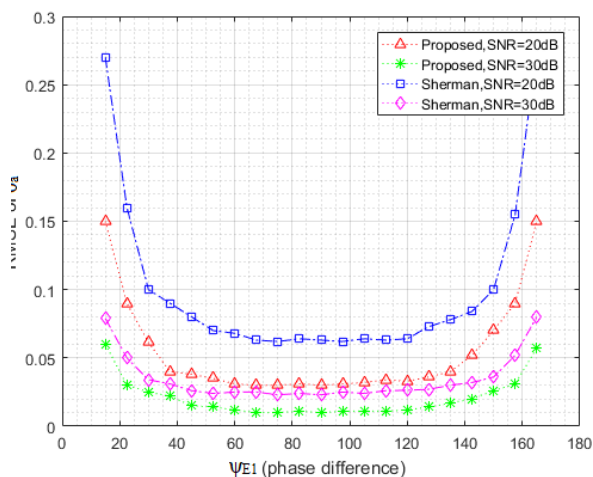
دارد. اگر $\alpha_b = \alpha_a$ یا $\psi_{EI} = 0$ باشد در رابطه (۱۱)، $D=E=F=0$ خواهد بود، بنابراین، زاویه تخمینی خطای قابل توجهی خواهد بود. لذا، به دلیل خطای زیاد، الگوریتم ارائه شده کاربردی نخواهد بود. بر اساس (۲۰) اختلاف زاویه سمت بیشتر بین دو هدف، باعث دقت تخمین زاویه بهتر در جهت ارتفاع می‌شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، توانایی روش پیشنهادی برای تخمین
زاویه‌های دو هدف مبهم در یک PCMR با شبیه‌سازی مورد
بررسی قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی عرض پرتو 3dB کانال
مجموع ۴° و هر کانال گیرنده 3.5° است، و دو هدف در یک
سلول رزولوشن قرار دارند. اهداف دارای دامنه و فازهای تصادفی
($g_a = [2-5]g_b$) بوده که پالس به پالس تغییر می‌کنند. شبیه‌سازی
انجام شده برای SNRهای مختلف، SNR=20dB، SNR=30dB،
SNR=10dB و مکان‌ها و زاویه‌های متفاوت دو هدف، برای ۲۰
پالس متوالی انجام می‌شود که در شکل (۳) نشان داده شده
است.

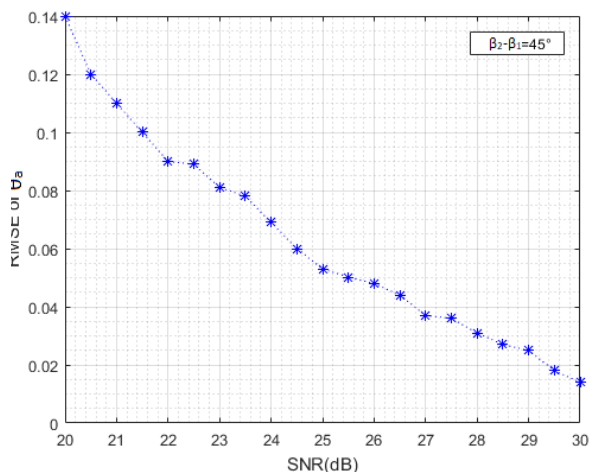


مطابقت دارد. شکل (۵) $RMSE^1$ زاویه θ_a را برای $SNR=20dB$ و $SNR=30dB$ برای دو روش شرم و روش پیشنهادی نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی $\phi_b - \phi_a = 2^\circ$ و ψ_{E1} (اختلاف فاز دو هدف) از 115° تا 165° متغیر است.



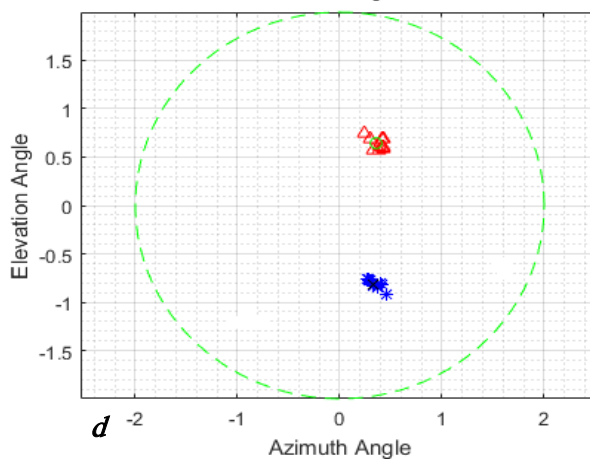
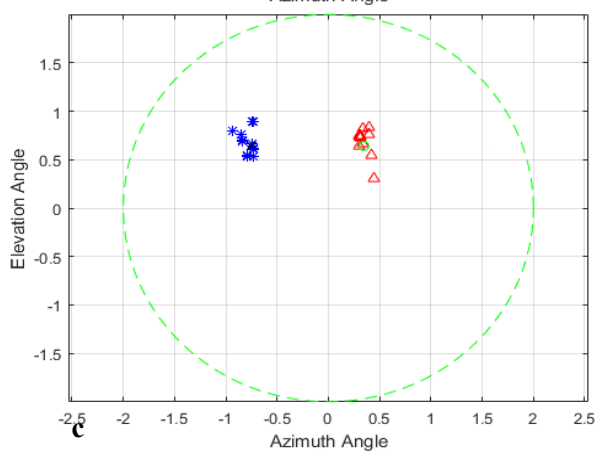
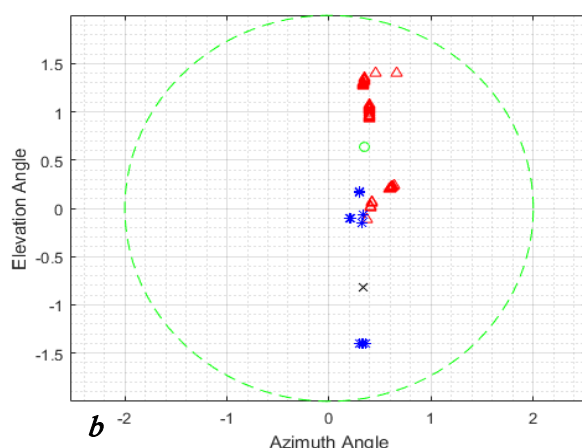
شکل (۵). $RMSE$ زاویه θ_a در مقابل ψ_{E1} برای روش پیشنهادی در مقایسه با روش شرم

از شکل (۵) مشخص می‌شود که روش پیشنهادی دقت تخمین زاویه بهتری نسبت به روش شرم دارد و عملکرد آن در شرایطی که ψ_{E1} نزدیک به 90° باشد بهتر خواهد بود. شکل (۶) $RMSE$ زاویه θ_a را در شرایطی که $\phi_b - \phi_a = 2^\circ$ و SNR از $20dB$ تا $30dB$ تغییر می‌کند، نشان می‌دهد.



شکل (۶). $RMSE$ زاویه θ_a در مقابل SNR

از شکل (۶) قابل مشاهده است که الگوریتم پیشنهادی با افزایش SNR عملکرد بهتری دارد. شکل (۷) $RMSE$ زاویه θ_a را در شرایطی که $(\alpha_b - \alpha_a)$ از 12° تا 80° درجه متغیر است، نشان می‌دهد.



شکل (۴). (a) زاویه تخمینی دو هدف مبهم با روش پیشنهادی بدون آنتن اضافی (در جهت ارتفاع یکسان). (b) همانند شرایط (a) برای حالت سمت یکسان (c) نمودار پراکندگی تخمین زاویه هدف واقعی (*) و فریب (Δ) با استفاده از مجموعه آنتن ثانویه برای ارتفاع یکسان. (d) همانند (c) برای زاویه سمت یکسان.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، دو هدف دارای فازهای تصادفی بوده که به طور تصادفی در عرض پرتو $3dB$ قرار دارند. نویز گوسی اضافه شده به سیگنال با سطوح مختلف SNR

¹ Root-Mean-Square Error

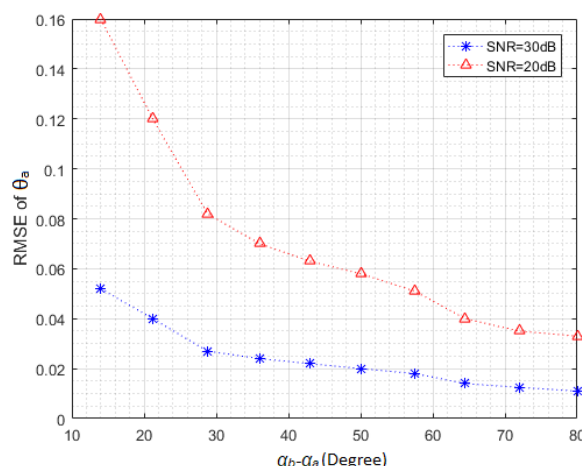
از جدول (۱) و شکل (۸) مشخص می‌شود که روش پیشنهادی در شرایطی که $75^\circ < \psi_{EI} < 115^\circ$ و $(\alpha_b - \alpha_a) > 30^\circ$ باشد، عملکرد مناسب و دقت تخمین زاویه دقیق‌تری خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با حل معادله‌های کانال مجموع و تفاضل که به صورت مجازی از PCMR تولید شده است، تنها با استفاده از یک پالس دریافتی برای انجام تفکیک زاویه اهداف مبهم استفاده شد که این امر تشخیص زوایای اهدافی با تغییرات سریع را ممکن می‌کند. استفاده از یک آنتن اضافی، تشخیص زوایای اهدافی با جهت ورود سمت یا ارتفاع یکسان را ممکن نمود و سبب بهبود عملکرد و دقت تخمین زاویه اهداف گردید. دقت روش پیشنهادی با افزایش اختلاف زاویه بین دو هدف و افزایش SNR نسبت مستقیم دارد. مشخص گردید که برای تخمین زاویه سمت یا زاویه ارتفاع، افزایش اختلاف زاویه سمت بین دو هدف، دقت تخمین زاویه ارتفاع را بهبود می‌بخشد و افزایش اختلاف زاویه ارتفاع بین دو هدف، دقت تخمین زاویه سمت را بهبود می‌بخشد. عملکرد روش پیشنهادی با مقایسه راه‌حل دقیق و شبیه‌سازی‌های انجام شده مورد تأیید قرار گرفت.

۷- مراجع

- [1] S.M. Sherman, D.K. Barton, "Monopulse Principles and Techniques (2nd ed.)", Boston, MA, Artech House, pp. 187–223, 2011.
- [2] N. Gogineni, S. Nehorai, "Monopulse MIMO radar for target tracking," IEEE Trans. Aerospace. Electron. System, 47, (1), pp. 755–768, 2011. DOI: 10.1109/TAES.2011.5705707
- [3] Z. Wang, A. Sinha, P. Willett, "Angle estimation for two unresolved targets with monopulse radar," IEEE Trans. Aerospace. Electron. System, 998 – 1019, 2004. DOI: 10.1109/TAES.2004.1337470
- [4] M. Pourjoula, M.M. Nayebi, M. Karbasi, "Employing iterative methods in synthetic aperture radar to clarify target and image," Journal of "Radar," Vol. 10, No. 2, 2022, (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.11.2>
- [5] M.J. Shi, J. Liu, "Improved two-targets resolution using dual-polarization radar with interlaced subarray partition," IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 397–400, China, 2017. DOI: 10.1109/ICEMI.2017.8265831
- [6] S. A. Mousavi, M. Farhang, M.A. Masnadi, "Comparison of the angle measurement performance of MIMO co-topological radar and phased array radar," Journal of "Radar," Vol. 5, No. 3, 2017, (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1396.5.3.5.3>

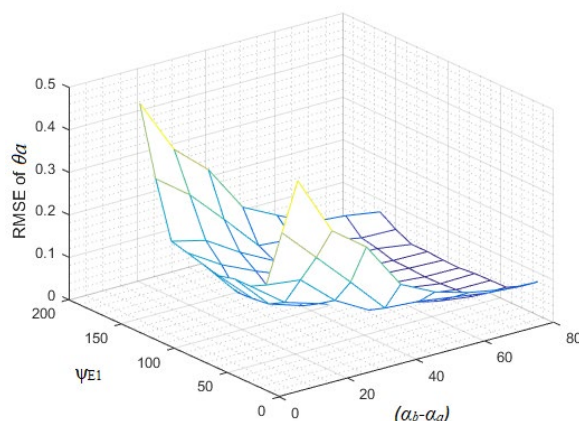


شکل (۷). RMSE زاویه θ_a در مقابل $(\alpha_b - \alpha_a)$ برای SNR=30dB و SNR=20dB در شرایطی که $\psi_{EI}=50^\circ$ و $\theta_b - \theta_a=2^\circ$

از شکل (۷) مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی با افزایش اختلاف زاویه سمت دو هدف $(\alpha_b - \alpha_a)$ دقت بهتری خواهد داشت. جدول (۱) و شکل (۸)، RMSE زاویه θ_a را برای مقادیر مختلف $(\alpha_b - \alpha_a)$ و ψ_{EI} برای SNR=20dB و در شرایطی که اختلاف زاویه ارتفاع دو هدف $\theta_b - \theta_a=2^\circ$ است، نشان می‌دهد.

جدول (۱). RMSE زاویه θ_a برای مقادیر مختلف $(\alpha_b - \alpha_a)$ و ψ_{EI}

$\alpha_b - \alpha_a$ \ ψ_{EI}	10	20	30	40	50	60	70	80
15	0.47	0.33	0.27	0.16	0.12	0.097	0.082	0.078
30	0.33	0.25	0.17	0.087	0.081	0.069	0.057	0.051
45	0.19	0.18	0.11	0.065	0.061	0.042	0.031	0.031
60	0.17	0.11	0.085	0.059	0.045	0.041	0.03	0.03
75	0.17	0.089	0.063	0.051	0.04	0.039	0.027	0.029
90	0.16	0.084	0.059	0.049	0.039	0.033	0.026	0.025
105	0.17	0.082	0.062	0.052	0.038	0.034	0.029	0.026
120	0.18	0.13	0.093	0.061	0.051	0.035	0.03	0.029
135	0.19	0.17	0.12	0.078	0.072	0.043	0.041	0.029
150	0.32	0.26	0.18	0.097	0.09	0.064	0.049	0.047
165	0.48	0.35	0.28	0.17	0.129	0.091	0.084	0.071



شکل (۸). RMSE زاویه θ_a برای مقادیر مختلف $(\alpha_b - \alpha_a)$ و ψ_{EI}

Electron. System, VOL. 48, NO.1, 2012. DOI: 10.1109/TAES.2012.6129678

[21] H. Rezaei, M.A. Sebt, N. Zarei, G. Saadati Moghadam, "Unambiguous Direction Estimation and Localization of Two Unresolved Targets via Monopulse Radar," *Electronics*, 11(22), 3780, 2022. DOI: 10.3390/electronics11223780

[22] H. Rezaei, M.A. Sebt, N. Zarei, G. Saadati Moghadam, "Closed-form angle estimation of unresolved targets in monopulse radar to counter the angular electronic attack," *IET Signal Processing*, 2023. DOI: 10.1049/sil2.12203

[7] S.P. Lee, B.L. Cho, S.M. Lee, "Unambiguous Angle Estimation of Unresolved Targets in Monopulse Radar," *IEEE Trans. Aerospace. Electron. System*, VOL.51, NO. 2, 2015. DOI: 10.1109/TAES.2014.140178

[8] J. Bosse, O. Rabaste, "Subspace rejection for matching pursuit in the presence of unresolved targets," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 66, No.8, 2018. DOI: 10.1109/TSP.2018.2795572

[9] M. Golabi, A. Sheikhi, M. Biguesh, "Target Localization by One Element Receiver Using Frequency Diverse Array Radars," *Journal of "Radar,"* Vol. 8, No. 2, 2020, (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1399.8.2.10.7>

[10] Y.N. Zhao, Z.Q. Zhou, X.L. Qiao, "Angle estimation for two closely spaced targets with polarization monopulse radar," *Proceeding of 2005 Asia-Pacific Microwave Conference*, 3– 8, Suzhou, China, 2005. DOI: 10.1109/APMC.2005.1606354

[11] S. M. Solhi Juybari, J. Mazloun, "Sensor Placement in Localization of Multiple Sources in the Presence of Distance Dependent Noise," *Journal of "Radar,"* Vol. 7, No. 1, 2019, pp.129-136 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1398.7.1.11.9>

[12] Zh. Song, F. Cai, Q. Fu, "A Joint Detection and Tracking Algorithm for Unresolved Target and Radar Decoy," *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 83, 43–60, 2019. DOI: 10.2528/PIERB18103101

[13] Zh. Lu, Y. Li, M. Gao, "Direction estimation for two steady targets in monopulse radar," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, February, Vol. 26, No. 1, pp.61–68, 2015. DOI: 10.1109/JSEE.2015.00009

[14] Zh.Y. Tseng, Yu K-B, "Closed-form four-channel monopulse two-target Resolution," *IEEE Trans. Aerospace. Electron. System*, 39, 3, 1083—1089, 2003. DOI: 10.1109/TAES.2003.1238760

[15] Sh. Yufei, W. Jiazhi, M. Longfei, "Algorithm supplement of four-channel two-target resolution for amplitude-comparison monopulse radar," *Electronics Letters*, Vol. 57 No. 17, 2021. DOI: 10.1049/ell2.12216

[16] W. Jianlu, X. Xiong, D. Huanya, S. Danhui, Q. Huidong, "Method for four-channel monopulse radar to resist dual-source angle deception jamming," *The Journal of Engineering IET*, 2018. DOI:

[17] S. Jardak, S. Ahmed, M.S. Alouini, "Generalised two target localisation using passive monopulse radar," *IET Radar Sonar Navig*, Vol. 11, pp. 932-936, 2017. DOI: 10.1049/iet-rsn.2016.0495

[18] S. Jardak, S. Ahmed, M.S. Alouini, "Two Target Localization Using Passive Monopulse Radar," *IEEE radar conference*, 2015. DOI: 10.1109/RadarConf.2015.7411878

[19] S. L. Wang, Z.H. Xu, X. Yang, Zh. Li, G. Wang, "Efficient and Unambiguous Two-Target Resolution via Subarray-Based Four-Channel Monopulse," *IEEE Transactions on Signal Processing*, VOL. 68, 2020. DOI: 10.1109/TSP.2020.2967184

[20] D.F. Crouse, "Comments on Closed-Form Four-Channel Monopulse Two-Target Resolution," *IEEE Trans. Aerospace*.