

تخمین وقتی جهت ورود سیگنال در محیط های انعکاسی

وحید حاج ملک^{۱*}، محمدحسین کهای^۲

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده برق

E-mail: v.hajmalek@hotmail.com

(دریافت: ۸۸/۱۱/۰۴، پذیرش: ۸۹/۰۶/۰۱)

چکیده

استفاده از اطلاعات مکانی (زاویه) در تخمین جهت ورود (Direction of Arrival) سیگنال می تواند بعضی از نقاط ضعف روش های زمانی را پوشش دهد. در این مقاله براساس روش D3LS (Direct Data Domain Least Square) اطلاعات دامنه سیگنال های ورودی به تک تک المان های یک آنتن آرایه ای به نحوی در یک ماتریس مربعی چیدمان می شود که بجز در ردیف اول، سایر آرایه های ماتریس ترکیبی از سیگنال های انعکاسی، نویز و تداخل گردد. با تشکیل معادله ای شامل این ماتریس، ضرایب وزندهی آنتن آرایه ای و بهره آنتن، ضرایب را به نحوی به دست می آوریم که تمام سیگنال هایی که جهت ورود آنها برای ما اهمیت ندارند اعم از سیگنال های انعکاسی، نویز و غیره به حداقل مقدار خود برسند. در ادامه با مقارن کردن ماتریس مربعی و تغییر در معادله اصلی با استفاده از روش Conjugate Gradient خطی ضرایب وزندهی آنتن به دست خواهد آمد. سپس با انجام شبیه سازی ها نشان خواهیم داد که این روش نسبت به روش D3LS سرعت همگرایی را به میزان قابل توجهی افزایش خواهد داد

کلیدواژه ها: رادار؛ همدوس؛ D3LS؛ Conjugate Gradient

Adaptive DOA Estimation in Reflective Environments

V. Hajmalek^{1*}, M. H. Kahaei²

Department of Electricity, Iran University of Science and Technology

E-mail: v.hajmalek@hotmail.com

Abstract

Usage of spatial information in the DOA estimation of signals, overcome some weaknesses of time-processing techniques. In this paper, following the Direct Data Domain Least Square (D3LS) technique, amplitude information of signals arrived at each element in an antenna array are arranged in a square matrix in which, except for the first row, other entries are combinations of reflective signals, noise and interference. By forming an equation including this matrix, weighting factors of antenna array, and antenna gain, coefficients are calculated in such a way that all signals which their DOA is not important, i.e. reflected signals, noise and etc., reach their least quantity. Then, by making a symmetric square matrix and modification of the main equation according to Linear Conjugate Gradient procedure, weighting factors of antenna are obtained. Finally, it is shown by simulation that this procedure will accelerate the convergence process remarkably compared with D3LS technique.

Keywords: RADAR; Coherent; D3LS; Conjugate Gradient

۱. مقدمه

باریک از فاصله خیلی دور وارد آرایه می‌گردد. ولتاژهای اندازه‌گیری شده در نقطه تغذیه آنتن‌ها را می‌توان به صورت برداری زیر بیان نمود:

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_N(t)]^T \quad (1)$$

$$= \mathbf{A}s(t) + \mathbf{n}(t)$$

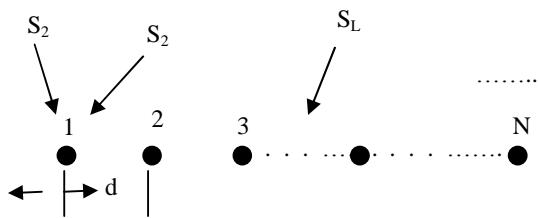
که T علامت ترانهاده است. \mathbf{A} یک ماتریس $N \times L$ شامل بردارهای تعقیب در L جهت سیگنال‌های ورودی است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{A} = [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a(\theta_L)] \quad (2)$$

که هر ستون آن با بردار تعقیبی به صورت زیر داده می‌شود:

$$\mathbf{a}(t) = [a_1(\theta) \ a_2(\theta) \ \dots \ a_N(\theta)]^T \quad (3)$$

$$= [1 \ e^{j\pi \frac{d}{\lambda} \cos \theta} \ \dots \ e^{j\pi \frac{d}{\lambda} (N-1) \cos \theta}]^T$$



شکل ۱. آرایه خطی یکنواخت با طول N

برداری $s(t)$ شامل L منبع موجود در محیط است که تشعشع آنها به آرایه می‌رسد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$s(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_L(t)]^T \quad (4)$$

در این روش برای تخمین جهت ورود سیگنال θ_s به طور کلی سه مرحله زیر انجام می‌گیرد [۴]:
مرحله اول، ایجاد معادله‌ای به صورت زیر است:

$$Fw(\theta_s) = b \quad (5)$$

در کاربردهای مخابرات سیار و رادار، قبل از اجرای الگوریتم‌های شکل‌دهی پرتو، نیاز به تخمین جهت ورود سیگنال می‌باشد [۱]. افزایش استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای در سیستم‌های مخابراتی باعث توجه روزافزون به الگوریتم‌های تخمین جهت ورود سیگنال در این گونه سیستم‌ها شده است. در این الگوریتم‌ها از اطلاعات زمانی رسیده به تک‌تک المان‌ها استفاده می‌گردد و بردارها و مقادیر ویژه ماتریس همبستگی ورودی المان‌ها جزء پارامترهای اصلی می‌باشند. لذا تشکیل ماتریس همبستگی ورودی با استفاده از صدها snapshot امری ضروری است [۲ و ۳]. به منظور استخراج بردارها و مقادیر ویژه، ماتریس همبستگی می‌بایست دارای مرتبه کامل باشد. اما در محیط‌هایی که ارتفاعات و موانع سبب تولید سیگنال‌های انعکاسی می‌گردند به دلیل همدوس بودن سیگنال برگشتی با سیگنال منبع، ماتریس همبستگی دارای مرتبه کامل نخواهد بود و این مسئله باعث بروز خطا در الگوریتم‌های مبتنی بر بردارها و مقادیر ویژه می‌گردد [۴]. روش تخمین جهت ورود سیگنال مبتنی بر معیار D3LS روش مناسبی به منظور تخمین جهت در محیط‌های انعکاسی یا همدوس می‌باشد [۵ و ۶]. در این روش با نمونه کردن مناسب یک آرایه خطی یکنواخت، معادله‌ای بین سیگنال‌های انعکاسی، تداخل و نویز و ضرایب وزن‌دهی المان‌های آنتن ایجاد می‌گردد. نحوه قرارگیری ضرایب وزن‌دهی به عنوان مجهول معادله به گونه‌ای است که با حل معادله، ضرایب وزن‌دهی می‌تواند سبب حداقل کردن سیگنال‌های انعکاسی، تداخل و نویز، یا به عبارت دیگر باعث حذف آن‌ها گردد. افزایش سرعت تخمین جهت در برخی از سیستم‌ها، نظیر هشداردهنده‌های راداری به ویژه در محیط‌های همدوس از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. در این مقاله با آرایه یک الگوریتم جدید، سرعت همگرایی تخمین جهت ورود سیگنال در روش مبتنی بر D3LS بهبود پیدا می‌کند.

۲. تخمین جهت ورود سیگنال مبتنی بر D3LS با

استفاده از CG غیرخطی

یک آرایه خطی یکنواخت مطابق شکل (۱)، شامل N آنتن تمام جهت به عنوان المان‌های آرایه می‌باشد که فاصله هر المان تا المان بعدی مقدار ثابت d می‌باشد. فرض کنید L سیگنال باند

جهت دیگر می آید و می توان آن را به عنوان سیگنال تداخل یا سیگنال انعکاسی در نظر گرفت، سیگنال دیگری وجود ندارد. اگر همین بررسی را در مورد سایر عناصر انجام دهیم به نتیجه مشابه خواهیم رسید. بنابراین می توان گفت بجز در ردیف اول ماتریس F ، سایر عناصر شامل سیگنالهایی هستند که جهت آنها برای ما مهم نمی باشند. از این رو ساختار (5) به گونه ای است که ضرایب به دست آمده اولاً باعث حذف سیگنالهایی که از جهات دیگر می آیند می شود و ثانیاً باعث کاهش نویز ورودی می گردد.

بر پایه همین استدلال می توان ماتریس B را بجای ماتریس F قرار داد با این تفاوت که هر عنصر آن حاصل تفریق مزدوج ورودی یک المان آنتن آرایه ای از مضرب Z^{-1} مزدوج المان قبلی آن است. از این رو خواهیم داشت:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & Z & \dots & Z^M \\ x_N^* - z^{-1}x_{N-1}^* & x_{N-1}^* - z^{-1}x_{N-2}^* & \dots & x_{M+1}^* - z^{-1}x_M^* \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{M+2}^* - z^{-1}x_{M+1}^* & x_{M+1}^* - z^{-1}x_M^* & \dots & x_2^* - z^{-1}x_1^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

مرحله دوم: عبارت است از حل معادله (5) که بدین منظور تابع هزینه (10) تعریف می شود. اگر ماتریس F یک ماتریس مربعی متقارن و معین مثبت باشد، معادله حاصل از تابع هزینه درجه 2 خواهد بود [7]. اما ماتریس F به خاطر بردار تعقیب جای گرفته در سطر اول خود تقارن را از دست می دهد. لذا بجای یک حداقل تابع دارای چند نقطه حداقل محلی می باشد.

$$\text{cost function} \triangleq \|F_N w(\theta_s) - b\|^2 \quad (10)$$

برای حل این گونه توابع روشهای مختلفی وجود دارد که روش وقتی آن، روش CG غیرخطی و به صورت زیر می باشد [5]:

$$r_0 = Fw_0 - b \quad (11)$$

$$d_0 = -\beta_0 F^H r_0 \quad (12)$$

که معادله ای برای حذف سیگنال مزاحم شامل (سیگنالهای انعکاسی، تداخل و نویز) است و ماتریس $F_{M+1 \times M+1}$ به صورت زیر تعریف می گردد:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & Z & Z^2 & \dots & Z^M \\ x_1 - Z^{-1}x_2 & & & \dots & x_{M+1} - Z^{-1}x_{M+2} \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & \\ x_M - Z^{-1}x_{M+1} & & & \dots & x_{N-1} - Z^{-1}x_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

که $b = [C \ 0 \ \dots \ 0]$ و $Z = e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta_s)}$ ، $M = \frac{N-1}{2}$ است. مقدار C معادل بهره آنتن بوده و λ طول موج سیگنال اصلی می باشد. وضعیت بردار w به عنوان ضرایب وزن دهی $M+1$ المان ارائه خطی است که به صورت زیر بیان می شود.

$$w(\theta_s) = [w_1(\theta_s) \ w_2(\theta_s) \ \dots \ w_{M+1}(\theta_s)]^T \quad (7)$$

همان طور که در ماتریس F ملاحظه می شود تمام عناصر ماتریس بجز عناصر ردیف اول، حاصل تفریق مجموع سیگنالهای رسیده شده در هر عنصر با مضربی از مجموع سیگنالهای رسیده شده در عنصر بعدی اش می باشد. فرض کنید دو سیگنال از دو جهت θ_s به عنوان سیگنال اصلی و θ_d به عنوان سیگنال مزاحم وارد اولین المان آرایه می شوند. بنابراین، وضعیت سیگنال برای مثال در اولین عنصر ردیف دوم به صورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{aligned} x_1 - Z^{-1}x_2 &= (s_1(t)e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta_s)} + s_2(t)e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta_d)}) - \\ &e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta_s)} (s_1(t)e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta_s)} + s_2(t)e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta_d)}) + n(t) \\ &= s_2(t)e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\theta_d)} - s_2(t)e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} (2\cos(\theta_d) - \cos(\theta_s))} + n(t) \end{aligned} \quad (8)$$

با توجه به حاصل عبارت (8) بجز سیگنال نویز و سیگنالی که از

می توان یک تخمین درست از جهت واقعی سیگنال به دست آورد.

۳. روش جدید افزایش سرعت همگرایی

ماتریس F یک ماتریس غیر متقارن با آرایه های موهومی می باشد. این مسئله سبب ایجاد نقاط حداقل محلی در معادله (۵)، و در نتیجه نیاز به استفاده از روش های غیر خطی جهت حداقل سازی تابع هزینه (۱۰) می باشد. بدین منظور از روش دیگری جهت رسیدن به ضرایب وزن دهی استفاده کرده و معادله (۵) را در هر میشن ماتریس F ضرب می کنیم:

$$F^H F_N w(\theta_s) = F^H b \quad (20)$$

که نمای H به مفهوم علامت Hermitian است. حاصل ضرب $F_N = F^H F$ یک ماتریس متقارن با همان مرتبه ماتریس F بوده و بردار $b_N = F^H b$ با همان ابعاد بردار b می باشد. بنابراین معادله جدیدی به صورت زیر تشکیل می گردد:

$$F_N w(\theta_s) = b_N \quad (21)$$

بدیهی است که جواب معادلات (۵) و (۲۱) یکی است و در معادله (۲۱) بجای ماتریس غیر متقارن F از ماتریس متقارن F_N استفاده شده است. بنابراین بجای معادله (۵) جواب معادله (۲۱) را به دست می آوریم. بدین منظور تابع هزینه ای به صورت زیر تعریف می گردد:

$$cf \triangleq \frac{1}{2} (w^H(\theta_s) F_N w(\theta_s)) - b_N^H w(\theta_s) \quad (22)$$

حداقل کردن این تابع معادل با به دست آوردن جواب معادله (۲۱) می باشد [۸]. به منظور حداقل سازی تابع هزینه (۲۲) از روش CG خطی استفاده می شود. اما با توجه به موهومی بودن ماتریس F_N ابتدا باید مطمئن شویم که تابع (۲۲) یک تابع درجه ۲ بوده و فقط یک نقطه حداقل مطلق دارد. بدین منظور فرض کنید $w(\theta_s)$ جواب تابع (۲۲) بوده و مقدار آن را حداقل می کند. اگر نقطه دیگری برای تابع در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\alpha_i = \frac{1}{\|F d_i\|^2} \quad (13)$$

$$w_{i+1}(\theta_s) = w_i(\theta_s) + \alpha_i d_i \quad (14)$$

$$r_{i+1} = r_i + \alpha_i F d_i \quad (15)$$

$$\beta_i = \frac{1}{\|F^H r_i\|^2} \quad (16)$$

$$d_{i+1} = d_i + \beta_i F^H r_{i+1} \quad (17)$$

برای شروع مقدار اولیه به ضرایب داده می شود و سپس با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) به ترتیب مقادیر اولیه β_0, r_0 و d_0 را به دست خواهیم آورد. در هر تکرار با جمع بردار ضرایب w_i با ضریبی α_i از بردارهای جستجو d_i بردار ضرایب جدید به دست می آید. علاوه بر بردار جستجو، از یک بردار کمکی r_i برای به دست آوردن ضرایب استفاده می شود. روابط برگشت پذیر در هر تکرار به صورت زیر خواهد بود، اگر ماتریس F مورد بررسی دقیق قرار گیرد. بجز ردیف اول، مابقی ردیف ها شامل سیگنال های انعکاسی تداخل و نویز ایجاد شده در دسته های L تایی المان های آنتن آرایه ای است. در صورت به دست آوردن جواب معادله، با توجه به ساختار معادله (۵) ضرایب به دست آمده سبب حذف سیگنال های انعکاسی تداخل و نویز می گردند. ردیف اول ماتریس نیز باعث عبور سیگنال اصلی است که از جهت θ_s وارد ارائه می گردد. در مرحله سوم، با استفاده از ضرایب وزن دهی حاصل، توان خروجی ارائه در جهت θ_s به صورت زیر بدست می آید:

$$y(t) = \sum_{i=1}^m w_i^*(\theta_s) x(t) \quad (18)$$

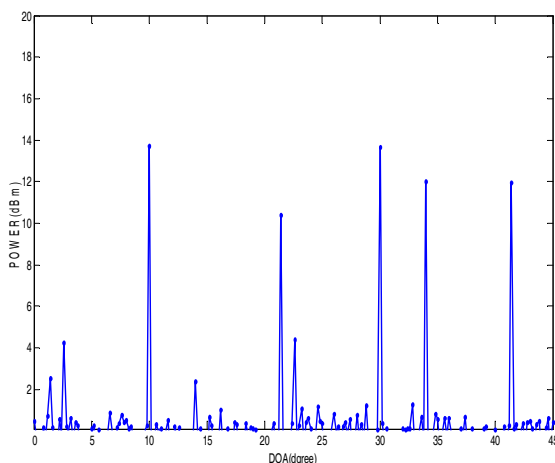
$$p(\theta_s) = y^*(t) y(t) \quad (19)$$

که $y(t)$ مقدار خروجی ناشی از ضرایب به دست آمده است. اجرای این الگوریتم سه مرحله ای برای یک محدوده زاویه دلخواه رسم، و مقادیر حاصله در محدوده مذکور سبب ایجاد حداکثر مقدار توان در جهت سیگنال ورودی می گردد که

در مرحله آخر، مشابه روش D3LS، با به‌دست آوردن طیف توان خروجی بر حسب جهت ورود سیگنال و به‌دست آوردن زوایا در نقاط حداکثر توان (پیک‌ها) جهت ورود سیگنال‌ها تخمین زده خواهد شد.

۴. نتایج شبیه‌سازی

یک آرایه خطی و یکنواخت که دارای ۲۱ المان می‌باشد در نظر گرفته می‌شود که فاصله المان‌های مجاور، از یکدیگر به اندازه $\frac{\lambda}{2}$ می‌باشد. از منابع راداری که در فواصل دور قرار دارند، دو سیگنال با زوایای ۱۰ و ۳۰ درجه توسط آنتن‌های آرایه دریافت می‌شوند. سیگنال‌ها نسبت به هم همبسته بوده و نسبت سیگنال به نویز در هر المان، ۲۵ dB در نظر گرفته می‌شود و نویز موجود گوسی با واریانس ۱ فرض می‌شود. در آزمایش اول به منظور بررسی صحت توانایی الگوریتم پیشنهادی در تخمین جهت سیگنال‌های ورودی، مراحل و روابط مربوطه در بخش ۳ را برای ورودی با شرایط بالا اجرا و نتایج آن به صورت شکل (۲) مشاهده می‌شود. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد ضرایب وزندهی به‌دست آمده w توان خروجی را در جهت ۱۰ و ۳۰ درجه حداکثر کرده است که با اعمال یک سطح آستانه مناسب به راحتی می‌توان این زوایا را پیدا و اعلام نمود.



شکل ۲. تخمین جهت ورود سیگنال‌های هم‌دوس با زوایای ۱۰ و ۳۰ درجه

$$cf(w(\theta_s) + p) = 1/2w(\theta_s) + p)^H F_N (w(\theta_s) + p) - b_N^H (w(\theta_s) + p) \quad (23)$$

$$cf(w(\theta_s) + p) = 1/2w(\theta_s)^H F_N w(\theta_s) + 1/2p^H F_N p - b_N^H w(\theta_s) - b_N^H p \quad (24)$$

$$cf(w(\theta_s) + p) = 1/2w(\theta_s)^H F_N w(\theta_s) - b_N^H w(\theta_s) + p^H b_N + 1/2p^H F_N p - b_N^H p \quad (25)$$

$$cf(w(\theta_s) + p) = cf(w(\theta_s)) + 1/2p^H F_N p \quad (26)$$

از طرف دیگر به لحاظ اینکه $F_N = F^H F$ مثبت معین است [۹]، عبارت $p^H F_N p$ همواره مقدار مثبت داشته و مقدار جدید تابع در (۲۶) از مقدار $cf(w(\theta_s))$ بزرگ‌تر است. بنابراین تابع هزینه (۲۲) فقط دارای یک نقطه است و می‌توان از روش CG خطی برای حداقل‌سازی تابع هزینه (۲۲) به صورت زیر استفاده کرد:

$$r_0 = d_0 = b_0 - F_0 w_0 \quad (27)$$

$$\alpha_i = \frac{d_i^H r_i}{d_i^H F_N d_i} \quad (28)$$

$$w_{i+1}(\theta_s) = w_i(\theta_s) + \alpha_i d_i \quad (29)$$

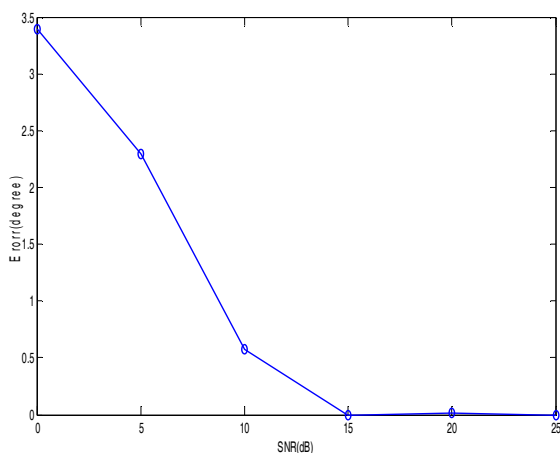
$$r_{i+1} = r_i + \alpha_i F_N d_i \quad (30)$$

$$\beta_{i+1} = \frac{r_{i+1}^H r_{i+1}}{r_i^H r_i} \quad (31)$$

$$d_{i+1} = r_{i+1} + \beta_{i+1} d_i \quad (32)$$

با اجرای روابط برگشت‌پذیر فوق، طی چند مرتبه تکرار ضرایب وزندهی w تخمین زده خواهند شد. با استفاده از این روش بجای روش غیر خطی D3LS سرعت همگرایی به‌میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که نتایج شبیه‌سازی‌ها به خوبی این مسئله را نشان می‌دهد.

۳/۵ درجه بوده و برای سیگنال با نویز بالای ۱۰dB خطا به کمتر از ۱ درجه می‌رسد.



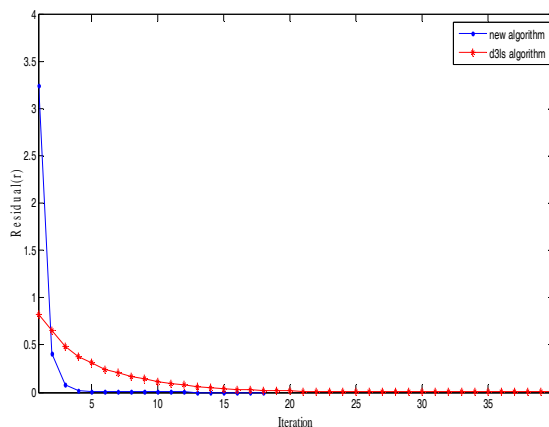
شکل ۴. میزان خطای تخمین با تغییرات سیگنال به نویز ورودی

به‌طور معمول در الگوریتم‌های تخمین جهت آرایه‌ای، یکی از پارامترهایی که در عملکرد الگوریتم مورد توجه است، تعداد اهداف تخمینی (تعداد جهات تخمینی) بازای تعداد مشخصی از المان‌های به‌کار برده شده در آنتن می‌باشد. لذا در مرحله دوم یک آنتن خطی آرایه‌ای شامل ۵ المان را در نظر می‌گیریم. ابتدا فرض کنید ۲ سیگنال راداری از دو جهت مختلف وارد آنتن می‌شوند. دامنه سیگنال‌ها ۱mv و میزان سیگنال به نویز در ورودی ۲۵dBm در نظر گرفته می‌شود. تحت این شرایط و با اجرای الگوریتم پیشنهادی، تمامی جهات بدرستی و با خطای (MSR) کمتر از ۰/۰۱۷ درجه تخمین زده می‌شود. با افزایش تعداد اهداف به عدد ۳، میزان خطا به میزان غیر قابل قبول ۵۳ درجه می‌رسد. حال اگر تعداد المان‌های آنتن را به ۷ المان افزایش دهیم خطا به مقدار اولیه خود یعنی کمتر از ۰/۰۱۷ درجه باز می‌گردد. با افزایش تعداد اهداف و تکرار شبیه‌سازی می‌توان رابطه‌ای بین تعداد المان آرایه یا به‌عبارت دیگر طول آنتن خطی و تعداد اهداف به‌دست آورد. در جدول زیر نتایج شبیه‌سازی‌ها برای روش پیشنهادی و الگوریتم مبتنی بر D3LS آورده شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. با بررسی نتایج جدول (۱) می‌توان گفت برای یک آرایه خطی N تایی تعداد جهات تخمینی در الگوریتم پیشنهادی، جزء صحیح $\frac{N-1}{2}$ خواهد بود.

در شبیه‌سازی بعدی به‌منظور بررسی تاثیر الگوریتم پیشنهادی در افزایش سرعت همگرایی با در فرض داشتن ورودی با همان شرایط آزمایش اول ابتدا ماتریس F را برای الگوریتم D3LS و ماتریس F_N را برای الگوریتم پیشنهادی تشکیل داده و روابط مربوطه اجرا می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، الگوریتم مبتنی بر D3LS بعد از ۲۰ تکرار و الگوریتم پیشنهادی بعد از ۴ تکرار همگرا می‌شوند. در این نمودار مقادیر در محور عمودی برحسب r_i در هر تکرار تعیین می‌شود. مقدار آن برای الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم مبتنی بر D3LS به‌ترتیب زیر خواهد بود:

$$r_i = b_N - F_N w_i \quad (33)$$

$$r_i = b - F w_i \quad (34)$$



شکل ۳. منحنی همگرایی روش مبتنی بر D3LS با استفاده از الگوریتم CG غیر خطی و روش پیشنهادی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، آن را از لحاظ میزان تاثیر نویز و تعداد اهداف، مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. در مرحله اول با شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی نسبت سیگنال به نویز را از صفر تا ۲۵dB در ورودی افزایش داده و اختلاف یا خطای تخمین جهت سیگنال ناشی از هر مرتبه افزایش نسبت به ورودی بدون نویز را به‌دست می‌آوریم. این عمل طی ۱۰۰ مرتبه تکرار شده و خطای ریشه میانگین مربعات خطاها (MSR) را محاسبه می‌نماییم. همان‌طور که در نمودار شکل (۴) نشان داده شده است، خطای MSR این الگوریتم در تخمین جهت ورود سیگنال با نسبت سیگنال به نویز ۰dB برابر

۶. مراجع

- [1] Vorobyov, S. A.; Gershman, A. B.; Luo, Z. Q. "Robust Adaptive Beamforming Using Worst-Case Performance Optimization: A Solution to The Signal Mismatch Problem."; IEEE Trans. Signal Proc. 2003, 51(2), 313-324.
- [2] Jalali, M.; Honarvar Shakibaei, B. "Angular Accuracy of ML, MUSIC, ROOT-MUSIC and Spatially Smoothed Version of MUSIC Algorithms."; International Journal of Computer and Electrical Engineering 2010, 2(3), 399-403.
- [3] Hwang, H. K.; Aliyazicioglu, Z. "Direction of Arrival Estimation Using A Root-MUSIC Algorithm."; Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2008 II, IMECS 19-21 March, Hong Kong.
- [4] Allen, B.; Ghavami, M. "Adaptive Array Systems."; 108-125, WILEY, 2005.
- [5] Wei, S.; Qian, Z-ping. "A Novel Simple DOA Estimation Algorithm Based on Direct Data Domain Approach Using Phase-only Conjugate Gradient Method."; Wireless Communications Networking and Mobile Computing 2006, 1-4.
- [6] Sarkar, K.; Koh, J. "SA Pragmatic Approach to Adaptive Antenna."; IEEE Antennas and Propagation Magazine 2000, 42(2), 39-55.
- [7] Kincaid, D.; Cheney, W. "Numerical Analysis of Scientific Computing."; 2nd ed. Book/Col INC, 1996.
- [8] Sarkar, T. K.; Arvas, E.; Rao, S. M. "Application FFT and the Conjugate Gradient Method for the Solution of Electromagnetic Radiation from Electrically Large and Small Conducting Bodies."; IEEE Transactions on Antennas and Propagation 1986, 34, 635-640.
- [9] Watkins, S. "Fundamentals of Matrix Computations."; 33-34, WILEY, 2002.
- [10] Chang, P. S.; Willson Jr., A. N. "Conjugate Gradient Method for Adaptive Direction-of-Arrival Estimation of Coherent Signals."; IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 1997, 3, 2281.
- [11] Wei, S.; Qian, Z. P. "A Fast DOA Estimation Algorithm Based on Direct Data Domain Least Square Approach."; 7th Int Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, 2006.

جدول ۱. بررسی اثر تعداد اهداف در الگوریتم پیشنهادی و D3LS

تعداد اهداف راداری	تعداد اهداف آنتن برای خطای کمتر از ۰/۰۰۱۷ درجه	تعداد جهات تخمینی درست در روش پیشنهادی	تعداد جهات اهداف درست تخمینی در روش D3LS
۲	۵	۲	۲
۳	۷	۳	۳
۴	۹	۴	۴
۶	۱۳	۶	۶
۸	۱۵	۸	۸
۱۲	۲۵	۱۲	۱۲

۵. نتیجه‌گیری

وابستگی الگوریتم‌های تخمین جهت متداول به بردارهای ویژه ماتریس همبستگی باعث می‌شود این الگوریتم‌ها در محیط‌های انعکاسی دچار خطا شوند. از الگوریتم D3LS می‌توان به‌عنوان الگوریتم جایگزین در محیط‌های انعکاسی استفاده کرد؛ اما به‌منظور استفاده از این الگوریتم در کاربردهای real time مانند هشداردهنده‌های راداری، دو راهکار را می‌توان دنبال کرد که عبارتند از: کاهش محاسبات و بهبود سرعت همگرایی.

در این مقاله با توجه به استفاده از روش CG غیرخطی در الگوریتم D3LS، الگوریتم جدیدی ارائه شده است که با جایگزینی معادله جدید (۲۱) بجای معادله اصلی (۵) روش D3LS امکان استفاده از روش CG خطی فراهم می‌آید. در نتیجه با استفاده از این روش، سرعت همگرایی بهبود پیدا خواهد کرد. همچنین با بررسی عملکرد این الگوریتم نسبت به تغییرات سیگنال به نویز درمی‌یابیم که در شرایطی که توان نویز با توان سیگنال برابر است، حداکثر خطا در تخمین جهت ورود سیگنال ۳/۵ درجه می‌باشد و در شرایط معمولی سیگنال به نویز برای سیگنال راداری (۱۵dB-۱۰) خطای حاصله کمتر از ۱ درجه است که این نتایج عملکرد خوبی را برای این الگوریتم نشان می‌دهد.

