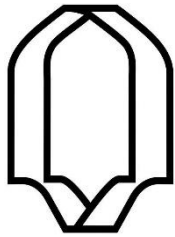


به نام خدا



دانشگاه سبز

دانشکده مهندسی برق

عنوان پروژه:

شبیه‌سازی الگوریتم MUSIC جهت تخمین زاویه سیگنال‌های ورودی به یک آرایه آنتن
با نرم‌افزار MATLAB و با زبان C

استاد راهنما:

جناب دکتر علی اکبر تدین تفت

نام دانشجو:

علیرضا دری

پهمن ماه ۱۳۹۹

تشکر و قدردانی:

از استاد محترم راهنما جناب دکتر علی اکبر تدین تفت بابت کمک شایان در انتخاب موضوع پروژه و درک مفاهیم مربوط به آن سپاس گزارم. همچنین معرفی جناب دکتر حسین واعظی توسط ایشان، جهت کمک در انجام پروژه بسیار رهگشا بود.

از دکتر حسین واعظی که در مراحل مختلف انجام پروژه با راهنمایی خود مسیر انجام پروژه را هموار کردند تشکر می‌کنم.

چکیده

الگوریتم MUSIC یکی از روش های کارآمد در تخمین زاویه سیگنال های ورودی به یک آرایه آنتن است در این پروژه با شبیه سازی سیگنال های ورودی به یک آرایه آنتن و پیاده سازی الگوریتم مورد نظر بر روی این داده ها میزان دقت این الگوریتم را اندازه می گیریم و اثر تغییر هر یک از پارامتر های شبیه سازی را بر روی نتایج مورد بررسی قرار خواهیم داد و با معرفی روش هایی سعی در بهبود برخی از کاستی های این الگوریتم خواهیم کرد از جمله بیان راه حلی برای تخمین زاویه چند سیگنال که دارای همبستگی هستند. در نهایت این الگوریتم را بر روی داده های واقعی پیاده سازی خواهیم کرد تا عملکرد الگوریتم را در شرایط واقعی نیز مورد بررسی قرار دهیم.

کلمات کلیدی

تخمین زاویه ورودی، آرایه آنتن، اختلاف فاز، زاویه

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	3
۱-۱- مقدمه	4
۱-۲- تعاریف واژه ها	5
فصل ۲: روش انجام پروژه	6
۲-۱- مقدمه	7
۲-۲- روش انجام شبیهسازی	11
۲-۳- معیار اندازه گیری	12
فصل ۳: شبیهسازی و نتایج	13
۳-۱- شبیهسازی اول: بررسی اثر تغییر پارامتر ها	14
۳-۱-۱- بررسی اثر تعداد المان های آرایه آنتن	15
۳-۱-۲- بررسی اثر تعداد نمونه ها	15
۳-۱-۳- بررسی اثر نویز	16
۳-۱-۴- بررسی اثر فاصله المان های آرایه آنتن	17
۳-۱-۵- اثر فرکانس نمونه برداری	17
۳-۲- شبیهسازی دوم: پیادهسازی روش CAPON	19
۳-۳- شبیهسازی سوم: پیادهسازی الگوریتم برای چند کانال باریک باند با استفاده از فیلتر بانک	20
۳-۴- شبیهسازی چهارم: پیاده سازی الگوریتم برای سیگنال های دارای همبستگی	22
۳-۵- شبیهسازی چهارم: تست با سیگنال باند وسیع	23
۳-۶- تست برنامه با سیگنال واقعی	24
۳-۷- پیادهسازی برخی از شبیهسازی های انجام شده در زبان C++	25
۳-۷-۱- شبیهسازی اول: انجام شبیهسازی اول با شرایط پیش فرض	25
۳-۷-۲- شبیه سازی دوم: پیاده سازی با فیلتر بانک	26
۳-۷-۳- تست با سیگنال واقعی	27
فصل ۴: نتیجه گیری و پیشنهادات	29
۴-۱- نتایج	30
۴-۲- پیشنهاد ها	31
منابع	32

فصل ۱: مقدمه

تخمین زاویه سیگنال ورودی به گیرنده با استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای موضوعی است که نیاز اساسی سیستم‌های مختلفی نظیر رادار، سونار، مخابرات بی‌سیم، زمین‌نگاری و مهندسی پزشکی به شمار می‌رود و در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

تخمین زاویه سیگنال ورودی به معنی آن است که تشخیص دهیم سیگنال از چه جهتی به آرایه آنتن می‌رسد. در واقع زاویه‌ای که سیگنال نسبت به آرایه آنتن دارد باعث ایجاد یکسری تغییرات منظم در سیگنال دریافتی هر المان نسبت به المان دیگر می‌شود. انواع مختلف روش‌های تخمین زاویه با استفاده از پردازش سیگنال‌های هر المان از این تغییرات منظم استفاده کرده و زاویه سیگنال ورودی را تخمین می‌زنند.

اخیراً در شبکه‌های بی‌سیم از قابلیت جهت دهی آنتن استفاده می‌شود. (استفاده از جهت دهی مزایای زیادی به همراه دارد که از جمله آن می‌توان به استفاده مجدد از یک پهنای باند، کاهش اثر کانال بر امواج رادیویی و ... اشاره کرد). واضح است که سیستم‌های گیرنده و فرستنده نیاز دارند تا موقعیت خود را نسبت به یکدیگر بدانند تا در جهت تشخیص داده شده ارسال و دریافت را انجام دهند. برای شناسایی موقعیت سیستم‌ها نسبت به هم، نیاز است تا سه ویژگی سیستم‌ها را نسبت به یکدیگر پیدا کنیم:

۱. فاصله دو سیستم

۲. زاویه در جهت افق

۳. زاویه در جهت عمود

بدون دانستن زاویه سیگنال ورودی تعیین موقعیت هر کدام از دو سیستم نسبت به هم غیر ممکن خواهد بود. بدیهی است که در این پروژه تخمین زاویه فقط در یک جهت شبیه‌سازی می‌شود چرا که راستای چینش آرایه‌های آنتن است که زاویه را در جهت عمودی یا افقی در اختیار ما قرار می‌دهد.

در رادارها نیز با استفاده از این روش موقعیت هدف به خوبی تخمین زده می‌شود آن هم بدون نیاز به چرخش مکانیکی آنتن رادار. یکی از مزیت‌های آن علاوه بر دقت بیشتر این است که تغییر موقعیت هدف با سرعت بیشتری به‌روزرسانی می‌شود.

روش‌های کلی متنوعی برای تخمین زاویه ورودی (Direction of arrival (DOA) با دقت بالا وجود دارد مانند روش‌های مبتنی بر فاز در آرایه خطی و یا روش‌های مبتنی بر تاخیر که در این اینجا قصد داریم روشی مبتنی بر فاز آرایه خطی به نام الگوریتم MUSIC (Multiple signal classification) را مورد بررسی قرار دهیم. در واقع اکثر این روش‌ها مبتنی بر قابلیت جهت دهی (Beamforming) آنتن‌های آرایه‌ای است که با بیان راهکارهایی از این قابلیت در جهت عکس استفاده می‌کنند.

در این پروژه قصد داریم با شبیه‌سازی سیگنال‌های باریک‌بند دقت اندازه‌گیری روش MUSIC و عوامل تاثیرگذار بر آن را مورد بررسی قرار دهیم. همچنین با پیاده‌سازی روش capon میزان دقت هر دو روش را در یک شرایط یکسان مورد بررسی قرار می‌دهیم. یکی از مشکلات تخمین زاویه ورودی، تخمین زاویه سیگنال‌هایی است که با یکدیگر همبستگی دارند که یک راه‌حل ساده برای آن عنوان خواهد شد و میزان دقت و کارایی آن ارائه می‌شود. نحوه عملکرد الگوریتم در حضور چند کانال باند باریک را شبیه‌سازی می‌کنیم و عملکرد آن را برای کانال‌های متفاوت بررسی می‌کنیم. در نهایت عملکرد سیستم را برای دو سیگنال باند وسیع LTE مورد بررسی قرار می‌دهیم یک که یکی از سیگنال‌ها توسط نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی

می‌شود و دیگری یک سیگنال واقعی است. همچنین برخی از کارها را علاوه بر نرم افزار Matlab با زبان C انجام می‌دهیم تا بتوانیم الگوریتم مورد نظر را به یک زبان سطح پایین تر انتقال دهیم چرا که زبان های سطح پایین تر از انعطاف کمتری نسبت Matlab برخوردار هستند و با پیاده‌سازی الگوریتم بر روی زبان C مشکلاتی که ممکن است در پیاده سازی عملی (مثلا پیاده‌سازی بر روی FPGA) پیش بیاید را کشف کنیم و در جهت حل این مشکلات راه حلهایی را بیان کنیم.

در فصل بعدی (فصل ۲) ابتدا روش های تخمین زاویه ورودی به طور خلاصه بیان می‌شود و روش منتخب خود یعنی MUSIC را به طور کامل شرح داده و نحوه کار آن ارائه خواهد شد. سپس توضیحاتی در مورد روش های تئوری انجام شبیه‌سازی های مختلف ارائه خواهد شد.

در فصل سوم نتایج شبیه‌سازی ها ارائه شده است و توضیحات تکمیلی در آن فصل قرار گرفته است. و در فصل آخر پیشنهاد هایی برای علاقه‌مندان این حوزه قرار گرفته است.

۲-۱- تعاریف واژه ها

رزولوشن: منظور از رزولوشن قدرت شناسایی دو زاویه نزدیک به هم می‌باشد.

فصل ۲: روش انجام پروژه

روش های مهم و پر کاربرد تخمین زاویه ورودی عبارتند از :

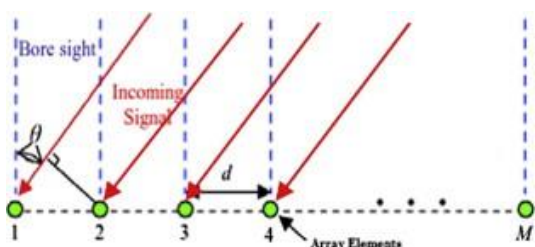
Maximum likelihood:

ESPRIT: estimation of signal parameters via rotational invariance technique.

Capon: MVDR(minimum variance distortionless response).

MUSIC

که همانطور که گفته شد ما قصد داریم روش MUSIC را بررسی کنیم. که از دقت و رزولوشن بالایی برخوردار است در ادامه به توضیح سیستم فازی آرایه خطی و سپس توضیح بخش های دیگر به صورت تئوری می پردازیم.



۱. **آشنایی با سیستم :** آنتن های آرایه ای می توانند وجود یک سیگنال منتشر شده را کشف کنند و زاویه ورودی آن هارا تخمین بزنند.

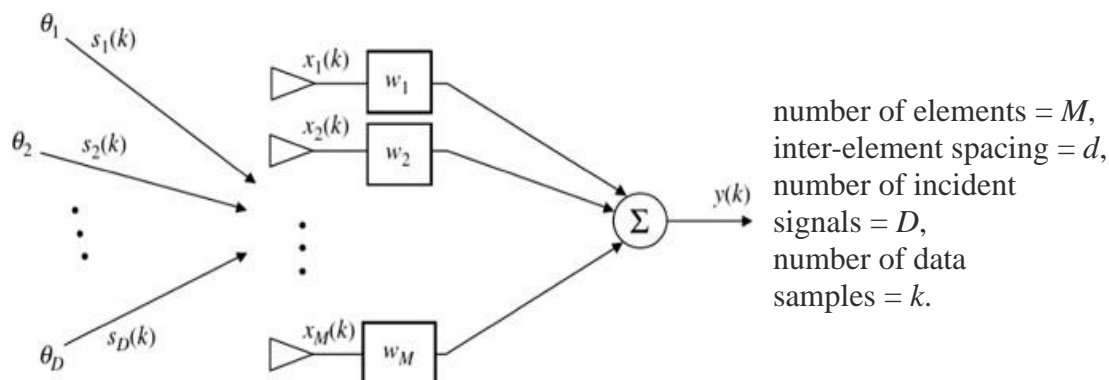
چنانکه در تصویر بالا مشاهده می شود فرض می کنیم سیگنال ورودی از یک منبع خیلی دور با زاویه مجهول θ به آرایه آنتن می رسد. در اینجا فرض می کنیم آرایه آنتن دارای M المان است که به فاصله d از یکدیگر قرار گرفته اند و d به اندازه نصف طول موج سیگنال ورودی است.

آنچنان که واضح است فاصله المان ها تا منبع یکسان نیست در نتیجه مسافت طی شده توسط سیگنال از منبع تا هر المان آرایه آنتن متفاوت است که این باعث می شود سیگنال های هر المان نسبت به المان مجاور خود اختلاف فازی داشته باشند که این اختلاف فاز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\frac{2\pi d \sin \theta_k}{\lambda}$$

رابطه ۲-۱

۲. **مدل آرایه آنتن:** فرضیات سیستم به طور کلی چنین است:



چنانچه برای هر سیگنال فاز ورودی به المان اول را به صورت فرضی برابر با صفر قرار دهیم و اختلاف فاز هر المان را نسبت به المان اول محاسبه کنیم، ماتریسی تک ستونی برای هر سیگنال به دست می آید که آن را $a(\theta_i)$ می نامیم که در آن i شماره سیگنال ورودی است و برای هر سیگنال این ماتریسی به فرم مقابل خواهد بود. و در آن β برابر است با $2\pi/\lambda$

$$a(\theta_1) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\beta d \cdot \sin(\theta_1)} \\ e^{j2\beta d \cdot \sin(\theta_1)} \\ \vdots \\ e^{j(M-1)\beta d \cdot \sin(\theta_1)} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

پس با توجه به شکل بالا و ماتریس اختلاف فاز داریم:

$$\begin{bmatrix} \vec{x}_1(k) \\ \vec{x}_2(k) \\ \vdots \\ \vec{x}_M(k) \end{bmatrix} = [\vec{a}(\theta_1) \quad \vec{a}(\theta_2) \quad \dots \quad \vec{a}(\theta_D)] \begin{bmatrix} S_1(k) \\ S_2(k) \\ \vdots \\ S_D(k) \end{bmatrix} + \vec{n}(k)$$

$$\vec{x}(k) = \vec{A} \cdot \vec{S}(k) + \vec{n}(k) \quad \text{معادله ۲-۱}$$

$$x(k) = (\text{ماتریس اندازه سیگنال به علاوه نویز}) \quad [M \times K]$$

$$S(k) = (\text{سیگنال های ورودی فرض میکنیم تمام سیگنال ها با یک اندازه به هر المان میرسد}) \quad [D \times K]$$

$$a(\theta_i) = (\text{همان ماتریس اختلاف فاز است}) \quad [M \times 1]$$

$$A = (\text{ماتریس بردار های اختلاف فاز}) \quad [M \times D]$$

هریک از المان های داخل آن یک بردار ستونی با M سطر می باشد پس این ماتریس به صورت $M \times D$ خواهد بود.

$$n(k) = (\text{ماتریس نویز}) \quad [M \times K]$$

از فرضیات مهم دیگر این است که تعداد سیگنال ها حتماً باید کمتر از تعداد المان های آنتن باشد.

سیگنال دریافتی در آنتن به صورت تئوری پس از نمونه برداری به فرم $x(k)$ خواهد بود. الگوریتم MUSIC و سایر روش های تخمین زاویه ورودی می بایست این ماتریس را تجزیه کنند و زاویه ورودی هر سیگنال را استخراج نمایند. در حالت واقعی علاوه بر نویز عوامل دیگری از جمله سیگنال های دارای همبستگی (اثر کانال بر سیگنال) در ماتریس $x(k)$ اثر دارد که در ادامه به بررسی آن می پردازیم.

۳. الگوریتم MUSIC : تا به اینجا با فرضیات سیستم و همچنین اثری که زاویه سیگنال ورودی بر نمونه ها

می گذارد آشنا شدیم. اکنون به این بحث می پردازیم که الگوریتم MUSIC با چه روشی سیگنال های نمونه

برداری شده را تجزیه کرده و اطلاعات مورد نیاز یعنی زاویه سیگنال را به ما تحویل می دهد.

اولین داده مورد نیاز این الگوریتم ماتریس نمونه ها یعنی $x(k)$ می باشد. ابتدا ماتریس همبستگی $x(k)$ را محاسبه

می کنیم:

$$R_{xx} = E[x, x^H] = E[(As + n)(s^H A^H + n^H)]$$

معادله ۲-۲

$$\begin{aligned} &= AE[s, s^H]A^H + E[n, n^H] \\ &= AR_{ss}A^H + R_{nn} \end{aligned}$$

که در آن علامت H به معنای هرمیت است. ماتریس هرمیتی ماتریسی است مربعی که ترانپوز آن با خودش برابر است. دقت شود که ماتریس R_{xx} یک ماتریس $M \times M$ است.

علامت E امید ریاضی است. R_{ss} ماتریس همبستگی سیگنال ها (بدون در نظر گرفتن اختلاف فاز) می باشد و R_{nn} ماتریس همبستگی نویز است و این ماتریس ها هم $M \times M$ می باشند. ماتریس همبستگی آرایه ها تعداد M ویژه مقدار و M ویژه بردار دارد. اگر ویژه بردارهای ماتریس R_{xx} را حساب کنیم (این ماتریس نیز $M \times M$ می باشد) می توانیم این ماتریس را به دو ماتریس تقسیم کنیم. این تقسیم بندی به این گونه خواهد بود:

$$\text{Eig vector } (R_{xx}) = [E_N \ E_S]$$

که در آن E_S شبه فضای سیگنال (signal subspace) است و تعداد D ستون پایانی R_{xx} می باشد و E_N شبه فضای نویز (noise subspace) می باشد که سائز آن $M \times (M-D)$ می باشد.

نکته مهم این است که ماتریس E_N بر ماتریس اختلاف فاز A عمود است. به دلیل این عمود بودن می توان تمام زوایای سیگنال ها را محاسبه کرد. از آن جا که ماتریس A جزء مجهولات مسئله است، برای محاسبه آن باید ماتریس هایی برای تمام زوایا (مثلا با گام نیم درجه) در بازه $[-90, 90]$ شبیه سازی شود. هر کدام از ماتریس های شبیه سازی شده در صورتی عمود بر ماتریس E_N هستند که حاصل رابطه ذیل عدد بزرگی شود. در نتیجه ماتریس A همان ماتریس های شبیه سازی شده عمود بر E_N می باشد.

رابطه مورد نظر به فرم زیر است:

$$P_{mu}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) E_N E_N^H a(\theta)}$$

معادله ۲-۳

که در آن $a(\theta)$ ماتریس شبیه سازی شده A با زاویه θ است که اگر یک زاویه ورودی در آن θ وارد آنتن شود حاصل معادله به دلیلی که گفته شد مقدار بزرگی خواهد بود.

یک نکته مهم که باید به آن توجه شود و در مطالب بالا قرار دارد این است که الگوریتم MUSIC با توجه به اختلاف فازی که بین نمونه های یکسان آنتن های مختلف است کار می کند. در واقع شرط کار کردن الگوریتم این است که نمونه برداری از آنتن ها حتماً به صورت همزمان باشد. چرا که در واقع تاخیر در نمونه برداری یک آنتن مانند تاخیر در رسیدن سیگنال به آن آنتن و در نتیجه ایجاد اختلاف فازی در سیگنال آن آنتن می شود که موجب افزایش خطا در الگوریتم می شود. این اتفاق در شبیه سازی پیش نمی آید اما باید به آن دقت شود.

۴. روشی برای تخمین زاویه سیگنال های دارای همبستگی (Correlated Signals): در انتشار یک

سیگنال عموماً مسیر های متفاوتی وجود دارد که سیگنال از طریق این مسیر ها به آنتن می رسد در چنین شرایطی تشخیص مسیر مستقیم (line of sight) کمی مشکل است. چرا که سیگنال های مشابه از مسیر های متفاوت و در نتیجه با زاویه های مختلف به آرایه آنتن می رسند. اگر توان سیگنال هایی که از مسیر های غیر

مستقیم به آنتن می‌رسند بسیار کم باشد مشکلی نخواهیم داشت ولی در غیر این صورت الگوریتم نه تنها قادر نیست تمام زاویه های ورود را شناسایی کند بلکه حتی در تشخیص یکی از آن ها هم دچار مشکل می‌شود.

برای حل این مشکل یک راه حل ساده این است که المان های آرایه آنتن را به چند زیر آرایه تقسیم کنیم سپس به جای محاسبه کواریانس تمام آنتن ها، کواریانس هر کدام از زیر آرایه ها را محاسبه می‌کنیم و میانگین آن را محاسبه کرده و محاسبات را برای این ماتریس ادامه می‌دهیم.

در واقع اگر فرض کنیم تعداد کل زیر آرایه ها برابر N_{tot} باشد که هر کدام از آنها دارای تعداد N_{sub} سنسور آنتن باشد در این صورت ماتریس کواریانس (R_{xx}) که در روابط الگوریتم از آن استفاده می‌کردیم به صورت زیر خواهد بود.

$$R_{xx} = \frac{1}{N_{tot}} \times \sum_{i=1}^{N_{tot}} R_i \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

که در آن R_i ماتریس کواریانس زیر آرایه i ام می‌باشد. که یک ماتریس $N_{sub} \times N_{sub}$ می‌باشد.

در این حالت سیستم توانایی آن را دارد که به تعداد N_{tot} سیگنال همبسته را پیدا کند البته باید توجه داشت که این محدودیت برای هر نوع سیگنال اعمال می‌شود برای مثال اگر تعداد زیر آرایه ها ۲ باشد و ۴ سیگنال داشته باشیم که دو به دو با یکدیگر همبسته باشند الگوریتم قابلیت تخمین زاویه هر کدام از سیگنال ها را خواهد داشت ولی اگر تعداد سیگنال هایی که همبسته هستند بیشتر از ۲ باشد الگوریتم توانایی تشخیص خود را تا مقدار زیادی از دست می‌دهد. استفاده از این روش محدودیتی برای ما به همراه دارد و آن این است که تعداد حداکثر سیگنال های قابل شناسایی به $(N_{sub} - 1)$ تقلیل پیدا می‌کند.

۵. روش Capon: علاوه بر روش MUSIC روشی مشابه وجود دارد که در آن به جای محاسبه شبه فضای نویز و استفاده از آن در معادله (۲-۳) از وارون ماتریس کواریانس (R_{xx}) استفاده می‌شود و رابطه آن به فرم زیر است.

$$P_{Capon}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad \text{رابطه ۲-۴}$$

مراحل قبلی و بعدی روش فوق دقیقاً مانند الگوریتم MUSIC است و تنها تفاوت آن در همین رابطه خلاصه می‌شود. این روش از دقت پایین تری برخوردار است اما پیاده سازی آن ساده تر و سریعتر است.

در این برنامه در مرحله اول اطلاعات شبیه‌سازی سیگنال‌های ارسالی وارد میشود. در مرحله بعد باید سیگنال‌ها را با فرکانس‌های مشخص شده تولید کنیم در واقع این سیگنال‌ها همان ماتریس S در معادله ۱-۲ می‌باشد. سپس باید سیگنال دریافتی هر المان آرایه آنتن را با توجه به سیگنال‌های قسمت قبل تولید کنیم. که چون سیگنال باریک باند است قابلیت پیاده‌سازی دارد این کار برگرفته از معادله ۱-۲ است یعنی ماتریس A را با کمک رابطه ۲-۲ شبیه‌سازی کرده و در ماتریس S قسمت قبل ضرب میکنیم. سیگنال حاصل همان سیگنال دریافتی بدون نویز است. در آخر سیستم را نویز دار می‌کنیم.

تا به اینجا سیگنال دریافتی آنتن ساخته می‌شود. قسمت آخر پیاده‌سازی الگوریتم MUSIC است که مانند آنچه در قسمت قبل گفته شد انجام داده می‌شود. در Matlab به سادگی داده‌های خروجی را بر روی نمودار مشاهده می‌کنیم ولی در زبان C این امر ممکن نیست. (در واقع در کاربرد های عملی ما نیاز داریم که الگوریتم یک عدد به عنوان زاویه سیگنال در خروجی به ما نمایش دهد). برای این که بتوانیم از این نمودار اطلاعات مورد نیاز را خارج کنیم یک روش ساده به کار برده شده است که فرم کلی الگوریتم آن به این صورت است:

از سمت چپ نمودار حرکت می‌کنیم (در واقع از اولین داده خروجی) به هر نقطه که رسیدیم مقدار آن را از مقدار نقطه بعد کم می‌کنیم. (به نوعی مشتق سمت راست) اگر حاصل منفی بود یعنی شیب منفی است در چنین شرایطی مقدار نقطه قبل را از نقطه مورد نظرمان کم می‌کنیم (مشتق سمت چپ) اگر این یکی مثبت بود یعنی یک ماکزیمم محلی را پیدا کرده‌ایم که میتواند زاویه مورد نظر باشد. در برخی شرایط نمودار دارای نویز و قله های محلی کوچک در دامنه‌های کم می‌باشد که ما باید آن از آنها صرف نظر کنیم به همین دلیل باید فقط نقاطی مورد بررسی قرار گیرد که مقدار آن‌ها حداقل ۳۰ درصد بیشتر از مینیمم داده‌ها باشد.

روشی که گفته شد دقت خوبی در جداسازی نقاط پیک نمودار دارا میباشد. از همین رو از آن برای تعیین مقدار خطا که نیاز به تکرار زیاد آزمایش دارد در برنامه Matlab نیز استفاده شده است.

در نهایت برای انجام آزمایش با سیگنال LTE الگوریتم به نوعی تغییر داده شده است که برای هر زیرحامل یک زاویه به خروجی منتقل کند در نهایت با میانگین گرفتن از این داده های خروجی زاویه تخمین زده شده به دست می‌آید.

در تمام شبیه‌سازی ها روش اصلی کار به همین منوال خواهد بود و تغییراتی در هر کدام از شبیه سازی ها بنا به نوع مسئله انجام میشود. برای پیاده سازی با زبان ++C از کامپایلر CLion و از مجموعه کتابخانه های Eigen استفاده شده است و روش انجام شبیه‌سازی مانند نرم افزار Matlab میباشد.

۳-۲- معیار اندازه گیری

برای ارزیابی نتایج نیاز به معیاری برای اندازه گیری دقت شبیه سازی ها می باشیم این معیار به صورت زیر تعریف

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\theta - \hat{\theta}_k)^2}$$

میشود:

رابطه ۴-۲

که در آن n تعداد دفعات اجرای برنامه و $\hat{\theta}_k$ زاویه تخمین زده شده و θ زاویه ورودی در شبیه سازی است. هر چقدر تعداد انجام آزمایش بیشتر باشد مقدار خطای به دست آمده به واقعیت نزدیک تر می باشد از همین رو در این پروژه هر کجا نیاز به محاسبه مقدار خطا بوده است آزمایش را 500 مرتبه اجرا کرده و مقدار RMSE را محاسبه می کنیم. برای جداسازی نقاط زاویه خروجی از همان روشی استفاده شده است که در قسمت قبل توضیح داده شده است و بر اساس مشتق چپ و راست هر نقطه از نمودار می باشد.

فصل ۳: شبیه‌سازی و نتایج

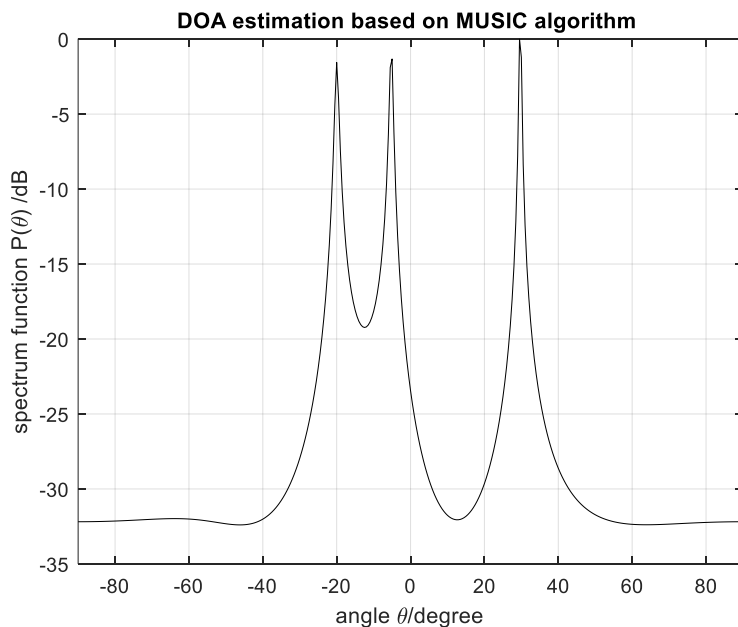
۳-۱- شبیه‌سازی اول: بررسی اثر تغییر پارامترها

شبیه‌سازی اولیه ساده ترین و البته مهمترین شبیه‌سازی انجام شده است که در آن سیگنال های باریک باند و بدون همبستگی و با زوایای مختلف را شبیه‌سازی می‌کنیم و در گیرنده دریافت کرده و الگوریتم را بر روی آنها پیاده می‌کنیم. در همین شبیه‌سازی اثر پارامتر های مختلف را بر نتایج مشاهده می‌کنیم و میزان دقت در هر حالت را مشاهده می‌کنیم.

در این شبیه سازی مشخصات پیش فرض به شرح زیر است:

- تعداد آنتن های آرایه (nE): ۶ عدد
- $SNR = 10dB$
- تعداد سیگنال های ورودی ۳ عدد
- تعداد نمونه ها (sample): ۲۰۰ عدد
- فاصله المان های آرایه آنتن: برابر نصف طول موج فرکانس 10 MHz که تقریباً برابر ۱۵ متر است.
- فرکانس نمونه برداری 20 MHz
- فرکانس سیگنال های غیر همبسته 10 MHz, 9.9 MHz, 10.1 MHz می‌باشد.
- زاویه ۳ سیگنال به ترتیب برابر است با: -5, 30, -20
- دقت اندازه گیری زاویه (گام تخمین زاویه برای ماتریس A شبیه سازی شده) برابر ۰.۵ درجه

ابتدا خروجی را برای حالت پیش فرض مشاهده می‌کنیم و با استفاده از معیار اندازه گیری که در قسمت قبل به آن اشاره کردیم با تکرار آزمایش به تعداد پانصد بار ($n = 500$) دقت اندازه گیری ها را می‌سنجیم.



نمودار ۱؛ تمام شرایط پیش فرض حفظ شده است.

$$RMES = \sqrt{\frac{1}{500} \times \sum_{k=1}^{500} |\theta - \theta_k|^2}$$

$$RMES_{-20^\circ} = 0.3398$$

$$RMES_{-05^\circ} = 0.2720$$

$$RMES_{30^\circ} = 0.4862$$

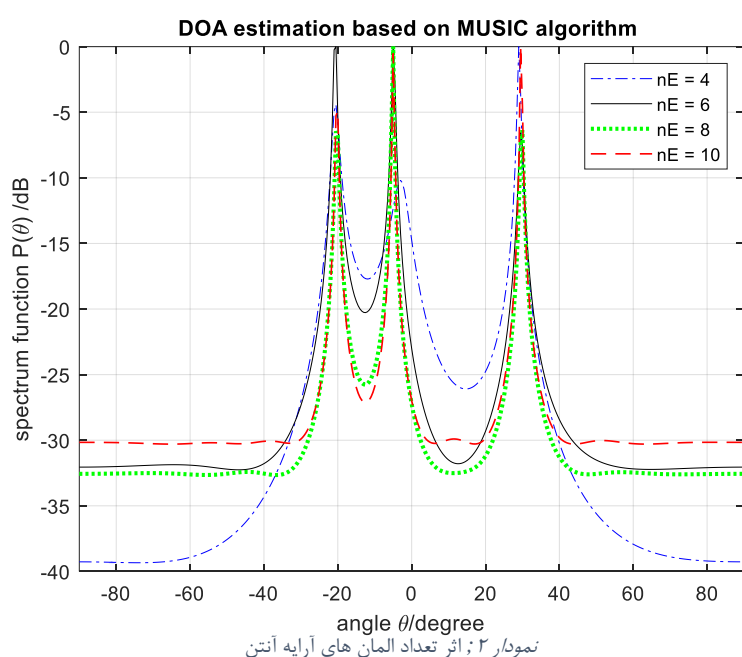
نکته ۱: از آنجایی که فاصله المان ها برابر نصف طول موج فرکانس ۱۰ مگاهرتز است دقت اندازه گیری برای فرکانس های غیر از ۱۰ مگاهرتز همواره دارای خطای بیشتری نسبت به سیگنال با فرکانس ۱۰ مگاهرتز می‌باشد.

۳-۱-۱- بررسی اثر تعداد المان های آرایه آنتن

برای بررسی اثر این پارامتر ۴ بار برنامه را برای تعداد آنتن {۴،۶،۸،۱۰} تکرار میکنیم سایر پارامتر هارا در حالت پیش فرض قرار می دهیم. جدول RMES برای هر زاویه در زیر آمده است.

جدول ۱؛ مقادیر RMES هر سه زاویه ورودی در ازای تعداد آنتن های متفاوت

nE	nE = 4	nE = 6	nE = 8	nE = 10
Degree				
(-20), Freq = 10.1MHz	1.1305	0.3398	0.2983	0.2570
(-5), Freq = 10.0MHz	1.2425	0.2720	0.0806	0.0024
(30), Freq = 9.9MHz	0.6415	0.4862	0.4005	0.3907



با توجه به نمودار و جدول بالا دقت اندازه گیری با افزایش تعداد المان ها افزایش خوبی پیدا میکند. به خصوص در سیگنال هایی که با زاویه نزدیک به هم به آنتن می رسند به عبارت دیگر رزولوشن اندازه گیری کیفیت بهتری پیدا میکند.

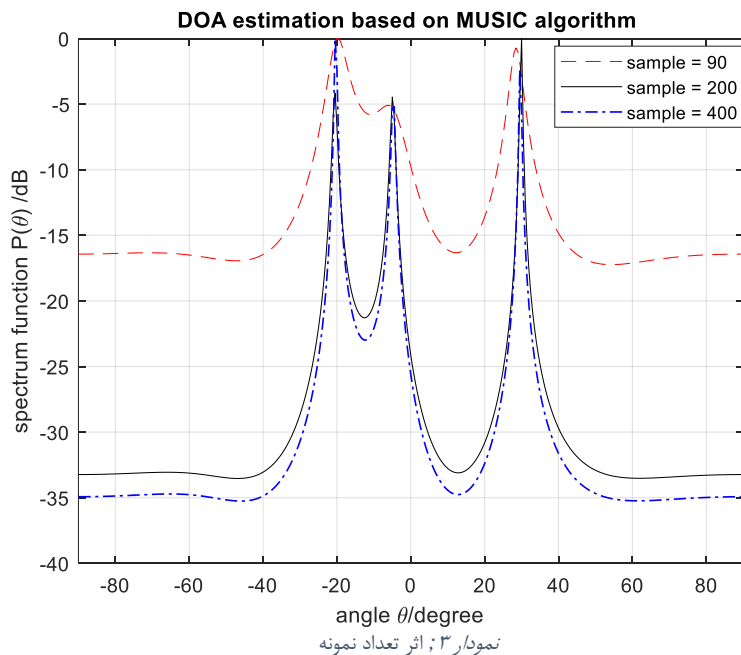
توجه : علت دقت بالا در سیگنالی که با زاویه 5- درجه به آنتن رسیده است به خاطر دلیلی است که در نکته ۱ عنوان شده است. و آن این است که این سیگنال فرکانس ۱۰ مگاهرتز دارد.

۳-۱-۲- بررسی اثر تعداد نمونه ها

در این بخش برنامه را ۳ بار اجرا می کنیم که تعداد نمونه ها برای هر کدام برابر {۹۰،۲۰۰،۴۰۰} میباشد. جدول RMES به فرم زیر می باشد.

جدول ۲؛ مقادیر RMES هر سه زاویه ورودی در ازای تعداد نمونه متفاوت

samlpe	90	200	400
Degree			
(-20), Freq = 10.1MHz	1.2130	0.3398	0.3368
(-5), Freq = 10.0MHz	6.1842	0.2720	0.1923
(30), Freq = 9.9MHz	0.7742	0.4862	0.4030



با افزایش تعداد نمونه ها یا به عبارتی زمان نمونه برداری بیشتر، خروجی کیفیت بهتری دارد. اما تعداد نمونه بیشتر محاسبات بیشتری نیاز دارد به همین جهت باید با توجه به سخت افزار و کیفیت خروجی تعداد نمونه ها را انتخاب کنیم.

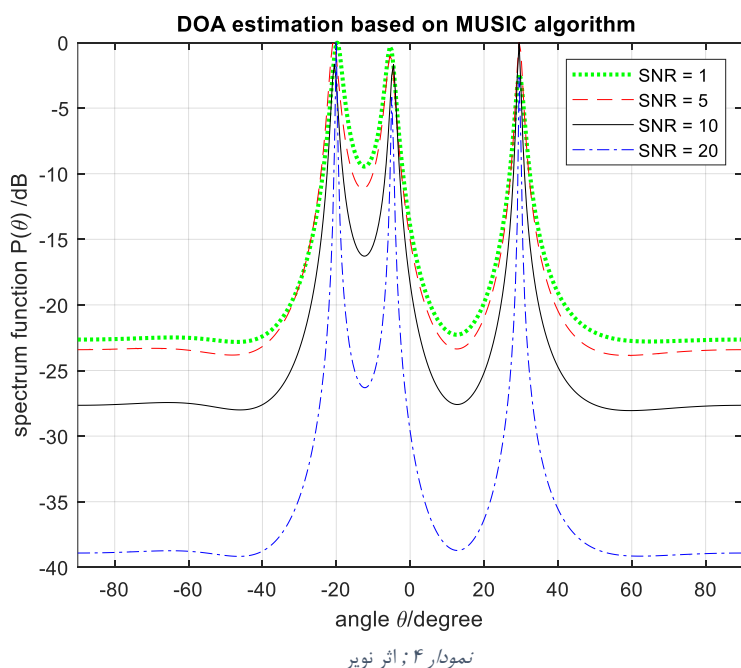
با کمی دقت در نمودار مشخص میشود با افزایش تعداد نمونه ها از ۲۰۰ به ۴۰۰ افزایش محسوسی در کیفیت خروجی ایجاد نشده است. پس افزایش تعداد نمونه فقط تا حد مشخصی امکان افزایش کیفیت خروجی را دارد.

۳-۱-۳- بررسی اثر نویز

برای بررسی اثر نویز، برنامه را با SNR های {۱،۵،۱۰،۲۰} اجرا و نتایج را مشاهده می کنیم.

جدول ۳: مقادیر RMES هر سه زاویه ورودی در ازای SNR متفاوت

SNR \ Degree	1	5	10	20
(-20), Freq = 10.1MHz	0.9680	0.5518	0.3398	0.2728
(-5), Freq = 10.0MHz	0.8182	0.4743	0.2720	0.0000
(30), Freq = 9.9MHz	0.6837	0.5009	0.4862	0.4847



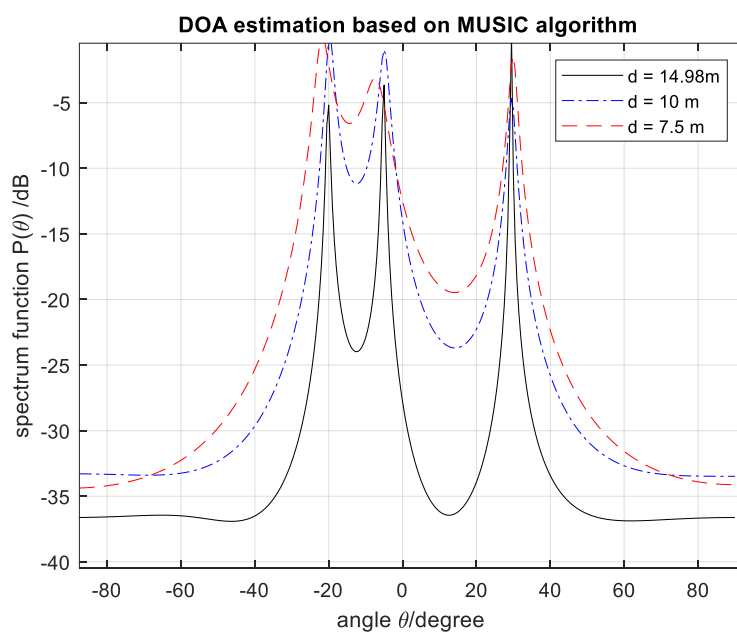
با توجه به نمودار و جدول بالا هر چقدر SNR بیشتر شود خروجی کیفیت بیشتری پیدا میکند. اما متأسفانه محدودیت های زیادی در افزایش توان سیگنال وجود دارد و میزان توان نویز از کنترل خارج است.

۳-۱-۴- بررسی اثر فاصله المان های آرایه آنتن

در فصل ۲ عنوان شد که فاصله المان های آرایه آنتن باید حتماً کمتر از نصف طول موج سیگنال باشد. در این قسمت با حفظ این شرط و با توجه به این که طول موج سیگنال ها تقریباً یکسان است و برابر ۳۰ متر است فاصله المان ها را برابر ۱۵ متر (مقدار پیش فرض) ۱۰ متر و ۷.۵ متر قرار می دهیم و نتایج را مشاهده می کنیم.

جدول ۴: مقادیر RMES هر سه زاویه ورودی در فواصل مختلف المان های آرایه آنتن

Element spacing Degree	7.5 m	10 m	14.96 m(default)
(-20) ,Freq =10.1MHz	4.9000	0.7099	0.3398
(-5) ,Freq = 10.0MHz	17.8887	0.7804	0.2720
(30) ,Freq = 9.9MHz	0.9297	0.4924	0.4862



نمودار ۵: اثر فاصله المان ها

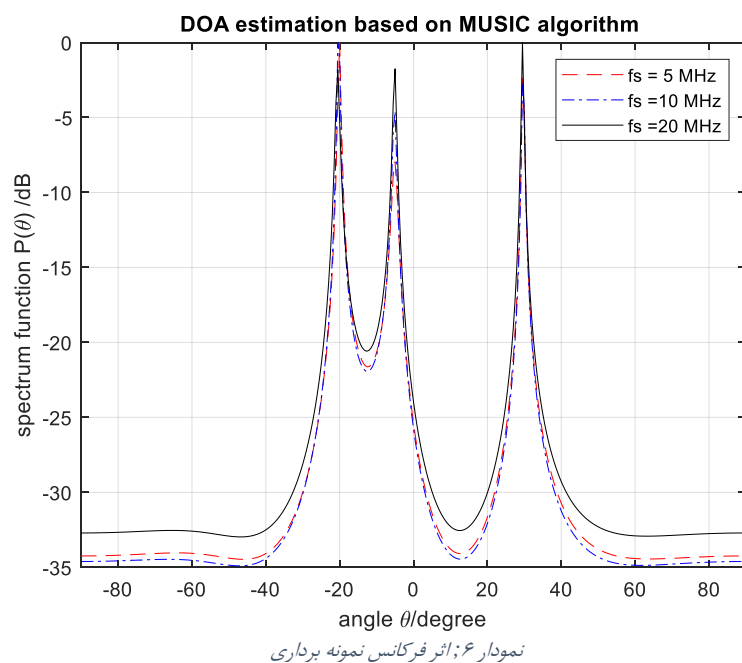
با توجه به نمودار و جدول فاصله المان ها تاثیر زیادی در دقت و به خصوص در رزولوشن خروجی دارد. معمولاً در بسیاری از کاربردهای واقعی از چند کانال با فرکانس های مختلف استفاده میشود که با توجه به این امر فاصله المان ها باید برابر نصف کوچکترین طول موج سیگنال ها باشد و این یعنی برای طول موج های بزرگ دقت اندازه گیری کمتر می شود. (در بخش شبیه سازی با فیلتر بانک این ویژگی نشان داده میشود)

۳-۱-۵- اثر فرکانس نمونه برداری

برنامه را برای فرکانس نمونه برداری ۲۰ مگاهرتز، ۱۰ مگاهرتز و ۵ مگاهرتز اجرا می کنیم و نتایج را مشاهده می کنیم.

جدول ۵: مقادیر RMES هر سه زاویه ورودی در ازای فرکانس نمونه برداری مختلف

Sampling freq. Degree	5 MHz	10 MHz	20 MHz
(-20) ,Freq =10.1MHz	0.3406	0.3395	0.3398
(-5) ,Freq = 10.0MHz	0.2704	0.2720	0.2720
(30) ,Freq = 9.9MHz	0.4890	0.4870	0.4862



ملاحظه میشود که فرکانس نمونه برداری اثری بر نتایج ندارد که نکته نسبتاً مهمی است. دلیل آن این است که الگوریتم MUSIC صرفاً با اختلاف فاز بین نمونه های هر آنتن عمل میکند. و اختلاف فازی که بین هر نمونه تا نمونه بعد دارد برای این الگوریتم اهمیتی ندارد.

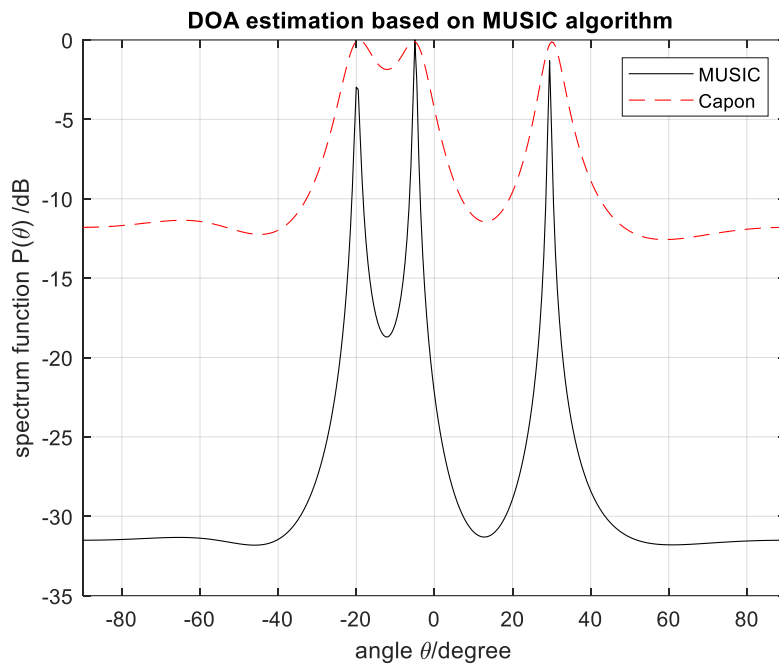
۳-۲- شبیه سازی دوم: پیاده سازی روش Capon

در این شبیه سازی با حفظ شرایط پیش فرض قسمت قبل از روش Capon برای تخمین زاویه استفاده میکنیم. در فصل ۲ در مورد تفاوت الگوریتم Capon و MUSIC صحبت شد در اینجا با حفظ شرایط پیش فرضی که در بخش قبل از آن ها یاد شد نتایج را ارزیابی می کنیم.

نتایج شبیه سازی به فرم زیر است:

جدول ۷؛ مقادیر RMES هر سه زاویه ورودی در هر روش

method \ Degree	Capon	MUSIC
(-20), Freq = 10.1MHz	0.4709	0.3398
(-5), Freq = 10.0MHz	0.4615	0.2720
(30), Freq = 9.9MHz	0.5213	0.4862



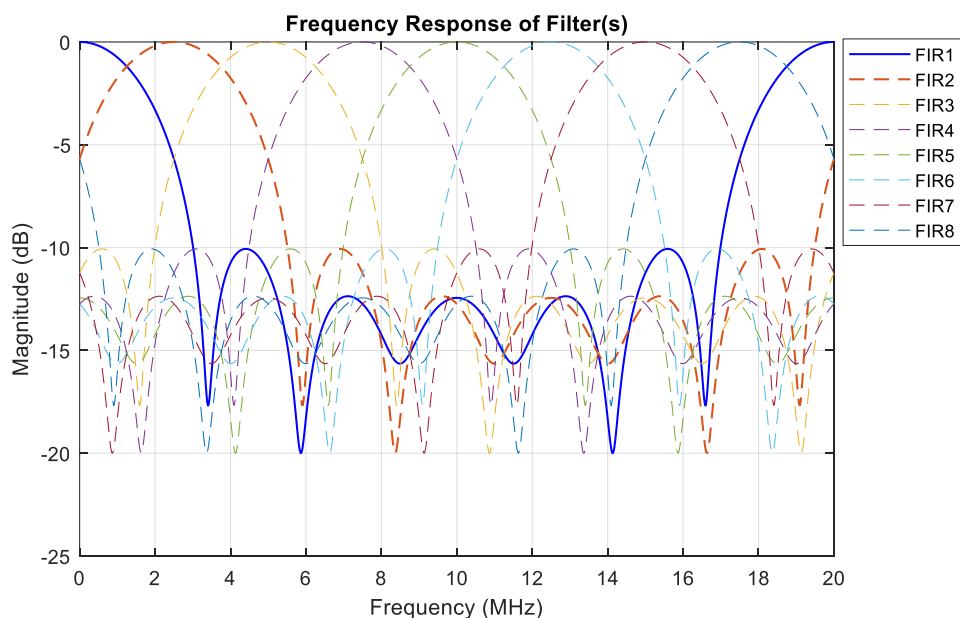
نمودار ۶؛ خروجی برنامه برای روش Capon و MUSIC

مشاهده می کنیم روش Capon دقت کمتری دارد مخصوصاً در شناسایی زاویه های نزدیک به هم در واقع می توان گفت رزولوشن الگوریتم MUSIC بیشتر از Capon است. از همین رو در برخی موارد از الگوریتم MUSIC به عنوان یک روش High resolution و یا حتی Super High resolution یاد شده است. این برتری MUSIC نسبت تعدادی دیگر از روش ها نیز وجود دارد.

۳-۳- شبیه‌سازی سوم: پیاده‌سازی الگوریتم برای چند کانال باریک باند با استفاده از فیلتربانک

در این شبیه‌سازی که برای پیاده‌سازی الگوریتم برای چند کانال باند باریک انجام شده است دو راه برای طراحی فیلتربانک وجود داشت یک این که با دستور `fdatool` یک فیلتر ساخته و از آن برای ساخت فیلتربانک استفاده کنیم و همچنین فیلتر را به برنامه C منتقل و در آنجا نیز از همین فیلتر استفاده کنیم. راه دوم این است که با تعیین ضرایب یک فیلتر FIR و تعیین جملات فیلتر به صورت دستی فیلتر را بسازیم و سپس برای فیلترهای مختلف فیلتربانک آن را به مقدار مشخصی شیفت دهیم. این کار طولانی تر است ولی در این پروژه از این روش استفاده شده است.

در این شبیه‌سازی سیگنال‌هایی را در باند های ۲.۵، ۵، ۷.۵، ۱۰، ۱۲.۵، ۱۵، ۱۷.۵ و ۲۰ مگاهرتز شبیه‌سازی می‌کنیم و اختلاف فاز ناشی از زاویه ورودی را برای هر المان شبیه‌سازی می‌کنیم. سپس سیگنال دریافتی هر آنتن را از تمام فیلترها عبور می‌دهیم در نتیجه هر آنتن ۸ سیگنال دارد که هر کدام برای یک باند مشخص استفاده می‌شوند. برای ساخت فیلتربانک یک فیلتر FIR با طول ۸ طراحی می‌کنیم و سپس همان فیلتر را با استفاده از شیفت فرکانسی برای کانال‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌دهیم. نمودار پاسخ فرکانسی فیلتربانک در پایین آمده است.



نمودار ۸: پاسخ فرکانسی فیلتر بانک

اطلاعات شبیه‌سازی به صورت زیر است.

- تعداد آنتن‌های آرایه (nE): ۱۰ عدد
- SNR = 10dB
- تعداد نمونه‌ها (sample): ۲۰۰ عدد
- فاصله المان‌های آرایه آنتن: برابر نصف طول موج فرکانس 20 MHz که تقریباً برابر ۷.۵ متر است.
- فرکانس نمونه برداری 20 MHz
- فرکانس سیگنال‌های غیر همبسته 10 MHz, 9.9 MHz, 10.1 MHz می‌باشد.
- زاویه ۳ سیگنال به ترتیب برابر است با: -5, 30, -20
- دقت اندازه‌گیری زاویه (گام تخمین زاویه برای ماتریس A شبیه‌سازی شده) برابر ۰.۱ درجه

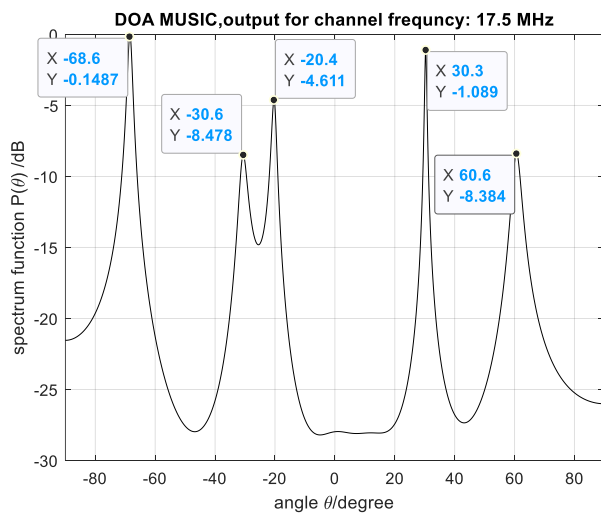
• فرکانس ها و زوایا در هر باند

- 2.5MHz, 2.6MHz با زوایای 20- و 60 درجه
- 5MHz, 5.1MHz با زوایای 20 و 60 درجه
- 7.5MHz, 7.4MHz, 7.6MHz با زوایای 20 و 60 و 40- درجه
- 10MHz, 10.1MHz, 9.9MHz با زوایای 20 و 60 و 40- درجه
- 12.5MHz, 12.4MHz, 12.6MHz با زوایای 20 و 60 و 40- درجه
- 15MHz با زاویه 20 درجه
- 17.5MHz, 17.6MHz, 17.4MHz, 17.7MHz, 17.3MHz با زوایای 30, 60, -30, -20, -70

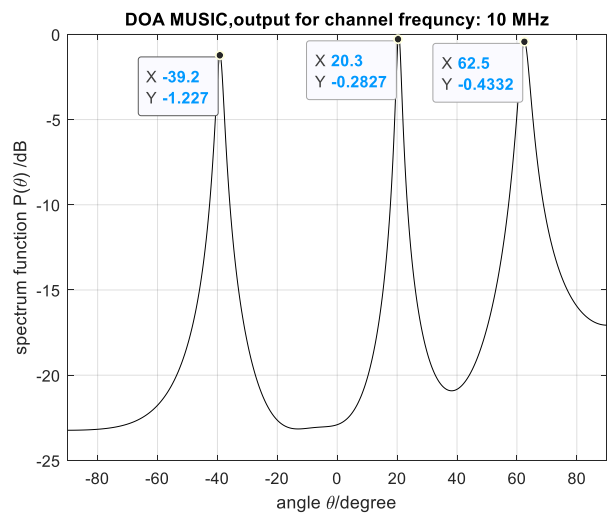
درجه

- 20MHz, 20.1MHz, 19.9MHz با زوایای 40, 30, -40 درجه

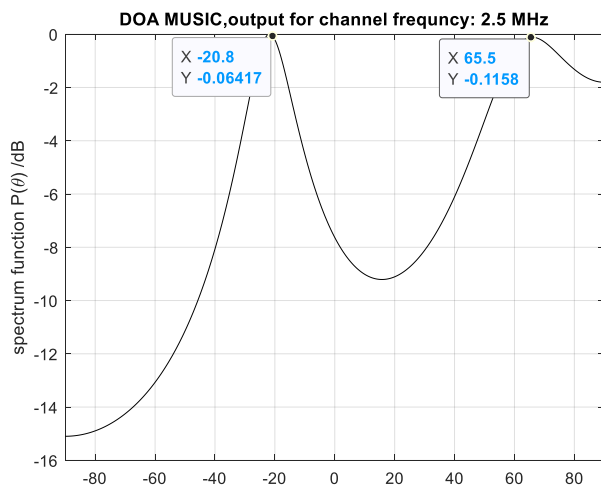
از آنجایی که این شبیه سازی صرفاً پیاده سازی فیلتر بانک است و شرایط شبیه سازی و الگوریتم مانند قسمت قبل است در اینجا نمودار خروجی برای باند های ۲.۵ و ۱۷.۵ و ۱۰ مگاهرتز نمایش داده می شود و از آوردن سایر نمودار ها به جهت نداشتن نکته مهمی خودداری میشود.



نمودار ۸؛ خروجی برنامه برای فیلتر ۷ ام در باند ۱۷.۵ MHz



نمودار ۹؛ خروجی برنامه برای فیلتر ۵ ام در باند ۱۰ MHz



نمودار ۱۰؛ خروجی برنامه برای فیلتر ۲ در باند ۲.۵ MHz

مشاهده میشود رزولوشن و کیفیت نمودار ها برای فرکانس های بالا تر مناسب تر است. و هرچه فرکانس کمتر شود رزولوشن و دقت پایین می آید. زیرا فاصله المان ها برابر نصف طول موج بزرگترین فرکانس یعنی ۲۰ مگاهرتز میباشد که با توجه به بخش (۴-۱-۳) که اثر فاصله المان ها را بررسی کردیم این امر دور از انتظار نبود.

۳-۴- شبیه سازی چهارم: پیاده سازی الگوریتم برای سیگنال های دارای همبستگی

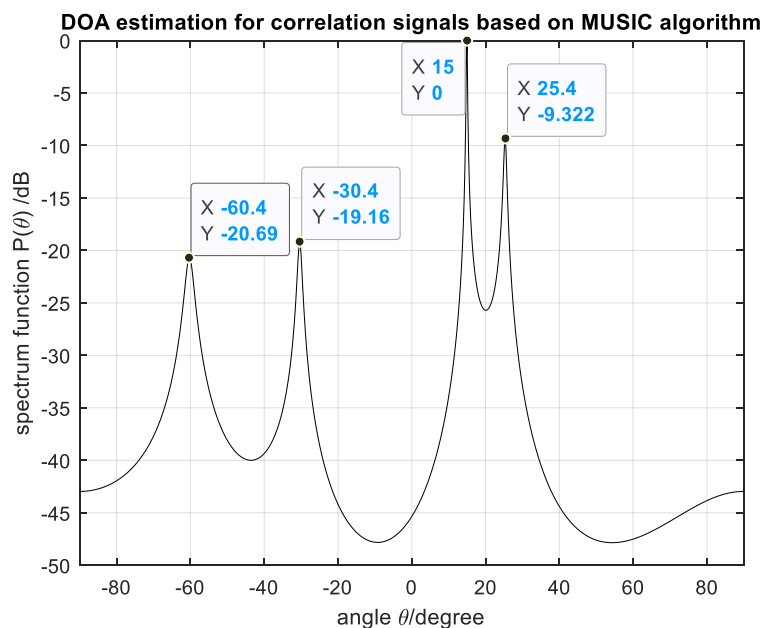
در بخش (۲-۱.۴) راه حلی برای شناسایی سیگنال های همبسته عنوان شد. در پایین راه حل عنوان شده را پیاده سازی می کنیم، شرایط شبیه سازی به فرم زیر است.

- تعداد آنتن های آرایه (nE): ۱۰ عدد که به ۲ زیر آرایه ۵ المانی تقسیم می شوند.
- $SNR = 12dB$
- تعداد سیگنال های ورودی ۴ عدد
- تعداد نمونه ها (sample): ۲۰۰ عدد
- فاصله المان های آرایه آنتن: برابر نصف طول موج فرکانس 10 MHz که تقریباً برابر ۱۵ متر است.
- فرکانس نمونه برداری 20 MHz
- فرکانس سیگنال ها: دو سیگنال با فرکانس 10MHz و دو سیگنال با فرکانس 10.1MHz
- زاویه ۴ سیگنال به ترتیب برابر است با: -60, -30 و 15, 25 درجه
- دقت اندازه گیری زاویه (گام تخمین زاویه برای ماتریس A شبیه سازی شده) برابر ۰.۲ درجه

نتایج شبیه سازی به صورت زیر است.

جدول ۸: مقادیر RMES برای شبیه سازی سیگنال های دارای همبستگی

Freq.	Degree	RMES
10MHz	-60	0.9704
	-30	0.5986
10.1MHz	15	0.3173
	25	0.3843



نمودار ۱۱: خروجی الگوریتم برای ۴ سیگنال که دو به دو همبسته می باشند

مشاهده می شود با این راه سیگنال ها به خوبی شناسایی شده اند البته باید به این نکته توجه داشت در اینجا اندازه (توان) هر دو سیگنال همبسته برابر است که کار تشخیص را کمی مشکل تر می کند و در حالت عملی همواره توان دو سیگنال همبسته متفاوت خواهد بود. (مسیر مستقیم توان بیشتری دارد).

بدیهی است که پارامتر های اثر گذار بر این شبیه سازی رفتاری مانند شبیه سازی یک داشته باشند لذا به جهت تکرار نشدن مطالب از بررسی تغییر پارامترها خودداری می شود.

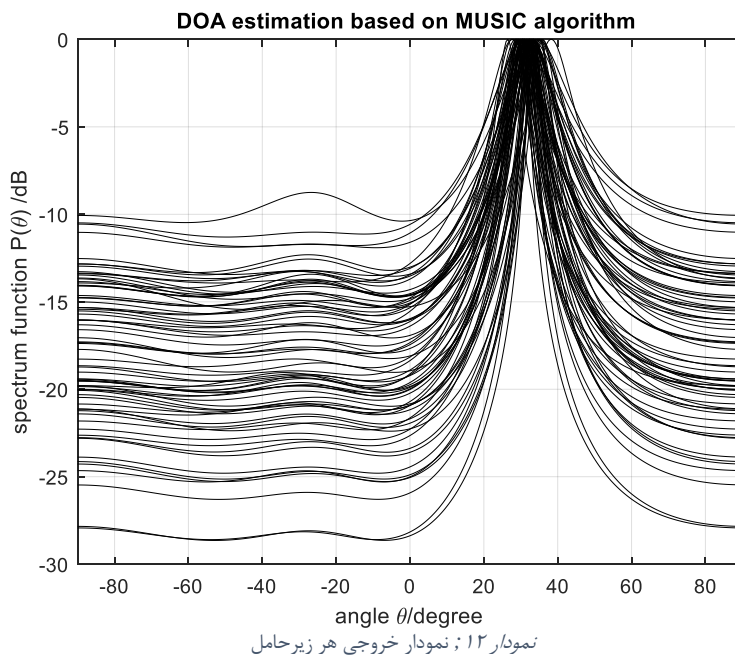
۵-۳- شبیه‌سازی چهارم: تست با سیگنال باند وسیع

در این قسمت با شبیه‌سازی یک سیگنال باند وسیع LTE که دارای ۷۲ زیرحامل است الگوریتم را مورد آزمایش قرار می‌دهیم. پس از جداسازی زیرحامل‌ها برای هر المان آنتن سیگنال هر زیرحامل را به عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته و پردازش‌ها را برای هر زیرحامل انجام می‌دهیم در نتیجه هر زیرحامل یک زاویه خروجی دارد که در پایین نمودار و هیستوگرام آن‌ها را مشاهده خواهیم نمود. دقت شود در این شبیه‌سازی به دلیل کمبود امکانات برای شبیه‌سازی اختلاف فاز برای یک سیگنال باند وسیع نتایج تا حدی خطای ناشی از شبیه‌سازی دارد. همچنین برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی در حالت واقعی در این سیستم نویز بسیار اغراق آمیز شبیه‌سازی شده (در واقع در کد شبیه‌سازی سیگنال LTE سیگنال نویز داری تولید می‌شود جدای از این نویز، ما به صورت دستی نیز به سیگنال قبل از جداسازی زیرحامل‌ها نویز اعمال می‌کنیم).

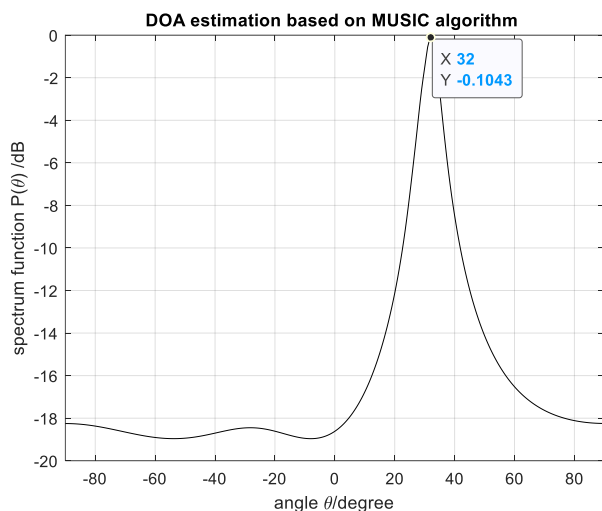
اطلاعات شبیه‌سازی:

- تعداد آنتن‌های گیرنده : ۳ عدد.
- فرکانس ساخت سیگنال: 1800MHz و برای هر زیرحامل با اختلاف 15KHz بیشتر است.
- SNR = 20dB (همچنان که در بالا گفته شد این نویز برای سخت تر کردن شرایط برای الگوریتم است).
- تعداد سیگنال‌ها برابر یک عدد است.
- زاویه ورودی برابر ۳۰ درجه است.
- فاصله المان‌ها برابر نصف طول موج بیشترین فرکانس است.
- تعداد نمونه‌ها برابر ۱۲ عدد (برای هر زیرحامل).
- دقت اندازه‌گیری ۰.۵ درجه.

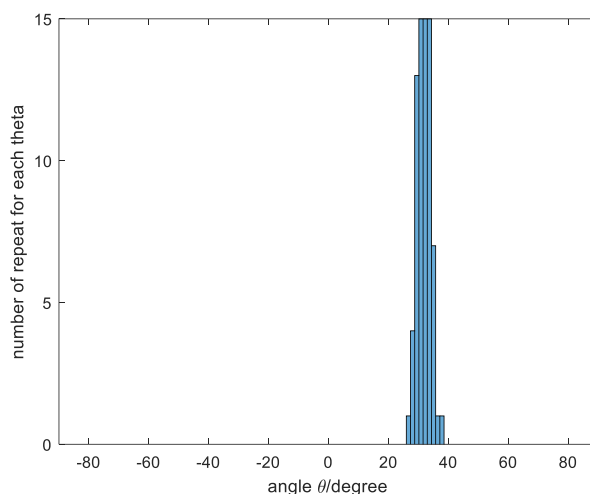
ابتدا نمودار خروجی برای همه زیرحامل‌ها را مشاهده می‌کنیم :



مشاهده می‌کنیم با وجود سخت کردن شرایط زاویه خروجی هر زیرحامل دقت لازم را دارا می‌باشد. و می‌توانیم تست آخر که مربوط به سیگنال واقعی است را مشاهده کنیم. در نمودار ۱۳ و ۱۴ به ترتیب هیستوگرام این زاویه‌ها و میانگین سیگنال خروجی را مشاهده می‌کنیم.



نمودار ۱۴؛ میانگین خروجی تمام زیرحامل ها



نمودار ۱۳؛ هیستوگرام زوایای خروجی هر زیرحامل

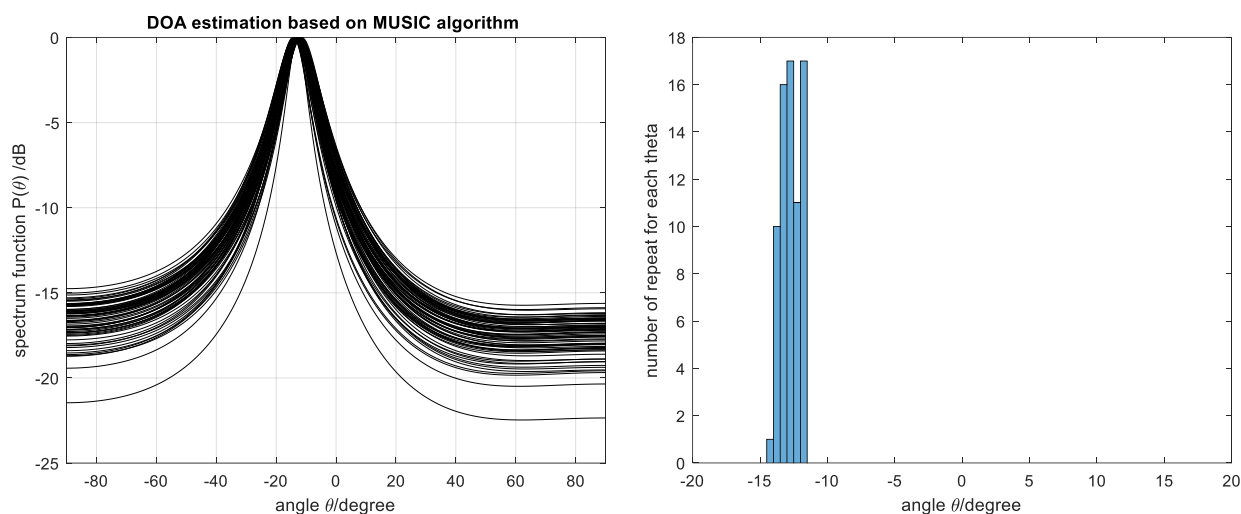
پس از رسم نمودار ها و بررسی شبیه سازی اطمینان از صحت آن می توانیم بخش پایانی کار را با نرم افزار Matlab انجام دهیم.

۳-۶- تست برنامه با سیگنال واقعی

در بخش پایانی یک سیگنال LTE واقعی با ۷۲ زیرحامل را مورد آزمایش قرار می دهیم. این سیگنال ابتدا در آنتن ها دریافت شده و زیرحامل ها نیز جداسازی شده اند. شرایط عملی این بخش و شرایط شبیه سازی به شرح زیر است:

- تعداد المان های آنتن: ۲ عدد
- فرکانس سیگنال: 1800MHz و برای هر زیر حامل با اختلاف 15KHz بیشتر است.
- تعداد سیگنال ها برابر یک عدد است.
- زاویه ورودی تقریباً برابر 15- درجه است.
- فاصله المان ها برابر ۷.۵ سانتی متر است.
- تعداد نمونه ها برابر ۱۲ عدد برای هر زیرحامل است.
- دقت اندازه گیری ۰.۵ درجه است.

هیستوگرام و نمودار خروجی همه زیرحامل ها به فرم زیر است:



نمودار ۱۶؛ نمودار خروجی هر زیرحامل

نمودار ۱۵؛ هیستوگرام زوایای خروجی هر زیرحامل

اگر به نمودار ۱۶ دقت کنیم مشاهده میشود شکل منظم تری نسبت به شبیه‌سازی قبلی دریافت کرده ایم که علت آن وجود نویز اضافی در شبیه‌سازی قبلی بود. همچنین زاویه خروجی با توجه به تعداد آنتن ها از دقت خوبی برخوردار است. علت این که هر زیرحامل زاویه متفاوتی به خروجی منتقل می‌کند به دقت سیستم و کیفیت سیگنال مربوط است هر چقدر دقت سیستم (نکاتی مانند تعداد آنتن‌ها فاصله المان ها و ...) بیشتر باشد. دقت اندازه‌گیری بیشتر خواهد بود و زاویه خروجی برای زیرحامل های مختلف به هم نزدیکتر بود.

۷-۳- پیاده‌سازی برخی از شبیه‌سازی های انجام شده در زبان ++C

هدف از شبیه‌سازی بر روی زبان C، انتقال برنامه به یک زبان سطح پایین تر است ۳ مورد از شبیه‌سازی های بالا را با زبان C پیاده کرده ایم که در اینجا پس از اعلام فرضیات نتایج برای هر کدام مشاهده خواهیم کرد.

۱-۷-۳- شبیه‌سازی اول: انجام شبیه‌سازی اول با شرایط پیش فرض

شبیه‌سازی که در بخش ۱-۳ انجام شده بود را برای زبان C باز نویسی میکنیم. و صحت نتایج را بررسی می‌کنیم. شرایط شبیه سازی همان شرایط پیشفرض در قسمت ۱-۳ می‌باشد. از جمله چالش های این بخش محاسبه ویژه بردار های ماتریس R_{xx} می‌باشد. کتاب خانه Eigen قابلیت محاسبه ویژه بردار و ویژه مقدار را دارا می‌باشد. همچنین محاسبات ریاضی دیگری مانند ضرب ماتریس ها و ... در این قسمت از این کتابخانه در موارد لزوم استفاده شده است.

```
"D:\all my lessons\FVRC101 C_Programming\untitled5\cmake-build-debug\untitled5.exe"
we have (3) doa.
[ 1 ] is "-20"
[ 2 ] is "-5"
[ 3 ] is "29.5"

Process finished with exit code 0
|
```

شکل ۱: خروجی برنامه که با توجه به داده های پیش فرض دریافت شده است.

چالش دوم در شبیه سازی در زبان C استخراج خروجی های مورد نظر و عدم استفاده از سایر اطلاعات بود که با استفاده از روشی که در پایان فصل ۲ (روش مبتنی بر مشتق چپ و راست) عنوان شده است این مشکل حل شد نتایج قابل قبولی در خروجی مشاهده شد.

۲-۷-۳- شبیه سازی دوم: پیاده سازی با فیلتر بانک

شرایط شبیه سازی مانند شبیه سازی فیلتر بانک در Matlab است فقط زوایای سیگنال ها در هر باند به فرم زیر است.

باند ۱۰ مگاهرتز	{40-,20-,20,60}
باند ۲.۵ مگاهرتز	30,30-,
باند ۵ مگاهرتز	40-,40,
باند ۷.۵ مگاهرتز	40-,20,60,
باند ۱۲.۵ مگاهرتز	45-,20,40,
باند ۱۵ مگاهرتز	20-,17,77,0,
باند ۱۷.۵ مگاهرتز	20-,70,60-,20,45,
باند ۲۰ مگاهرتز	;{35,0,70-,35,

در اینجا نیز فیلتر با استفاده از محاسبات مربوط به ضرایب فیلتر تولید شده است. برای استفاده نکردن زیاد از کتابخانه Eigen (چرا که ممکن است در یک پیاده سازی عملی چنین منبعی در دسترس نباشد) فیلتر را به حوضه زمان منتقل کرده و آنگاه اطلاعات را با هر کدام از فیلتر ها کانوالوشن می کنیم که نوشتن روشی برای کانوالوشن گرفتن نیز چالش زیادی به همراه داشت.

خروجی برنامه به شکل زیر است.

we have (4) doa in frequency : 20 MHz.

```
[ 1 ] is "-35"
[ 2 ] is "0"
[ 3 ] is "35.5"
[ 4 ] is "71.5"
```

we have (2) doa in frequency : 2.5 MHz.

[1] is "-31.5"

[2] is "33"

we have (2) doa in frequency : 5 MHz.

[1] is "-41"

[2] is "38"

we have (3) doa in frequency : 7.5 MHz.

[1] is "-38"

[2] is "21"

[3] is "62.5"

we have (4) doa in frequency : 10 MHz.

[1] is "-42"

[2] is "-20.5"

[3] is "20.5"

[4] is "58.5"

we have (3) doa in frequency : 12.5 MHz.

[1] is "-43.5"

[2] is "19.5"

[3] is "40.5"

we have (4) doa in frequency : 15 MHz.

[1] is "-20"

[2] is "0"

[3] is "17.5"

[4] is "77.5"

we have (5) doa in frequency : 17.5 MHz.

[1] is "-69"

[2] is "-20"

[3] is "19.5"

[4] is "45"

[5] is "58.5"

Process finished with exit code 0

۳-۷-۳- تست با سیگنال واقعی

در اینجا سیگنال واقعی را که در شبیه‌سازی ۳-۶ استفاده کردیم به عنوان ورودی در زبان C در نظر میگیریم. شرایط کاملاً همان شرایط بخش ۳-۶ میباشد. وارد کردن اطلاعات در زبان C به سادگی Matlab نیست برای این امر ابتدا داده های واقعی را با نرم افزار Matlab به صورت باینری و جدا کردن بخش موهومی و حقیقی ذخیره نموده ایم و در زبان C هر بخش موهومی و حقیقی را جدا جدا برداشته و به هم چسبانده ایم تا در نهایت با تغییر بخش پایانی برنامه زاویه هر زیرحامل را به دست آورده ایم. از جمله چالش ها پیش آمده پیچیده شدن بخش الگوریتم است چرا که در یک زبان سطح پایین گاهی برای ساخت یک ماتریس نیاز به نوشتن چند حلقه است که با اضافه شدن یک حلقه جدید برای هر زیرحامل پیچیدگی محاسبات کاملاً احساس می شود.

angel SC (1) is: we have [1] is "-13.5" ,

angel SC (2) is: we have [1] is "-13" ,

angel SC (3) is: we have [1] is "-13" ,

angel SC (4) is: we have [1] is "-13" ,

angel SC (5) is: we have [1] is "-12" ,

angel SC (6) is: we have [1] is "-13" ,
angel SC (7) is: we have [1] is "-12.5" ,
angel SC (8) is: we have [1] is "-12.5" ,
angel SC (9) is: we have [1] is "-13.5" ,
angel SC (10) is: we have [1] is "-12.5" ,
angel SC (11) is: we have [1] is "-12.5" ,
angel SC (12) is: we have [1] is "-13.5" ,
angel SC (13) is: we have [1] is "-13" ,
angel SC (14) is: we have [1] is "-12" ,
angel SC (15) is: we have [1] is "-13" ,
angel SC (16) is: we have [1] is "-13.5" ,
angel SC (17) is: we have [1] is "-12" ,
angel SC (18) is: we have [1] is "-13.5" ,
angel SC (19) is: we have [1] is "-13" ,
angel SC (20) is: we have [1] is "-12" ,
angel SC (21) is: we have [1] is "-12" ,
angel SC (22) is: we have [1] is "-12" ,
angel SC (23) is: we have [1] is "-12.5" ,
angel SC (24) is: we have [1] is "-12" ,
angel SC (25) is: we have [1] is "-14" ,

.

.

سایر داده ها با همین تقریب به خروجی منتقل شده است.

.

.

angel SC (69) is: we have [1] is "-13" ,
angel SC (70) is: we have [1] is "-12" ,
angel SC (71) is: we have [1] is "-13" ,
angel SC (72) is: we have [1] is "-12" ,

the average is degree is : ("-12.9583")

Process finished with exit code 0

فصل ۴: نتیجه گیری و پیشنهادات

الگوریتم MUSIC به عنوان یک روش تخمین زاویه با رزولوشن بالا شناخته می‌شود که می‌تواند در زمینه های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. یکی از کاربردهای آن در مخابرات بی‌سیم است که در فصل مقدمه با مزایای آن آشنا شدیم. اکنون می‌توانیم عوامل تاثیرگذار بر الگوریتم را برای این کاربرد بر شماریم. از جمله عوامل تاثیرگذار بر کیفیت و دقت تخمین زاویه نویز است که مانند هر سیستم مخابراتی دیگر (و حتی سیستم های غیر مخابراتی) بزرگترین مشکل را برای عملکرد سیستم به همراه دارد. هرچند این الگوریتم مقاومت خوبی نسبت به نویز دارد و در SNR های پایین هم زاویه ورودی را تا حد قابل قبولی به درستی تخمین می‌زند اما در پیاده‌سازی الگوریتم در این سیستم می‌توان با حذف نویز های خارج از باند و همچنین استفاده از تجهیزات با کیفیت و نویز پایین تا حدی به بهتر شدن SNR کمک کرد. متأسفانه در این کاربرد ها به دلیل محدودیت هایی از جمله محدودیت های زیست محیطی امکان افزایش توان ارسالی وجود ندارد.

از دیگر نقاط قابل توجه فاصله آنتن هاست. معمولاً در مخابرات بی‌سیم، عوامل مختلفی تعیین کننده طول آنتن است از جمله محدودیت ابعاد در برخی کاربردها. برای این الگوریتم نیاز است تا فاصله امان ها در بیشترین حد ممکن یعنی نصف کوچکترین طول موج تنظیم شود. افزایش تعداد آنتن ها از دیگر عواملی است که در دریافت نتیجه مطلوب کمک می‌کند ولی با افزایش تعداد آنتن هزینه ها نیز تا سطح بالایی افزایش می‌یابد و سخت افزار های بیشتر و قدرتمند تری نیاز می‌شود.

در نهایت با توجه به مورد مصرف می‌بایست در این عوامل مؤثر یک مصالحه صورت گیرد که یک طرف آن هزینه ها و قدرت سخت افزار قرار دارد و در سمت دیگر نیاز های ما از سیستم و قدرت برآورده کردن آنها وجود دارد.

از دیگر کاربردهای این الگوریتم در سیستم های راداری است که به جای اسکن بیم آنتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از راهای استفاده الگوریتم در رادار ها این است که پس از دریافت سیگنال برگشتی از هدف ابتدا فرکانس داپلر محاسبه شود و سپس در الگوریتم MUSIC از طول موج فرکانس ارسالی به علاوه یا منهای فرکانس داپلر استفاده شود تا دقت الگوریتم حفظ شود پس از آن می‌توان به عوامل تاثیر گذار بر کیفیت خروجی توجه داشت نکته مهم در این جا این است که معمولاً محدودیتی برای توان ارسالی وجود ندارد و می‌توان بسته به نوع هدف، قدرت سیگنال برگشتی از هدف را تا حد خوبی افزایش داد. (البته این عامل فقط یک فرضیه است و برای نشان دادن عدم وجود محدودیت در افزایش توان ارسالی است لیکن به دلیل طراحی های پیشرفته هدف های راداری این امر آنقدر هم میسر نیست). همچنین در رادار ها به دلیل اهمیت کار آنها تعداد آنتن ها می‌تواند بسیار زیاد باشد. از نظر فاصله امان ها نیز باید توجه شود که فاصله در بهترین شرایط ممکن می‌تواند نصف ماکزیمم فرکانس دریافتی باشد (معمولاً فرکانس دریافتی از هدف به دلیل وجود شیفت داپلر بیشتر از فرکانس ارسالی است).

۱. مطالعه، شبیه سازی و یا پیاده سازی سایر روش ها از جمله روش Robust Cyclic MUSIC که برای تخمین زاویه سیگنال ایستای دوره ای (چرخشی پایدار) در یک محیط با نویز ضربه ای ابداع شده است. این روش دقت بسیار بالایی دارد و به چند دسته مختلف تقسیم می شود که از مهم ترین آنها Robust Cyclic Correlation و یا FLOCC می باشد.
۲. پیاده سازی این الگوریتم بر روی FPGA برای کاربرد های عملی در زمینه های متنوعی نظیر مهندسی پزشکی و یا مخابرات بی سیم در فناوری MIMO.
۳. مطالعه یا شبیه سازی روش های تخمین زاویه برای سیگنال های باند وسیع بر پایه FFT در واقع روش music یک روش نسبتاً گران قیمت به شمار می آید. یکی از روش های مبتنی بر FFT روش (MST(manifold separation technique) میباشد که قادر است تخمین زاویه را در حالت دوبعدی انجام دهد.

منابع

- [1] . Petre Stoica and Randolph Moses, "SPECTRAL ANALYSIS OF SIGNALS".2005
- [2] MahmoudMohanna, Mohamed L.Rabeh, Emad M.Zieur, SherifHekala," Optimization of MUSIC algorithm for angle of arrival estimation in wireless communications", 2013. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, June 2013, Pages 116-124
- [3] . Dr.Joseph Nkurunziza¹, Elijah Mwangi, Dominic B.O.Konditi.." An Investigation of Direction of Arrival Estimation Scheme for Correlated Signals in Wireless Communication Systems." 2017. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 22 (2017) pp. 12332-12341
- [4] Li Cheng, Yang Li , Lianying Zou and Yong Qin," DOA Estimation for Highly Correlated and Coherent Multipath Signals with Ultralow SNRs",2019. International Journal of Antennas and Propagation Volume 2019, Article ID 2837315
- [5] Sen Li, Xiaojing Chen, and Rongxi He." Robust Cyclic MUSIC Algorithm for Finding Directions in Impulsive Noise Environment". 2017. International Journal of Antennas and Propagation Volume 2017, Article ID 9038341