

ارائه یک روش کاربردی جهت کالیبراسیون آنتن‌های آرایه فازی

زهرا حبیبی^۱، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مرتضی کازرونی^۲، استادیار، سیدحسین محسنی ارمکی^۳، استادیار، عماد حمیدی^۴، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - zahra_habibi560@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - kazerooni@iust.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - mohseni@ee.iust.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - emadhamidi@iran.ir

چکیده: امروزه آنتن‌های آرایه فازی از جدیدترین، پرکاربردترین و پیشرفته‌ترین نوع آنتن‌ها به‌خصوص در صنایع نظامی محسوب می‌شوند. در این مقاله یک روش عملی و ساده جهت اجرای فرآیند کالیبراسیون اولیه فاز برای یک آنتن آرایه فازی صفحه‌ای به ابعاد 21×21 (۴۴۱ تک آنتن) که در آن از تغییردهنده‌های فاز فریتی استفاده گردیده، ارائه شده است. در این روش فرض بر این است که تغییردهنده‌های فاز فرتی علی‌رغم این که از یک خانواده انتخاب می‌شوند، هر یک برای نخستین بار هنگام تعبیه در مدار آنتن، دارای فازهای اولیه داخلی مستقل و تصادفی هستند، که در این صورت جهت عملکرد صحیح سیستم لازم است در ابتدا این فازها نسبت به هم هماهنگی پیدا کرده یا به‌نوعی سامانه از نظر فاز کالیبره گردد و سپس مورد بهره‌برداری قرار گیرد. نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان می‌دهد روش کالیبراسیون فاز پیشنهادی توانسته است الگوی تشعشعی آنتن را که به علت عدم هماهنگی فاز اولیه تغییردهنده‌های فاز، از الگوی تشعشعی ایده‌آل فاصله گرفته است به‌طور میانگین به میزان ۳ دسی‌بل در راستای سمت^۱ و $2/4$ دسی‌بل در راستای ارتفاع^۲ به الگوی تشعشعی ایده‌آل نزدیک سازد.

واژه‌های کلیدی: آنتن آرایه فازی - تغییردهنده فاز فریتی - کالیبراسیون فاز.

Offering a Practical Method for the Calibration of Phased Array Antennas

Z. Habibi, MSc¹, M. Kazerooni, Associate Professor², S.H. Mohseni Armaki, Assistant Professor³, E. Hmidi, Assistant Professor⁴

1- Faculty of Electrical Engineering, University of Maleke Ashtar, MUT, Tehran, Iran, Email: zahra_habibi560@yahoo.com

2- Faculty of Electrical Engineering, University of Maleke Ashtar, MUT, Tehran, Iran, Email: kazerooni@iust.ac.ir

3- Faculty of Electrical Engineering, University of Maleke Ashtar, MUT, Tehran, Iran, Email: mohseni@ee.iust.ac.ir

4- Faculty of Electrical Engineering, University of Maleke Ashtar, MUT, Tehran, Iran, Email: emadhamidi@iran.ir

Abstract: Nowadays the phased array antennas are considered of the newest and most advanced military and industrial antennas. This paper presents a simple and practical method for the calibration process for the first phase of a planar phased array antenna with dimensions 21×21 (441 single-antenna) in which the ferrite phase shifters were used. This method assumed that the ferrite phase shifters are selected from the same family and when embedded in antenna circuit, they have independent and random interior initial phase. In the case for the correct operation it is necessary in the first, these phases find coordination towards to each other or the system is calibrated in terms of phase, and then exploited. The simulation results show that the proposed phase calibration procedures able to make closing of radiation antenna due to lack of coordination initial phase of phase shifters and approaches to ideal radiation pattern for the average 3dB in the azimuth direction and 2.4dB in the elevation planes.

Keywords: Phased array antenna, ferrite phase shifter, phases calibration.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۰۳

نام و نام خانوادگی نویسنده مسئول: مرتضی کازرونی
نشانی نویسنده مسئول: تهران دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۱- مقدمه

استفاده روزافزون آنتن‌های آرایه فازی به‌عنوان پیشرفته‌ترین نوع آنتن‌ها به‌خصوص در صنایع نظامی را می‌توان در مزایایی نظیر هدایت الکترونیکی پرتو و قابلیت انجام همزمان چندین عملکرد در یک محیط عملیاتی دانست.

یک آنتن آرایه فازی متشکل از آرایه‌ای از آنتن‌های تک است که این تک آنتن‌ها به‌صورت جداگانه و یا در دسته‌های چندتایی (زیر آرایه) تغذیه می‌شوند. هدایت پرتو در یک آنتن آرایه فازی با یکی از سه روش: (۱) تأخیر زمانی؛ (۲) تغییر فرکانس؛ (۳) تغییر فاز انجام می‌گردد [۱، ۲].

در روش سوم، فاز عناصر آرایه (تک آنتن‌ها) به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که پرتو در جهت موردنظر متمرکز و در جهات دیگر تضعیف گردد [۲]. بدین منظور در این روش متعاقب هر یک از عناصر آرایه تغییردهنده فازی قرار دارد تا از طریق آن فاز موردنیاز جهت هدایت پرتو در راستایی خاص فراهم گردد.

در یک آنتن آرایه فازی با فرض عدم تغییر دامنه عناصر آرایه، تا زمانی که بین فاز عناصر آرایه هماهنگی صحیح برقرار باشد، الگوی تشعشی آنتن مطلوب خواهد بود. اما آنجا که ممکن است در عمل وجود عواملی نظیر فاز اولیه تغییردهنده‌های فاز و دیگر عوامل مانع برقراری هماهنگی فازها شود؛ انجام فرآیندی به نام کالیبراسیون اولیه فاز، که در نتیجه آن هماهنگی اولیه فاز بین عناصر آرایه برقرار می‌شود، چه پس از ساخت، در کارخانه و چه بعد از به کار گرفتن آن در محیط عملیاتی ضروری خواهد بود. از این رو فرآیند کالیبراسیون را می‌توان به دو دسته: (۱) کالیبراسیون در کارخانه تولید؛ (۲) کالیبراسیون در محیط عملیاتی، تقسیم نمود. نکته‌ای که می‌توان در اینجا به آن اشاره نمود آن است که روش کالیبراسیون فاز مطرح‌شده در این مقاله می‌تواند برای هر دو نوع کالیبراسیون اشاره‌شده استفاده گردد.

کالیبراسیون اولیه آنتن‌های آرایه فازی در کارخانه، نوعاً یک‌بار در طول فرآیند ساخت انجام می‌شود. این کار اغلب با اسکن میدان نزدیک و یا میدان دور انجام می‌شود که زمان زیادی را نیز صرف خود می‌کند. برای نمونه جهت کالیبره نمودن یک آنتن صفحه‌ای در رنج میدان نزدیک، از یک پروب جهت اندازه‌گیری دقیق دامنه و فاز هر یک از عناصر آرایه استفاده می‌شود. پس از اندازه‌گیری و ثبت دامنه و فازهای عناصر آرایه به‌وسیله پروب در رنج میدان نزدیک برای هر دو مدار ارسال و دریافت، این نتایج با مقادیر مطلوب طراحی شده آن مقایسه می‌شوند. در صورتی که تفاوت غیرقابل قبولی بین این اندازه‌گیری‌ها مشاهده شود، با استفاده از سیگنال‌های کنترلی ارسال شده به تغییردهنده‌های فاز یا تضعیف‌کننده‌ها و یا هر دوی آن‌ها، تغییر فاز و دامنه موردنیاز برای دستیابی به عملکرد بهینه اعمال می‌شود [۳].

پس‌ازاینکه کالیبراسیون اولیه آنتن در کارخانه انجام شد، می‌توان از آرایه در محیط عملیاتی استفاده نمود. عملکرد آنتن‌های آرایه فازی در طول زمان بر اثر تغییر مشخصات قطعات فعال و یا خراب شدن آن‌ها

کاهش یافته و در نتیجه سیستم برای دستیابی به بهترین عملکرد به جایگزینی عناصر تخریب‌شده و کالیبراسیون مجدد آرایه در محیط عملیاتی نیازمند خواهد شد.

روش‌های مختلفی برای کالیبراسیون آنتن‌های آرایه فازی در محیط عملیاتی پیشنهاد شده‌اند که شامل مواردی چون تزویج متقابل و نمونه‌برداری RF [۴-۶]، اندازه‌گیری میدان نزدیک (استفاده از آنتن‌های خارجی) در [۳] و [۷]، تعبیه شبکه‌ای در داخل آرایه می‌شوند [۸]، و با استفاده از عناصر داخلی [۹]. در روش‌های فوق پس از اندازه‌گیری و ثبت دامنه و فازهای عناصر آرایه برای هر دو مدار ارسال و دریافت، این نتایج با مقادیر مطلوب طراحی شده آن مقایسه می‌شوند. در صورتی که تفاوت غیرقابل قبولی بین این اندازه‌گیری‌ها مشاهده شود، با استفاده از سیگنال‌های کنترلی ارسال شده به تغییردهنده‌های فاز یا تضعیف‌کننده‌ها و یا هر دوی آن‌ها، تغییر فاز و دامنه موردنیاز برای دستیابی به عملکرد بهینه اعمال می‌شود.

در تمامی روش‌های پیشنهادی بالا پس از اندازه‌گیری دامنه و فاز عناصر آرایه جهت انجام فرآیند کالیبراسیون به هر یک از تغییردهنده‌های فاز سیگنال کنترلی مربوط به همان عنصر اعمال می‌گردد. اما برای آرایه پیشنهادی در این مقاله که عناصر آرایه در هر سطر از یک درایور که مربوط به آن سطر است و عناصر آرایه در هر ستون از یک درایور که مربوط به آن ستون است سیگنال کنترلی را دریافت می‌کنند، باید سیگنال کنترلی نه برای هر عنصر بلکه برای هر سطر و ستون به‌گونه‌ای محاسبه نمود که کالیبراسیون به شکل مطلوبی نتیجه دهد. روش پیشنهادی در این مقاله می‌تواند روشی مطلوبی جهت کالیبراسیون فاز آنتن آرایه فازی سادس پیشنهادی باشد. با این روش الگوی تشعشی آنتن که به علت عدم هماهنگی فاز اولیه تغییردهنده‌های فاز، از الگوی تشعشی ایده‌آل فاصله گرفته است به‌طور میانگین به میزان ۳ دسی‌بل در راستای سمت ۱ و ۲/۴ دسی‌بل در راستای ارتفاع^۲ به الگوی تشعشی ایده‌آل نزدیک شده است.

۲- معرفی آنتن آرایه فازی پیشنهادی

امروزه با پیشرفت فناوری، روش‌های جدیدی جهت کاهش هزینه ساخت آنتن‌های آرایه فازی در سامانه‌های راداری ابداع شده است. یکی از این روش‌ها که در این مقاله جهت شبیه‌سازی آنتن پیشنهادی از آن استفاده شده است منجر به ساخت یک نمونه آنتن آرایه فازی صفحه‌ای کم‌هزینه می‌شود. از جمله ویژگی‌های اصلی سامانه‌ای که از این روش استفاده می‌کند عبارت‌اند از [۱۰]:

۱. حداقل نمودن تعداد واحدهای راه‌انداز تغییردهنده‌های فاز؛
۲. سادگی ساختار آرایه؛
۳. حداقل نمودن اندازه و پیچیدگی سامانه کنترل؛
۴. سادگی در طراحی مدار تغذیه.

البته قابل ذکر است که موارد ذکر شده در بالا در مقابل از دست دادن عملکرد ایده‌آل یک آنتن آرایه فازی حاصل می‌شود. باین وجود

محوری اعمال شده موج پلاریزه شده دایروی را در میله فریتی می چرخاند، که این عمل بسته به مقدار دامنه و جهت میدان بایاس مغناطیسی، تغییر فاز مورد نظر را اعمال می کند. بعد از عبور از فریت موج پلاریزه شده دایروی تغییر فاز یافته به وسیله دیگر پلاریزه کننده دایروی (هم نوع پلاریزه کننده قبلی) دارای پلاریزه خطی می شود. در مود دریافت نیز سیگنال دریافتی از هدف بعد از ورود به تغییردهنده فاز با یک پلاریزه کننده دایروی دارای پلاریزاسیون دایروی و قبل از خروج از تغییردهنده فاز مجدداً با پلاریزه کننده دایروی دیگر پلاریزاسیون آن خطی می گردد. قابل ذکر است که اگر پلاریزه کننده های مود ارسال راست گرد باشند، این پلاریزه کننده ها در مود دریافت چپ گرد عمل می کنند [۱۰].

جهت سادگی ساختار چیدمان تغییردهنده های فاز آنتن پیشنهادی فرض بر این است که تغییردهنده های فاز استفاده شده در هر ستون تا آنجا که ممکن است از یک خانواده باشند. یعنی نوع ماده فریتی و منحنی هیستریزس استفاده شده در آن ها بسیار به هم شبیه و نزدیک باشد تا فاز اولیه آن ها تقریباً برابر باشد. شکل (۱) این مطلب را با تعیین یک حرف برای هر یک از ستون ها نشان داده است. برای مثال در این مقاله اختلاف فاز اولیه تغییردهنده های فاز هر ستون نسبت به هم حداکثر $\pm 10^\circ$ فرض می گردد. همچنین در این آرایه سعی بر این است که تغییردهنده های فاز استفاده شده در یک ستون نسبت به ستون های دیگر نیز تا آنجا که ممکن است از یک نوع ماده فریتی باشند. برای مثال در این مقاله اختلاف فاز ستون ها نسبت به هم حداکثر $\pm 25^\circ$ در نظر گرفته شده است.

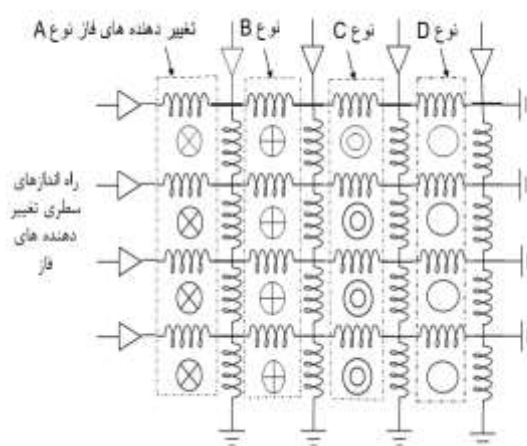
طبق موارد بیان شده می توان نتیجه گرفت که ساختار آنتن پیشنهادی با تعداد N سطر و M ستون می تواند عمده تاً به این دلیل ساده و کم هزینه باشد که به جای نیاز به MN راه انداز که هر یک جهت اعمال فرمان تغییر فاز به یک عنصر تشعشی استفاده می شوند؛ از M + N راه انداز استفاده می شود. چراکه در این آرایه تمام عناصر روی یک سطر از یک راه انداز فرمان فاز سطر و تمام عناصر روی یک ستون نیز از یک راه انداز فرمان فاز ستون را دریافت می کنند. بنابراین می توان گفت در هر زمان برای جاروب پرتو در یک جهت جدید، فقط لازم است M + N فرمان فازی محاسبه گردد و بالاخره تنها واسطه الکتریکی یک سیم است که به طور سری مستقیماً به سیم پیچ های سطر و ستون تغییردهنده فاز متصل شده است. برای نمونه، آنتن پیشنهادی در این مقاله با تعداد ۲۱ سطر و ۲۱ ستون به جای نیاز به ۴۴۱ مدار راه انداز به ۴۲ راه انداز نیاز دارد که خود باعث ساده شدن ساختار مهندسی آنتن می گردد.

۳- فرمان های راه اندازها در آرایه آنتن پیشنهادی

به طور کلی میدان الکتریکی آنتن آرایه فازی در نقطه ای واقع در میدان دور، دربرگیرنده دو قسمت فاکتور آرایه $E_a(\theta, \varphi)$ و الگوی تشعشی یک عنصر از آرایه $E_e(\theta, \varphi)$ است [۱۱].

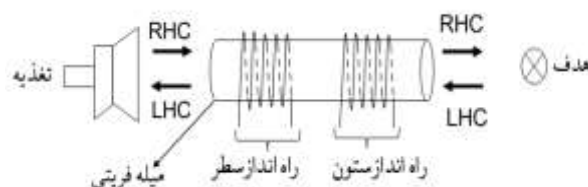
در مواردی که دستیابی به عملکرد ایده آل و بهینه نیاز نباشد، این ساختار به سبب سادگی می تواند بسیار مفید واقع گردد. در این مقاله فرض ما این است که عناصر آرایه در یک ساختار مربعی و با فاصله ۳۸ از هم در هر دو جهت، چیده شده اند. شکل (۱) چیدمان فازی آنتن پیشنهادی در این مقاله را نشان می دهد.

راه اندازهای ستونی تغییر دهنده های فاز



شکل ۱: ساختار تحریک فاز آنتن آرایه فازی پیشنهادی

با توجه به شکل ۱ ساختار فازی آنتن پیشنهادی به این ترتیب است که هر یک از تغییردهنده های فاز فریتی به کاررفته دارای دو سیم پیچ است. یکی از دو سیم پیچ مربوط به سطر و سیم پیچ دیگر مربوط به ستون است. برای تغییردهنده های واقع در هر سطر سیم پیچ های مربوط به سطر به هم سری شده و از راه انداز فاز آن سطر فرمان می گیرند. همچنین برای تغییردهنده های واقع در هر ستون نیز سیم پیچ های مربوط به ستون به هم سری شده و از راه انداز فاز آن ستون فرمان می گیرند. این روند برای همه سطرها و ستون ها دنبال می شود؛ به طوری که هر سطر و ستون راه انداز فاز مربوط به خود را دارد. شکل ۲ نحوه قرار گرفتن سیم پیچ ها روی قطعه فریتی یک تغییردهنده فاز را در آنتن پیشنهادی نشان می دهد.



شکل ۲: ساختار تغییردهنده فاز در آنتن آرایه فازی پیشنهادی.

قابل ذکر است که جهت ساده تر شدن ساختار فازی آنتن پیشنهادی، تغییردهنده های فاز از نوع دو مودی یک طرفه^۲ در نظر گرفته شده اند. طبق این ساختار در مود ارسال سیگنال دریافتی از تغذیه با پلاریزاسیون خطی وارد موجبری که در شکل نشان داده نشده گشته و سپس با یک پلاریزه کننده دایروی (راست گرد RHC یا چپ گرد LHC) دارای پلاریزاسیون دایروی می شود. سیم پیچ های راه انداز سطر و ستون جهت اعمال یک میدان مغناطیسی محوری در اطراف میله فریتی مرکزی پیچیده شده است. میدان مغناطیسی

$$\varphi_{nm} = (n-1)kd_x \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + (m-1)kd_y \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \quad (3)$$

از رابطه (۳) نیز چنین نتیجه می‌شود که در آرایه آنتن پیشنهادی به‌منظور تابش پرتو در جهت خاص (θ_0, φ_0) لازم است که به راه‌انداز هر یک از سطرها فرمان زیر داده شود:

$$\varphi_n = (n-1)kd_x \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \quad (4)$$

و به راه‌انداز هر یک از ستون‌ها نیز فرمان زیر اعمال گردد:

$$\varphi_m = (m-1)kd_y \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \quad (5)$$

مقادیر φ_n و φ_m به ترتیب متناسب با جریان راه‌اندازهای سطر و ستون مطابق با شکل ۱ است.

۳- شبیه‌سازی الگوریتم کالیبراسیون اولیه فاز برای نمونه آنتن پیشنهادی

به‌منظور شبیه‌سازی الگوریتم کالیبراسیون اولیه فاز برای آنتن آرایه فازی پیشنهادی ابتدا باید فرضیاتی را در نظر گرفت. که در بخش بعد به آن‌ها اشاره شده است.

۳-۱- فرضیات لازم

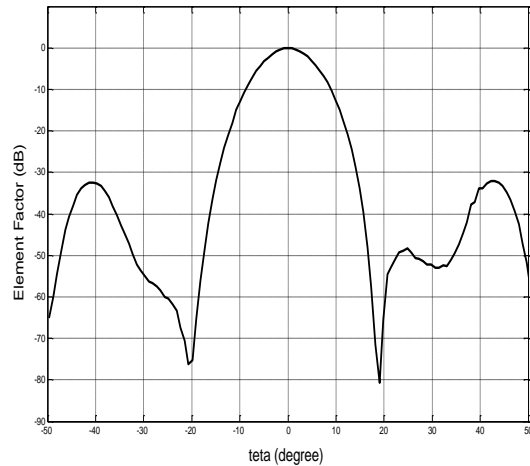
در فرآیند کالیبراسیون، آرایه نسبت به محور عمود^۵ بر آنتن کالیبره می‌گردد. به عبارتی برای آرایه‌ای سالم با فرض این‌که تغییردهنده‌های فاز آن دارای فاز اولیه صفر یا یکسان باشند با دادن مقدار صفر به راه‌انداز هر سطر و ستون باید پرتو در جهت عمود تابیده شود. اما از آنجاکه همواره تغییردهنده‌های فاز دارای فاز اولیه غیر صفر و نابرابر هستند، دیگر نمی‌توان نتیجه گرفت که با اعمال فرمان‌های صفر به راه‌انداز همه سطرها و ستون‌ها، پرتو در جهت عمود تابیده شود. زیرا زمانی پرتو در جهت عمود هدایت می‌گردد که تغییردهنده‌های فاز عناصر آنتن نسبت به هم اختلاف‌فاز صفر درجه داشته باشند. پس چنین آرایه‌ای به فرآیند کالیبراسیون فاز نیاز خواهد داشت.

در ادامه با وجود فرضیات زیر به شبیه‌سازی الگوریتم کالیبراسیون فاز برای نمونه آنتن آرایه فازی پیشنهادی پرداخته شده است:

۱. تمام تغییردهنده‌های فاز سالم هستند؛
۲. تغییردهنده‌های فاز در هر ستون از یک نوع بوده و دارای فاز اولیه‌ای تصادفی با محدوده تغییرات $\pm 10^\circ$ درجه می‌باشند، و فاز اولیه تغییردهنده‌های فاز هر ستون نسبت به ستون‌های دیگر نیز دارای محدوده تغییرات $\pm 25^\circ$ درجه است؛
۳. قبل از فرآیند کالیبراسیون، فاز اولیه تمام تغییردهنده‌های فاز به‌وسیله تحلیلگر شبکه^۶ اندازه‌گیری شده و در جدولی ثبت گردیده است.

$$E(\theta, \varphi) = E_e(\theta, \varphi)E_a(\theta, \varphi) \quad (1)$$

برحسب نوع و توان قابل تحمل آرایه، عناصر آن می‌تواند انواع مختلف ساختارها را داشته باشد، با توجه به اینکه هدف ما در این مقاله آن است که عنصر تشعشعی دارای الگوی تشعشعی متقارن و پهنای پرتو یکسان در صفحه‌های E و H باشد، از ساختار دی‌الکتریک برای عنصر تشعشعی استفاده شده است. شکل ۳ الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده برای یک عنصر تشعشعی از آنتن آرایه فازی پیشنهادی را با ساختار دی‌الکتریک نشان می‌دهد.



شکل ۳: الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده برای یک عنصر از آنتن آرایه فازی پیشنهادی.

همچنین در رابطه (۱)، $E_a(\theta, \varphi)$ یا فاکتور آرایه برای یک آنتن آرایه فازی صفحه‌ای به ابعاد $M \times N$ از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$E(\theta_0, \varphi_0) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a(n, m) \cdot e^{j(n-1)kd_x(\sin \theta \cos \varphi - \sin \theta_0 \cos \varphi_0)} \cdot e^{jm(m-1)kd_y(\sin \theta \sin \varphi - \sin \theta_0 \sin \varphi_0)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $a(n, m)$ دامنه عناصر آرایه را نشان می‌دهد که در این مقاله یکنواخت و برابر ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین در رابطه (۲)، d_x ، فاصله بین عناصر در طول محور X و d_y فاصله بین عناصر در طول محور Y است. در این مقاله $d_x = d_y = 3\lambda$ در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که این مقدار فاصله بین عناصر باعث ایجاد چند گلبرگ اصلی در فاکتور آرایه می‌گردد. ولی با توجه به اینکه الگوی تشعشعی عنصر تشعشعی دارای پهنای پرتو محدودی در حدود 15° است. اثر گلبرگ‌های اصلی اضافی ناخواسته حذف می‌گردد.

از رابطه (۲) می‌توان دریافت، در یک آنتن آرایه صفحه‌ای به ابعاد $M \times N$ مقدار فازی که باید به هر یک از عناصر آرایه با مختصات مکانی (n, m) اعمال گردد برحسب رادیان برابر مقدار زیر خواهد بود [۹] و [۱۱]:

$$\varphi_n = \frac{\sum_{i=1}^{21} (\varphi(n,i) - \varphi(11,i))}{21} \quad (۶)$$

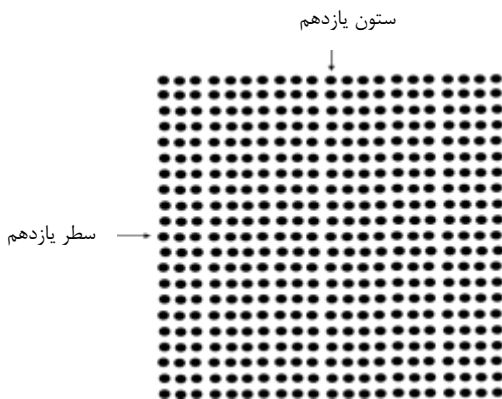
در رابطه (۶) اندیس n شماره سطر و اندیس i شماره ستون هر یک از عناصر این سطر را نشان می‌دهند. قابل ذکر است که در رابطه (۶)، $\varphi(n,i)$ و $\varphi(11,i)$ از جدول فاز اولیه جایگذاری می‌شوند. با توجه به رابطه (۶) مشخص است که در این روش کالیبراسیون فاز عناصر هر یک از سطرهاى آرایه مطابق شکل ۴ نسبت به عناصر سطر وسط آرایه یعنی سطر یازدهم کالیبره می‌شوند.

در ادامه رابطه (۷) نیز فرمان‌ها را اندازه‌ها را نشان می‌دهد.

$$\varphi_m = \frac{\sum_{j=1}^{21} (\varphi(j,m) - \varphi(j,11))}{21} \quad (۷)$$

در رابطه (۷) اندیس m شماره ستون و اندیس j شماره سطر هر یک از عناصر این ستون را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که در رابطه (۷) نیز، $\varphi(j,11)$ و $\varphi(j,m)$ از جدول فاز اولیه جایگذاری می‌شوند. رابطه (۷) نیز نشان می‌دهد که عناصر هر یک از ستون‌های آرایه مطابق شکل ۴ نسبت به عناصر ستون وسط آرایه یعنی ستون یازدهم کالیبره می‌شوند.

پس از اعمال فرمان‌ها فاز به دست آمده از روابط (۶) و (۷) به راه‌اندازهای سطر و ستون آرایه، الگوی تشعشعی به دست آمده حاصل از اعمال این فرمان‌ها تا حد قابل قبولی به الگوی تشعشعی ایده‌آل نزدیک می‌گردد. این الگوی تشعشعی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. جدول ۱ نیز میزان نزدیک شدن الگوی تشعشعی را پس از کالیبراسیون فاز به الگوی تشعشعی ایده‌آل در دو جهت سمت و ارتفاع را در ده مرتبه اجرای فرآیند کالیبراسیون نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده بیانگر این است که روش کالیبراسیون مطرح شده توانسته است الگوی تشعشعی ناشی از فاز اولیه عناصر آرایه را به طور میانگین به میزان $3/2$ دسی‌بل در جهت سمت و $2/8$ دسی‌بل در جهت ارتفاع به الگوی تشعشعی ایده‌آل نزدیک سازد.



شکل ۴: چیدمان آرایه در آنتن آرایه فازی صفحه‌ای پیشنهادی.

۲-۳- شبیه‌سازی الگوریتم کالیبراسیون فاز

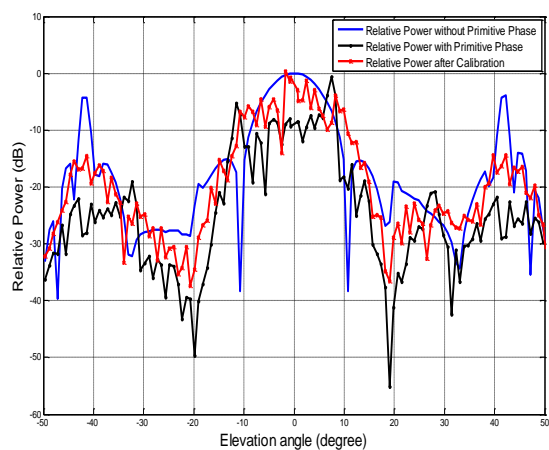
در این بخش با آوردن یک مثال، الگوریتم کالیبراسیون فاز پیشنهادی دنبال شده است.

مثال: فرض می‌کنیم برای آنتن پیشنهادی به ابعاد 21×21 ، فاز اولیه تغییردهنده‌های فاز با استفاده از تحلیلگر شبکه به دست آمده و در جدولی ثبت شده باشند. پس از در دست داشتن جدول فاز اولیه، الگوریتم کالیبراسیون فاز به ترتیب در مراحل زیر دنبال می‌شود:

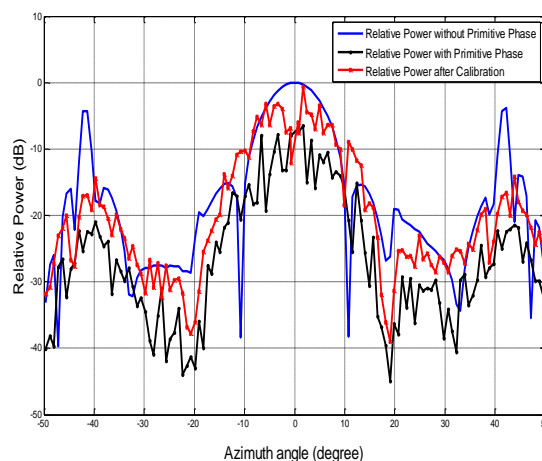
۱. ابتدا جهت مقایسه الگوی تشعشعی حاصل از کالیبراسیون با الگوی تشعشعی ایده‌آل، به شبیه‌سازی الگوی تشعشعی ایده‌آل پرداخته شده است. در آنتن آرایه فازی ایده‌آل به ازای اعمال فرمان فاز صفر درجه به همه درایورها باید پرتو در جهت عمود بر صفحه تابیده شود. به عبارت دیگر در آنتن آرایه فازی ایده‌آل باید فاز اولیه تغییردهنده‌های فاز صفر درجه باشد تا به ازای اعمال فرمان فاز صفر درجه به آن‌ها پرتو در جهت عمود بر صفحه تابیده شود. در این مقاله ابتدا فاز اولیه تمام عناصر آرایه صفر درجه در نظر گرفته شده و با اعمال فرمان صفر به تمام راه‌اندازهای سطر و ستون، الگوی تشعشعی ایده‌آل در جهت عمود به صفحه با شبیه‌سازی به دست می‌آید. در شکل ۵ این الگوی تشعشعی ایده‌آل مشخص شده است. قابل ذکر است این الگوی تشعشعی و الگوی تشعشعی در مراحل بعد از ضرب فاکتور آرایه در الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده برای یک عنصر از آرایه که در شکل ۳ نشان داده شد، به دست آمده است.

۲. سپس فاز اولیه ثبت شده در جدول را برای تغییردهنده‌های فاز لحاظ کرده و با اعمال فرمان صفر به تمام راه‌اندازها الگوی تشعشعی جدید حاصل شده است. در این مرحله از آنجاکه فازهای اولیه مقادیری غیر صفر دارند، دیگر با اعمال فرمان صفر به راه‌اندازها، الگوی تشعشعی در جهت عمود نخواهد بود، بلکه از الگوی مرحله یک دور می‌گردد. این الگوی تشعشعی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳. در این مرحله جهت تصحیح الگوی تشعشعی حاصل از مرحله (۲) به فرآیند کالیبراسیون فاز پرداخته شده است. فرآیند کالیبراسیون فاز در واقع فرمان‌هایی را برای اعمال تغییر فاز به راه‌اندازها می‌دهد که به ازای این فرمان‌ها الگوی تشعشعی تا جایی که ممکن است در جهت عمود تابیده می‌شود. به عبارت دیگر با اعمال فرآیند کالیبراسیون فاز تمام عناصر آرایه تا آنجا که ممکن است نسبت به هم اختلاف فاز صفر درجه پیدا می‌کنند. در نتیجه انتظار می‌رود پس از کالیبراسیون، الگوی تشعشعی با وجود فاز اولیه تا حد قابل قبولی به الگوی تشعشعی حاصل از مرحله (۱) نزدیک گردد. در این مرحله فرمان‌های فاز اعمال شده به راه‌اندازهای سطرها و ستون‌های آرایه جهت کالیبراسیون فاز از روابط زیر به دست می‌آیند. رابطه (۶) فرمان‌های راه‌انداز سطرهای آرایه را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۵: الگوی تشعشی برای یک نمونه آنتن آرایه فازی پیشنهادی به ابعاد 21×21 قبل و بعد از اعمال الگوریتم کالیبراسیون فاز؛ (الف) در جهت سمت؛ (ب) در جهت ارتفاع.

جدول ۱: میزان بهبود الگوی تشعشی در دو جهت سمت و ارتفاع پس از شبیه‌سازی الگوریتم کالیبراسیون فاز.

در جهت سمت	میزان نزدیک شدن به الگوی تشعشی ایده‌آل به دسی‌بل طی اجرای ده بار شبیه‌سازی									میانگین نزدیک شدن به الگوی تشعشع ایده‌آل	
	۳/۷۲	۲/۲۹	۲/۸۶	۳/۶۸	۳/۶۸	۴/۰۰	۲/۴۹	۳/۰۲	۳/۵۵		۲/۸۴
در جهت ارتفاع	۵/۲۷	۳/۴۹	۱/۹۵	۲/۷۷	۰/۷۶	۳/۸۱	۱/۹۶	۲/۱۷	۴/۲۱	۲/۱۱	۲/۸ dB

مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ص.

۱۰۳-۹۶، ۲۲ آبان ماه ۱۳۸۰.

- [4] Y. Neidman, R. Shavit, and A. Bronshtein, "Diagnostic of phased arrays with faulty elements using the mutual coupling method", IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, pp. 1-6, 2008.
- [5] C. Shibly, and D. Woods, "Mutual coupling-based calibration of phased array antennas", IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, pp 529-532, 1996.
- [6] H. Aumann, "Phased array antenna calibration and pattern prediction using mutual coupling measurements", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 37, no. 7, pp. 844-850, 1989.
- [7] M. Sarcione, "The design, development and testing of the THAAD solid state phased array", IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, pp.260-265, 1996.
- [8] J. M. Cormack, T. Cooper and R. Farrell, "A multi-path algorithmic approach to phased array calibration" The Second European Conference on Antennas and Propagation, pp. 16-17, 2007.
- [9] A. Agrawal and A. Jablon, "A calibration technique for active phased array antennas", IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, pp. 223-228, 2003.
- [10] D. Larry and E. Corey, "A survey of russian low cost phased array technology", IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, pp.255-259, 1996.
- [11] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, Boston/London, 2005.

زیر نویس‌ها

- ¹ Azimuth
- ² Elevation
- ³ Non- reciprocal dual-mode
- ⁴ Array Factor
- ⁵ Broadside
- ⁶ Network Vector Analyzer

۴- نتیجه

در این مقاله یک روش عملی و ساده جهت اجرای فرآیند کالیبراسیون اولیه فاز برای یک آنتن آرایه فازی صفحه‌ای به ابعاد 21×21 (۴۴۱ تک آنتن) که در آن از تغییردهنده‌های فاز فریتی استفاده گردیده، ارائه شده است. در این روش فرض بر این است که تغییردهنده‌های فاز فریتی علی‌رغم اینکه از یک خانواده انتخاب می‌شوند، هر یک برای نخستین بار هنگام تعبیه در مدار آنتن، دارای فازهای اولیه داخلی مستقل و تصادفی باشند، که در این صورت جهت عملکرد صحیح سیستم لازم است در ابتدا این فازها نسبت به هم هماهنگی پیدا کرده یا به نوعی سامانه از نظر فاز کالیبره گردد. نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان می‌دهد روش کالیبراسیون فاز پیشنهادی توانسته است الگوی تشعشی آنتن را که به علت عدم هماهنگی فاز اولیه تغییردهنده‌های فاز، از الگوی تشعشی ایده‌آل فاصله گرفته است به‌طور میانگین به میزان ۳ دسی‌بل در راستای سمت $2/4$ دسی‌بل در راستای ارتفاع به الگوی تشعشی ایده‌آل نزدیک سازد.

مراجع

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, Third Edition, McGraw-Hill, 2001.
 - [2] D. Parker, and D. C. Zimmermann, "Phased array-part I: Theory and architectures", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.50, no.3, 2002.
- [۳] محسنی ارمکی، سیدحسین. "تنظیم آنتن‌های آرایه فازی با استفاده از سیستم‌های میدان نزدیک"، نخستین همایش رادارهای آرایه فازی،