

شکل دهی چند منظوره پرتو آنتن آرایه‌ای ماهواره LEO با هدف چرخش پرتو، هدایت نقاط صفر و ایجاد پوشش با شکل دلخواه

رضا نادری جهرمی^۱، سید محمد جواد رضوی^۲، سید حسین محسنی ارمکی^۳

۱ کارشناس ارشد برق رادیوالکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، reza_naderi@irib.ir

۲ استادیار مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

۳ استادیار مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۹

چکیده

در این مقاله الگوریتم شکل دهی پرتو برای دست یابی همزمان به سه قابلیت شکل دهی ناحیه پوشش، چرخش پرتو و هدایت نقاط صفر در آنتن آرایه فازی ماهواره LEO ارائه می‌شود. شکل دهی ناحیه پوشش برای منطبق کردن آن با مرزهای جغرافیایی کشور ایران صورت می‌گیرد. هدایت پرتو متناسب با موقعیت لحظه‌ای ماهواره، به گونه‌ای انجام می‌گیرد که منطقه پوشش حین عبور ماهواره از فراز کشور ثابت بماند. زاویه قرارگیری نقاط صفر الگوی تشعشعی با عمق بالا طوری تعیین می‌شود که موجب حذف گیرنده‌های شنود واقع در خارج محدوده پوشش شوند. الگوریتم ارائه شده مبتنی بر روش حداقل میانگین مربعات وزن دار (WLMS) بوده که طی آن وزن‌های بهینه دامنه و فاز برای تحریک عناصر آنتن آرایه‌ای بدست می‌آیند. نتایج شبیه سازی برای یک آرایه مسطح مستطیلی 10×10 با عناصر همه جهتی نشان دهنده توانایی الگوریتم ارائه شده در ایجاد پوششی با شکل دلخواه، چرخش پرتو با زاویه پوشش $40^\circ \leq \theta \leq -40^\circ$ و $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ با حفظ پوشش روی منطقه هدف و حذف موثر گیرنده‌های شنود را دارد.

کلید واژه

ماهواره LEO، چرخش پرتو، شکل دهی پرتو، هدایت نقاط صفر، آنتن آرایه‌ای

مقدم

فاکتور آرایه^۵ انجام شده است. لذا در تمام باندهای فرکانسی قابل اجرا می‌باشد.

از جمله روش‌هایی که در زمینه سنتز آرایه و دستیابی به شکل کانتور دلخواه بکارگرفته شده است روش Woodward-Lawson اصلاح شده^۶ [۳] است که روشی توانمند در رسیدن به پرتوهای با شکل پیچیده است. همچنین کارهایی با استفاده از روش‌های مبتنی بر نمونه برداری از توزیع تیلور دایروی [۴،۵،۶] انجام شده است.

از بین الگوریتم‌های متداول در زمینه سنتز آرایه و شکل دهی پرتو می‌توان به الگوریتم سرچ گرادیان^۷ [۷،۸] الگوریتم تطبیق مزدوج^۸ [۹] و الگوریتم‌های تابش متوالی^۹ [۱۰،۱۱] و الگوریتم ژنتیک [۱۲،۱۳] اشاره کرد. الگوریتم سرچ گرادیان تابع هدف را از طریق

امروزه شکل‌دهی پرتو آنتن یکی از ملزومات نسل جدید ماهواره‌ها می‌باشد و باعث افزایش قابلیت‌های ماهواره می‌شود. مطالعات فراوانی در زمینه شکل‌دهی پرتو ماهواره و برای اهداف گوناگونی از جمله ایجاد ناحیه پوشش با شکل غیر منظم^۱، هدایت پرتو^۲ در جهت موردنظر، حذف سیگنال‌های ناخواسته و ایجاد سیستم‌های چندپرتویی^۳ انجام شده است. در [۱] برای سنتز الگوی تشعشعی یک آنتن آرایه‌ای مسطح روشی مطرح شده که از خلاصه‌سازی سری فوریه متناسب با میدان تشعشعی مطلوب و نوعی بهینه‌سازی [۲] استفاده می‌گردد و همچون روش مطرح شده در این مقاله عناصر آرایه همه جهتی^۴ در نظر گرفته شده‌اند و کار، بر روی

5 array factor
6 modified Woodward-Lawson
7 gradient search algorithm
8 conjugate match algorithm
9 successive projection algorithm

1 Irregular shape coverage
2 Beamsteering
3 Multibeam
4 Isotropic

در این مقاله عدد بهتری است و علت آن، وجود چندین نقطه جمر در اطراف ناحیه پوشش، و پهنای پرتو وسیع تر (برای پوشش منطقه ای وسیع تر) نسبت به آن مقاله است.

در [۱۴] یک آنتن آرایه ای 120×120 با فواصل 1.6925λ بین عناصر آن برای یک ماهواره GEO استفاده شده تا ضمن پوشش ناحیه ای به مساحت 500 km^2 بتواند نقاط نال در جهت جمر تولید کند که در آن، در صورت وجود یک نقطه نال، عمق آن 70 dB و با سه نقطه نال، عمق آن ها حدود 58 dB بدست می آید. اما در مقاله پیش رو با لحاظ 5 نقطه نال، نیز به عمق نال بهتری و معادل 60 dB تا 80 dB دست می یابیم. این در حالی است که ما با قید های محدود کننده بیشتری در ساخت پرتو رو به رو هستیم که شامل شکل دهی به کانتور پوشش بر روی زمین و محاسبه متوالی زاویه های چرخش برای نقاط صفر و پرتو اصلی متناسب با حرکت ماهواره است.

در [۱۴] که بر اساس روش وقفی سرچ گرایان و تقریبی^{۱۴} می باشد به چند دقیقه زمان برای به روز کردن وزن ها نیاز دارد. در صورتی که در این مقاله زمان مورد نیاز برای بدست آوردن دامنه و فاز عناصر با کامپیوتری با مشخصات پردازشگر Core(TM)i5 CPU @ 2.53GHz Intel(R) M540 و رم 3 GB ، 30 ثانیه می باشد. طبیعتاً با بکارگیری پردازشگرهای قوب تر این زمان کاهش می یابد. البته با توجه به مشخص بودن نقاط گذر برای یک ماهواره LEO در صورت تغییر موقعیت گیرنده های شنود یا تغییر منطقه پوشش این محاسبات می تواند به صورت آفلاین، مثلاً در فاصله غروب تا طلوع بعدی ماهواره انجام گیرد.

در این مقاله الگوریتم ماتریس تابش برای سنتز پرتو مطلوب در آنتن آرایه ای مسطح مستطیلی استفاده می شود. این روش در حوزه پردازش سیگنال و دیگر شاخه های مهندسی به کار می رود و برای به دست آوردن بهترین جواب در سیستمی که دارای معادلات خطی است استفاده می شود. استفاده از این روش برای سنتز آرایه می تواند باعث مشکل ناپایداری یا عدم همگرایی شود که باید در روند حل مسئله از آن ها جلوگیری شود. لذا در تعریف فضای نمونه برداری مربوط به میدان دور باید دقت شود تا عدد وضعیت^{۱۵} برای ماتریس سیستم بزرگ نشود و یا به عبارتی ماتریس از وضعیت بد^{۱۶} خارج شود تا همگرایی تضمین گردد. که در بخش الگوریتم شکل دهی الگوی تشعشعی، جزئیات روش و فلوجارت مربوطه آورده شده است.

در ادامه ضمن بررسی هریک از این قابلیت ها، به ارائه الگوریتم مورد نظر، ذکر چند مثال و نتیجه گیری خواهیم پرداخت.

حرکت دادن نقطه سرچ روی شدیدترین شیب^{۱۰} مینیمم می کند. تابع هدف معمولاً میانگین تفاوت در توزیع گین بدست آمده با توزیع گین مطلوب در نظر گرفته می شود. الگوریتم تطبیق مزدوج از این اصل استفاده می کند که گین در نقاط میدان دور، زمانی بهتر می شود که بردار تحریک با مزدوج مختلط بردار شدت میدان دور متناسب باشد. در سه روش اول اگر شروع راه حل به درستی انتخاب نشود مشکل مینیمم محلی^{۱۱} رخ می دهد. این مشکل در الگوریتم ژنتیک که معرف کلاس متفاوتی از الگوریتم است وجود ندارد. البته الگوریتم ژنتیک که بر پایه اصل بقای اصلح^{۱۲} استوار است نسبت به روش های قبل بسیار کند می باشد.

این مقاله با رویکردی نوین، به بررسی شکل کانتور ایجاد شده بر روی سطح زمین در اثر سنتز الگوی تشعشعی آنتن ماهواره می پردازد. در صورتی که در مطالعات مرتبط با شکل دهی پرتو، رسیدن به شکل کانتور مورد نظر در صفحه ای آنتن تعیین می گردد و بیانگر ناحیه تحت پوشش بر روی زمین نمی باشد. همچنین در این مقاله با رویکردی نوین شکل دهی پرتو جهت رسیدن هم زمان به چند هدف، انجام شده است. این اهداف شامل شکل دهی مورد نظر به ناحیه پوشش، چرخش پرتو اصلی و هدایت نقاط صفر الگوی تشعشعی می باشند. در حالی که در مطالعاتی که تا کنون صورت گرفته، شکل دهی پرتو فقط به منظور دستیابی به هدفی خاص، مورد توجه محققان بوده است. این تعدد اهداف باعث ایجاد محدودیت های بیشتری در این کار نسبت به کارهای دیگر این حوزه می شود و مقایسه را مشکل می سازد.

لازم به ذکر است منظور از منطقه تحت پوشش همانگونه که در شبیه سازی های آتی نیز خواهیم دید ایجاد پرتویی با سطح صاف^{۱۳} به منظور تامین گین یکسان در کانتور ایجاد شده بر روی سطح زمین می باشد. در مطالعاتی که برای چنین پرتو هایی انجام شده [۱۷] تا 4 dB ریپل در سطح پرتو وجود دارد. در این مقاله ریپل در گین منطقه تحت پوشش در اکثر نواحی کم تر از 2 dB و به ندرت از 3 dB تجاوز می کند.

بدست آوردن داینامیک رنج پایین تر برای دامنه تحریک عناصر آنتن باعث بالاتر رفتن بازده تقویت کننده های توان می گردد. داینامیک رنج دامنه عناصر آنتن حدود 35 dB بدست آمد که تقریباً برابر با کارهای دیگری همچون عدد 34 dB در [۱۵] است. در آن مقاله هدف از شکل دهی پرتو، ایجاد ناحیه پوشش تقریباً یکنواخت و با ریپل های کمتر از 3 dB برای ماهواره های LEO بوده است که با 61 عنصر و فواصل 0.57λ و از طریق الگوریتم ژنتیک انجام شده است. در [۱۵] گین بدست آمده برای ناحیه پوشش 13 dB است که نسبت به گین 7 dB تا 10 dB بدست آمده

14 approximate gradient method
15 condition number
16 ill condition

10 steepest descent
11 local minimum
12 survived of the fittest
13 flat-top beam

ایجاد پوشش با شکل دلخواه

به منظور بالا بردن بازده انرژی مصرفی ماهواره، الگوی تشعشی آنتن ماهواره باید با شکل ناحیه‌ای که جهت پوشش‌دهی مد نظر است مطابقت داده شود [۱]. چنین آنتن‌هایی تنها به بخشی از میدان دید قابل پوشش پرتو دهی می‌کنند. این آنتن‌ها به علت پهنای پرتو باریک بهره بالایی دارند. بهره بالا می‌تواند صرف بالا بردن نرخ انتقال اطلاعات، کاهش قطر آنتن مشترکان روی زمین یا افزایش بودجه لینک گردد. همچنین پوشش آنتن ماهواره‌ها به ناحیه خاص جغرافیایی، می‌تواند با هدف سرویس‌دهی ملی و منطقه‌ای انجام شود که نیاز به اخذ مجوزهای جهانی تداخل نباشد [۱۶]. مطالعات بسیاری در خصوص سنتز آنتن و محدود کردن پوشش به ناحیه جغرافیایی خاص انجام شده است [۶، ۱۷، ۱۸]. هدف مقاله در این بخش محدود کردن شکل ناحیه تحت پوشش به مرزهای جغرافیایی کشور ایران است.

چرخش پرتو

ماهواره LEO نسبت به ایستگاه زمینی دارای طلوع و غروب است و زمان محدودی برای رویت ایستگاه زمینی و مخابره اطلاعات در اختیار دارد. در صورتی که آنتن ماهواره دارای پرتو ثابت باشد برای بالا بردن زمان پوشش دهی باید از پهنای پرتو بالا استفاده کرد تا کانتور ایجاد شده بر روی زمین وسیع‌تر از ناحیه پوشش بوده و زمان بیشتری طول بکشد تا از آن منطقه عبور کند. گرچه این روش نیاز به سیستم آنتن ساده‌ای دارد اما نقاط ضعفی از جمله کاهش بهره در منطقه مورد نظر، اتلاف توان ارسالی ماهواره، ایجاد تداخل در خارج از محدوده مورد نظر و بالا رفتن احتمال شنود در ارتباطات استراتژیک را دارا می‌باشد. روش دیگری که در این مقاله ارائه می‌شود نیازمند سیستم آنتن پیچیده‌تری جهت شکل دهی پرتو است اما معایب روش قبل را برطرف می‌سازد. در این روش پهنای پرتو محدود می‌شود و منطقه مورد نظر با بهره بالاتری سرویس‌دهی می‌شود. برای اینکه در اثر عبور ماهواره پوشش آنتن به سرعت از منطقه مورد نظر خارج نشود نیاز است یک الگوریتم چرخش پرتو وفقی بکار گرفته شود و دائما با توجه به تغییر موقعیت ماهواره، نشانه روی پرتو به سمت مورد نظر اصلاح گردد تا محدوده پوشش ثابت باقی بماند.

هدایت نقاط صفر

الگوی تشعشی آنتن آرایه‌ای ماهواره، باید روی منطقه تحت پوشش به صورت وفقی و سازگار قابل کنترل باشد. با این قابلیت می‌توان ضمن پوشش‌دهی مناسب به ناحیه مورد نظر، تداخل ناخواسته را کاهش داد. این عمل با قرار دادن نقاط صفر پرتو تشعشی در جهت تداخل صورت می‌گیرد. نقاط صفر پرتو آنتن ماهواره در حالت گیرندگی، برای مقابله با سیگنال‌های تداخلی

است که ممکن است به سمت ماهواره ارسال شود، و در حالت فرستندگی برای مقابله با شنود زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامی که منبع تداخل یا گیرنده شنودی وجود ندارد پترن آنتن، پوشش مورد نظر را تامین می‌کند. با اطلاع از شروع تداخل یا شنود در مکان‌های خاص، پترن تشعشی به صورت وفقی کنترل می‌شود تا نقاط صفر پترن در جهت آن‌ها قرار گیرد. یکی از اهداف این مقاله حذف موثر چندین گیرنده شنود یا فرستنده تداخل با طول و عرض جغرافیایی دلخواه و معین است. الگوریتم‌های هدایت نقاط صفر که فقط روی فاز ضرایب تحریک عناصر کنترل دارند، به علت سادگی به صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۹، ۲۰]. اما بیشتر این الگوریتم‌ها، به دلیل عدم همگرایی کاملا پایدار، نمی‌توانند در برخی کاربردهای دقیق از جمله حوزه نظامی استفاده شوند [۱۴]. در این مقاله الگوریتمی انتخاب شده که بر روی دامنه و فاز کنترل دارد.

آرایه‌ای که در آن فاصله عناصر بزرگتر از حالت متداول $\frac{\lambda}{2}$ است، آرایه کم تراکم^{۱۷} خوانده می‌شود [۲۱] و مطالعات زیادی در زمینه ایجاد و هدایت نقاط صفر روی آن صورت گرفته است. در این مقاله از یک آنتن آرایه فازی مستطیلی با فاصله یکنواخت بین عناصر و برابر یک طول موج، برای اعمال الگوریتم استفاده می‌شود.

الگوریتم شکل دهی الگوی تشعشی

برای بدست آوردن بردار ضرایب عناصر آرایه باید یک معادله ماتریسی حل شود. این معادله ماتریسی کانال مخابراتی را به عنوان تابعی از زوایای تابش مختلف معرفی می‌کند. الگوریتمی که در این مقاله برای سنتز الگوی تشعشی ارائه می‌شود با اقتباس از روش ماتریس تابش^{۱۸} [۲۲] و بر مبنای روش حداقل میانگین مربعات وزن دار (WLMS) می‌باشد که در آن از فاز میدان تشعشی به عنوان ظرفیتی برای افزایش درجات آزادی مسئله سنتز استفاده می‌شود.

با توجه به رابطه الگوی تشعشی یک آرایه N عنصری که عناصر آن در هر سه بعد با جهت‌گیری‌های متفاوت قرار گرفته‌اند می‌توان آن را به فرم یک رابطه ماتریسی نوشت [۲۳]. برای این کار ماتریس A که ماتریسی ستونی متشکل از مقادیر ضرایب تحریک مختلط عناصر آرایه است معرفی می‌شود:

$$A = [a_1 \ a_2 \ a_3 \dots a_N]^T \quad (1)$$

که T علامت ترانپوته می‌باشد. میدان تشعشی آرایه در K نقطه‌ی مشاهده به صورت زیر بیان می‌شود.

$$E = [E(\theta_1, \phi_1), E(\theta_2, \phi_2), \dots, E(\theta_K, \phi_K)]^T \quad (2)$$

(۲)

17 Thinned array
18 Projection Matrix Method

در نقطه (θ_k, ϕ_k) میدان تشعشی عبارتست از:

$$E(\theta_k, \phi_k) = \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N g_j(\theta_k, \phi_k) \exp(jk_0 [\sin \theta_k \cos \phi_k x_n + \sin \theta_k \sin \phi_k y_n + \cos \theta_k z_n])$$

که $g_n(\theta_k, \phi_k)$ میدان تشعشی ناشی از عنصر n ام قرار گرفته در مکان (x_n, y_n, z_n) می باشد. معادله ماتریسی متناظر با این رابطه نیز بصورت زیر می باشد.

$$E = XA \quad (4)$$

که X ماتریس سیستم می باشد. عناصر این ماتریس نیز عبارتند از:

$$X_{kn} = g_n(\theta_k, \phi_k) e^{jk_0 (\sin \theta_k \cos \phi_k x_n + \sin \theta_k \sin \phi_k y_n + \cos \theta_k z_n)} \quad (5)$$

همانطور که گفته شد در روش ارائه شده این مقاله ابتدا میدان دور مطلوب به روی سطح زمین تعیین می شود و سپس در روند حل مسئله سعی می گردد به چنین الگوی تشعشی دست یابیم. در روند شبیه سازی معلوم گردید برای یک سنتز پرتو قابل قبول باید محدوده مربوط به نقاط مشاهده (θ_k, ϕ_k) گسترده تر از محدوده مورد نظر پوشش دهی (در این مقاله کشور ایران) باشد.

برای سهولت کاربر نقاط مشاهده همچون موقعیت ماهواره در سیستم مختصات جغرافیایی و به صورت طول و عرض جغرافیایی دریافت می شود. سپس محاسبات لازم برای تعیین (θ_k, ϕ_k) نقاط مشاهده (از دید ماهواره) در دستگاه مختصات مداری انجام می - گردد. برای محاسبات هندسی و تبدیل مختصات، زمین کره ایده آل و شعاع آن 6378 کیلومتر فرض شده است.

در اکثر مطالعات سنتز پرتو نیز همچون این مقاله از فضای UV به جای θ و ϕ استفاده می شود. همانگونه که در روابط زیر نیز مشخص است کل فضای مرئی و قابل سنتز در داخل دایره ای به شعاع 1 و مرکز $0, 0$ UV قرار می گیرد. پس در گام بعد محاسبات لازم جهت انتقال نقاط مشاهده و ماتریس سیستم از فضای (θ, ϕ) به فضای (U, V) طبق تعریف زیر انجام می گیرد.

$$\begin{aligned} U &= \sin \theta \cos \phi \\ V &= \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (6)$$

$$-1 \leq U, V \leq 1 \quad (7)$$

لذا

$$U^2 + V^2 \leq 1 \quad (8)$$

همانگونه که در مقدمه ذکر شد برای اینکه محاسبات ماتریس معکوس X با خطا رو به رو نشود و ماتریس از وضعیت بدخارج شود باید عدد وضعیت C یں ماتریس به $C=1$ (بهترین وضعیت) نزدیک باشد.

از آنجایی که انتخاب فضای نمونه برداری و فواصل نقاط مشاهده نقش مهمی در ایجاد ماتریس سیستم دارند برای قرارگیری عدد وضعیت ماتریس در محدوده قابل قبول شروط زیر تعیین گردید.

$$\begin{aligned} d_U &\leq \frac{1}{D_x} \\ d_V &\leq \frac{1}{D_y} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} D_U &\geq \frac{1}{d_x} \\ D_V &\geq \frac{1}{d_y} \end{aligned} \quad (10)$$

که در روابط بالا D_x طول آرایه در جهت محور X و D_y طول آرایه در جهت محور y می باشد.

d_U فاصله بین نقاط مشاهده در فضای (U, V) و در جهت محور U است.

d_V فاصله بین نقاط مشاهده در فضای (U, V) و در جهت محور v است.

D_U طول فضای مشاهده در جهت محور U و D_V طول فضای مشاهده در جهت محور V می باشد.

لذا در شبیه سازی ها باید برای انتخاب نقاط مشاهده به گونه ای عمل کنیم که روابط فوق برقرار باشد.

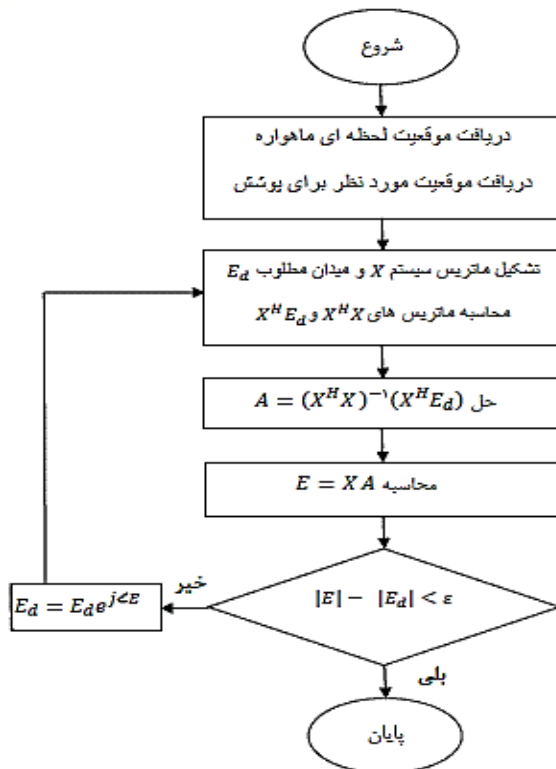
در مسئله سنتز هدف بدست آوردن A با داشتن X و E است. چنانچه تعداد عناصر آرایه با تعداد نقاط مشاهده میدان دور برابر باشد، $(K=N)$ باشد، ماتریس X مربعی می شود و به سادگی می توان تحریک را بصورت $A = X^{-1}E_d$ تعیین نمود، که E_d ماتریس میدان تشعشی مطلوب است. در چنین وضعیتی پاسخ یکتاست. البته این وضعیت چندان متداول نیست و برای یک آرایه N عنصری به تعداد نقاطی بیش از N برای میدان دور نیازمندیم تا الگوی مطلوب سنتز شود. با افزایش تعداد نقاط مشاهده دستگاه معادلاتی خواهیم داشت که تعداد معادلات آن بیش از تعداد مجهولات آن است. در این حالت با اضافه کردن یک قید می توان معادلات را پیش برد.

در مسئله سنتز به روش حداقل میانگین مربعات به دنبال کمینه کردن اختلاف بین میدان تشعشی آرایه و میدان مطلوب می - باشیم. به عبارت دیگر تابع زیر را باید کمینه کرد [24].

$$J = \|E - E_d\|^2 = \|XA - E_d\|^2 \quad (11)$$

می توان نشان داد که با مشتق گیری از تابع J نسبت به A بصورت

$$\frac{\partial J}{\partial a_i} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (12)$$



شکل ۱. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی شکل دهی پرتو

در اغلب کاربردها دامنه میدان تشعشعی مهم بوده و فاز میدان تشعشعی ظرفیتی بلا استفاده تلقی می‌گردد. در مسئله سنتز فاز میدان تشعشعی می‌تواند بر درجات آزادی مسئله بیفزاید که اگرچه به معنای پیچیده‌تر شدن ابعاد مسئله خواهد بود، اما امکان ایجاد فضای جستجوی وسیع‌تری برای پاسخها را فراهم می‌آورد. در الگوریتم ارائه شده که مبتنی بر روش واسکلاین^{۱۹} [۲۳] است، این ظرفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین ترتیب که فاز الگوی مطلوب در هر مرحله تکرار برابر با فاز الگوی سنتز شده در تکرار قبلی خواهد بود. در شکل ۱ فلوجارت الگوریتم ارائه شده، آمده است.

مثالها و نتایج

در این بخش با نمایش نتایج شبیه‌سازی برای چند حالت، عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارزیابی می‌شود. به عبارت دیگر دامنه و فاز ضرایب حاصل از الگوریتم را به آرایه اعمال کرده تا دقت شکل‌دهی و هدایت پرتو سنجیده شود. در شبیه‌سازیها از یک آنتن آرایه فازی مستطیلی ۱۰×۱۰ با فواصل یکنواخت عناصر و معادل یک طول موج استفاده شده است. همچنین عناصر آرایه، آنتن‌های همه جهتی در نظر گرفته شده لذا نتایج فقط ناشی از ضریب آرایه می‌باشد و با بکارگیری عناصر راستا^{۲۰} قابل بهبود است. ارتفاع ماهواره حد بالای مدار LEO یعنی ۲۰۰۰km فرض شده است.

به سادگی می‌توان نشان داد که برای برقرار بودن شرط ۱۲ ماتریس A به صورت زیر به دست می‌آید.

$$A = (X^H X)^{-1} X^H E \quad (13)$$

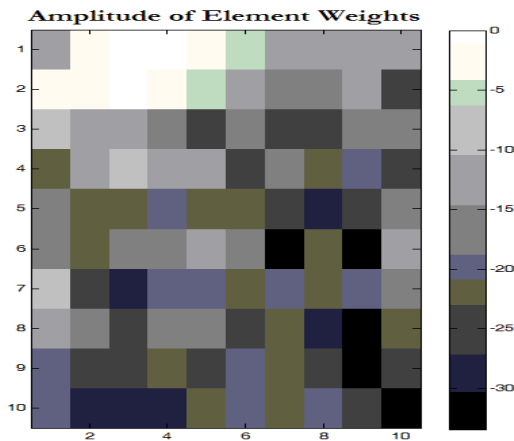
که H علامت ترانهادهی مزدوج می‌باشد. بدست آوردن ماتریس تحریک A به صورت فوق روش حداقل میانگین مربعات نام دارد و با پارامترهایی نظیر تعداد عناصر، فاصله زاویه‌ای و فاصله مکانی بین عناصر و همچنین تغییر بعضی ویژگی‌های الگوی مطلوب می‌توان پاسخ را بهینه کرد. در این روش به تمام نقاط سنتز وزن یکسانی اختصاص داده می‌شود. می‌توان با وارد کردن ضرایب وزنی در الگوریتم فوق به روش حداقل میانگین مربعات وزن دار دست یافت. معادله ۱۳ به صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$A = (X^H W X)^{-1} (X^H W E) \quad (14)$$

ماتریس W به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$W = \begin{bmatrix} w(u_1, v_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w(u_K, v_K) \end{bmatrix} \quad (15)$$

در این روش با استفاده از ماتریس ضرایب وزنی W به تک تک نقاط سنتز بطور مستقل وزن داده می‌شود و با این عمل در واقع می‌توان نزدیک شدن به میدان مطلوب را در بعضی نقاط تاکید کرد و یا در برخی نادیده گرفت. با آزمون و خطا می‌توان به الگوی مطلوب رسید. به عبارت دیگر کل نقاط مشاهده را می‌توان به سه دسته نقاط واقع شده در داخل مرز جغرافیای ایران، نقاط خارج از کشور ایران و نقاط شنود تقسیم کرد و به میدان مطلوب در هر دسته با توجه به اهمیت آن وزن مخصوص تخصیص داد.

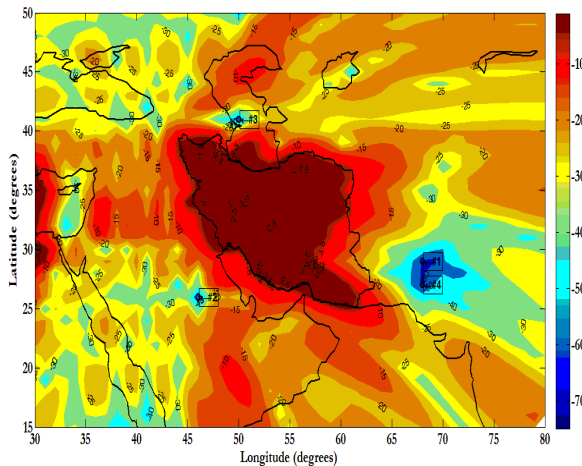


شکل ۳. نمایش گرافیکی دامنه عناصر برای هدایت پرتو به میزان $(\theta = 39.11^\circ$ و $\phi = -175.19^\circ)$

مثال دوم

در این مثال موقعیت ماهواره $(35^\circ N, 40^\circ E)$ یعنی شمال غرب و خارج ایران است. تعداد نقاط شنود یا اختلال چهار مورد و به صورت تصادفی در خارج ناحیه پوشش تعیین شده‌اند که این موقعیت‌ها به ترتیب $(29^\circ N, 68^\circ E)$ ، $(26^\circ N, 46^\circ E)$ و $(41^\circ N, 50^\circ E)$ می‌باشند.

مقدار هدایت پرتو مورد نیاز برای حفظ ناحیه پوشش کشور برابر با $(\theta = 29.74^\circ$ و $\phi = 7.97^\circ)$ و ماکزیمم بهره در ناحیه پوشش 8.35 dB بدست آمده است. در شکل ۴ ناحیه پوشش نشان داده شده است.



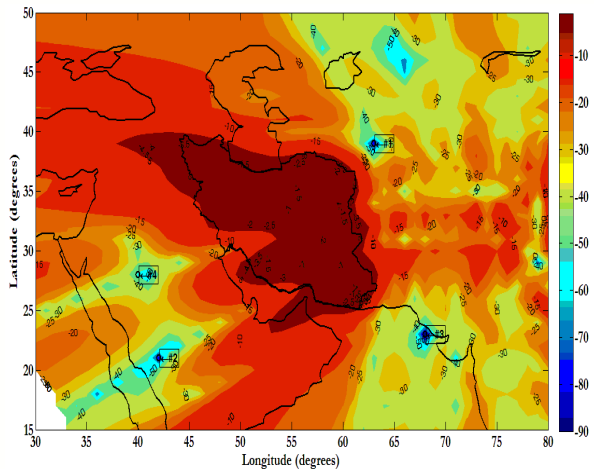
شکل ۴. شبیه سازی ناحیه پوشش پس از هدایت پرتو به میزان $(\theta = 29.74^\circ$ و $\phi = 7.97^\circ)$

پوشش ایجاد شده به صورت خطوط بسته روی کشور ایران نمایش داده شده است. در حالت ایده آل ناحیه پوشش باید به شکل مرزهای جغرافیایی کشور ایران در آید و نتایج به ازای موقعیت‌های مختلف ماهواره پایدار بماند. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم، نتایج به ازای سه مثال از موقعیت‌های دلخواه ماهواره ارائه می‌گردد.

مثال اول

در این مثال موقعیت ماهواره $(33^\circ N, 73^\circ E)$ یعنی شرق و خارج ایران است. تعداد نقاط شنود یا اختلال چهار مورد و به صورت تصادفی در خارج ناحیه پوشش تعیین شده‌اند که این موقعیت‌ها به ترتیب $(39^\circ N, 63^\circ E)$ و $(21^\circ N, 42^\circ E)$ و $(23^\circ N, 68^\circ E)$ و $(28^\circ N, 40^\circ E)$ می‌باشند.

مقدار هدایت پرتو مورد نیاز برای حفظ ناحیه پوشش کشور برابر با $(\theta = 39.11^\circ$ و $\phi = -175.19^\circ)$ و ماکزیمم بهره در ناحیه پوشش 9.69 dB بدست آمده است. در شکل ۲ و ۳ به ترتیب ناحیه پوشش و شکل مقادیر دامنه تحریک عناصر، به صورت گرافیکی نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود داینامیک رنج 35 dB بدست آمده است.



شکل ۲. شبیه سازی ناحیه پوشش پس از هدایت پرتو به میزان $(\theta = 39.11^\circ$ و $\phi = -175.19^\circ)$

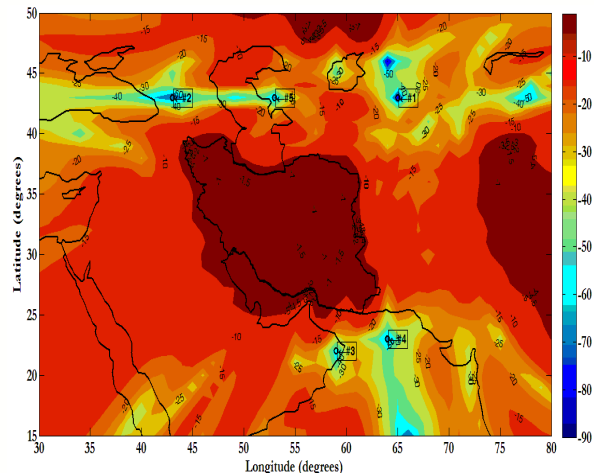
ها حتی با وجود پنج نال بین 60 dB تا 80 dB بدست آمد. در نهایت مجموع نتایج نشان دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی در شرایط گوناگون فوق و ماموریت‌های مختلف فضایی می‌باشد.

مراجع

- [1] Rodriguez, JA; Munoz, R ; Estevez, H; Ares, F ; Moreno, E., "Synthesis of planar arrays with arbitrary geometry generating arbitrary footprint patterns," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 9, pp. 2484-2488, 2004.
- [2] W. H. Press, S. A. Teukolsky, . W. T. Vetterling and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, Citeseer, 1996.
- [3] J. Cid, J. Rodriguez, F. Ares and E. Moreno, "Synthesis of satellite footprints by perturbation of Woodward-Lawson solutions for planar array antennas," *Journal of electromagnetic waves and applications*, vol. 14, no. 1, pp. 3-10, 2000.
- [4] R. Elliott and G. Stern, "Shaped patterns from a continuous planar aperture distribution," in *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, vol. 135, IET, 1988, pp. 366-370.
- [5] F. Ares, J. Rodriguez and A. Veiuro, "Efficient footprint patterns obtained by spreading out collapsed distributions," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997. IEEE., 1997 Digest, IEEE, 1997*, pp. 498-501.
- [6] A. Trastoy, F. Ares and E. Moreno, "Arbitrary footprint patterns from planar arrays with complex excitations," *Electronics Letters*, vol. 36, no. 20, pp. 1678-1679, 2000.
- [7] A. K. Bhattacharyya, "Projection matrix method for shaped beam synthesis in phased arrays and reflectors," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 3, pp. 675-683, 2007.
- [8] A. R. Cherrette and S.-W. Lee, "A method for producing a shaped contour radiation pattern using a single shaped reflector and a single feed," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 6, pp. 698-706, 1989.
- [9] P. Lam, S.-W. Lee, . D. Chang and K. Lang, "Directivity optimization of a reflector antenna with cluster feeds: A closed-form solution," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 11, pp. 1163-1174, 1985.
- [10] G. Poulton and S. Hay, "Efficient design of shaped reflectors using successive projections," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2156--2158, 1991.
- [11] H. Zhou, P. Clarricoats, . G. Poulton and S. Hay, "Power pattern synthesis for mesh reflectors using the method of successive projections," *Electronics Letters*, vol. 28, no. 19, pp. 1837-1839, 1992.
- [12] . J. M. Johnson and . V. Rahmat-Samii, "Genetic algorithms in engineering electromagnetics," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 39, no. 4, pp. 7-21, 1997.
- [13] Haupt, R.L., "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 37, no. 2, pp. 7-15, 1995.
- [14] Shin, Changeui and Ju, Jahyuk and Kang, Daegeun

مثال سوم

در این مثال موقعیت ماهواره ($37^\circ N, 62^\circ E$) یعنی شمال شرق و خارج ایران است. تعداد گیرنده‌های شنود یا فرستنده‌های اختلال پنج مورد و به صورت تصادفی در خارج ناحیه پوشش تعیین شده‌اند. این موقعیت‌ها به ترتیب ($43^\circ N, 43^\circ E$), ($22^\circ N, 59^\circ E$), ($43^\circ N, 65^\circ E$), ($43^\circ N, 53^\circ E$) و ($23^\circ N, 64^\circ E$) می‌باشند. مقدار هدایت پرتو مورد نیاز برای حفظ ناحیه پوشش کشور برابر با ($\theta = 24.62^\circ$ و $\phi = 153.25^\circ$) و ماکزیمم بهره در ناحیه پوشش 7.59 dB بدست آمده است. در شکل 5 ناحیه پوشش نشان داده شده است.



شکل 5. شبیه سازی ناحیه پوشش پس از هدایت پرتو به میزان ($\theta = 24.62^\circ$ و $\phi = 153.25^\circ$)

نتیجه گیری

در این مقاله با رویکردی نوین، روشی ارائه گردید که هر سه قابلیت شکل دهی ناحیه پوشش، چرخش پرتو و هدایت نقاط صفر الگوی تشعشعی، به صورت همزمان در آنتن آرایه فازی حاصل شود و در نهایت کانتور ایجاد شده بر روی سطح زمین شبیه سازی شد. الگوریتم پیشنهادی بر مبنای روش حداقل میانگین مربعات وزن دار و ماتریس تابش بوده که با اعمال آن، ضرایب بهینه (دامنه و فاز) برای اعمال به عناصر آنتن آرایه فازی به دست می‌آیند. نتایج نشان دهنده قابلیت آنتن برای هدایت پرتو تا $\theta = \pm 40^\circ$ نسبت به خط عمود بر صفحه آنتن و 0° تا 360° درجه در جهت ϕ است و این زاویه‌ها طوری محاسبه شدند که سبب ثابت ماندن منطقه پوشش حین گذر ماهواره LEO از محدوده مورد نظر گردید. شکل کانتور مورد نظر بر روی زمین به منظور پوشش کشور ایران ایجاد شد که این شکل به ازای زوایای مختلف پوشش پرتو قابل قبول بود. همچنین میزان ریبیل گین، در ناحیه پوشش حدود 2 dB بدست آمد. هدایت نقاط صفر الگوی تشعشعی به منظور قرار دادن آن‌ها در جهت شنود انجام شد که عمق آن-

- nulling using digitally controlled phase-shifters," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 5, pp. 638--649, 1976.
- [21] W. C. Barott, "Volumetric phased arrays for satellite communications," 2006.
- [22] . T. K. Sarkar, . M. C. Wicks, M. Salazar-Palma and R. J. Bonneau, *Smart Antennas*, New York, John Wiley and IEEE, vol. 170, Wiley. com, 2003.
- [23] . L. I. Vaskelainen, "Iterative least-squares synthesis methods for conformal array antennas with optimized polarization and frequency properties," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 7, pp. 1179--1185, 1997.
- [24] E. Ebrahimi and . K. Forooghi, "Multiple nulls synthesis for circular arrays using least squares," in *Antennas, Propagation & EM Theory. ISAPE '06. 7th International Symposium on*, Guilin, Oct. 2006.
- [25] J. Fondevila-Gomez, J. Rodriguez-Gonzalez, A. Trastoy and F. Ares-Pena, "Synthesis of arbitrary footprint patterns from bidimensional arrays with optimal boundary," in *Proc. JINA*, 2002, pp. 439-442.
- [26] . J. Fondevila-Gomez, J. Rodriguez-Gonzalez, . A. Trastoy and F. Ares-Pena, "Optimization of array boundaries for arbitrary footprint patterns," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 2, pp. 635-637, 2004.
- and Choi, Seungwon and Lee, Cheolhoon and Cheong, Chihyun and Seo, Jongwoo and Sarkar, Tapan K and Salazar-Palma, Magdalena, "Implementation of an Antenna Array for Satellite Communications with the Capability of Canceling Jammers," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 55, no. 1, pp. 32--48, 2013.
- [15] H. Zhao, Z. Xie, H. Wang, J. Jin, "Beam shaping for satellite phased array antenna using dual coding genetic algorithm," *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom'09. 5th International Conference on*, IEEE, 2009, pp. 1-4.
- [16] K. a. I. T. a. K. H. a. O. I. Ueno, "Design and characteristics of a multiband communication satellite antenna system," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 31, no. 2, pp. 600--607, 1995.
- [17] . F. Ares, J. Fondevila-Gomez, G. Franceschetti, E. Moreno-Piquero and J. Rodriguez-Gonzalez, "Synthesis of very large planar arrays for prescribed footprint illumination," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 2, pp. 584--589, 2008.
- [18] Y. Chen, S. Yang and Z. Nie, "Synthesis of satellite footprint patterns from time-modulated planar arrays with very low dynamic range ratios," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 21, no. 6, pp. 493--506, 2008.
- [19] W.-S. Choi and S. T. K. Sarkar, Tapan K, "Phase-only adaptive processing based on a direct data domain least squares approach using the conjugate gradient method," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 11, pp. 3265--3272, 2004.
- [20] C. Baird and . G. Rassweiler, "Adaptive sidelobe