

طراحی و بهینه سازی یک الگوی مطلوب با ترکیب روشهای تطابق نول و گرادیان برای یک رشته آنتن خطی

جواد سلیمان میگونی^۱

علیرضا تجلی^۲

چکیده

در این مقاله مراحل طراحی و بهینه سازی یک الگوی مطلوب برای یک رشته آنتن آورده شده است. این آنتن آرایه ای خطی که در فرکانس 5GHz کار می کند، به تولید یک الگوی با شکل تابع کسکانت با پهنای پرتو ۲۵ درجه و سایه لوبهای جانبی متفاوت می پردازد. روش سنتز بکمک تطابق نولی و روش بهینه سازی جستجوی گرادیان (GSA) بوده است. این کار با یک نرم افزار تمام موج شبیه سازی و نتایج آن صحت گذاری شده است.

کلیدواژه

آنتن آرایه ای خطی، الگوریتم های بهینه سازی، تطابق نولی، تطابق گرادیان (GSA)

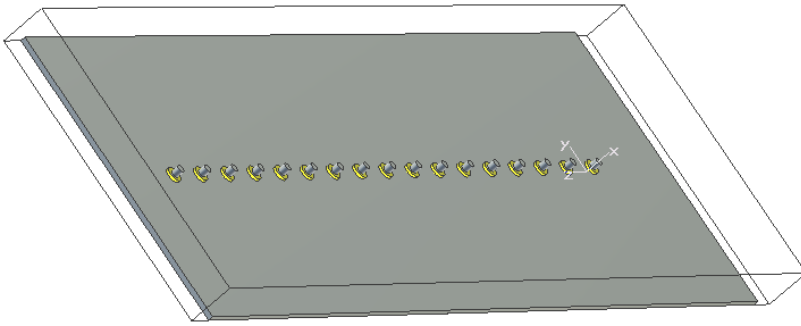
۱. دانشجوی دکتری برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی Meiguni@ee.kntu.ac.ir

۲. استادیار دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرطوسی

تاریخ دریافت: ۸۹/۴/۱ تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۳

مقدمه

مسئله ای که با آن مواجه هستیم عبارتست از طراحی یک رشته آنتن خطی که در فرکانس مرکزی 5 GHz کار می کند و برای یک سامانه مایکروویو در نظر گرفته شده است. برای این رشته آنتن آرایه ای که در راستای محور Z در نظر گرفته می شود، طراح باید بتواند مشخصات مختلف از جمله شکل الگوی تشعشی و پهنای Beam و شبکه تحریک و برخی مشخصات دیگر را طراحی و بهینه سازی کند. بهمین منظور علاوه بر بکار گیری الگوریتم های طراحی تحلیلی می بایست به سراغ روشهای بهینه سازی برویم و نتایج را مقایسه کنیم.



شکل ۱. ساختار آنتن آرایه ای

خوشبختانه کلیه روابطی که برای طراحی الگوهای با ساید لوب متفاوت در سمت چپ و راست بکار گرفته می شود، در مرجع [۱] موجود می باشد. اساس کار این الگوریتم ها بر مبنای بدست آوردن الگوی تشعشی یک توزیع پیوسته است که در آن اندازه تحریک ثابت است و فاز آن بطور خطی افزایش می یابد. بنابراین برای تحریکی که از رابطه $g(\xi) = Ke^{-j\beta\xi}$ بدست می آید قادر هستیم تا الگوی تشعشی حاصل که به الگوی تیلور معروف است را با رابطه زیر بدست آوریم:

$$S(u) = K \frac{\sin \pi u}{\pi u} \quad (2)$$

در این رابطه u با زاویه θ بصورت زیر ارتباط دارد:

$$u = \frac{2a}{\lambda} \left(\cos \theta - \frac{\beta}{K} \right) \quad (3)$$

که در آن نسبت $\frac{\beta}{K}$ مبین کسینوس زاویه در جهت پرتو اصلی رشته آنتن می باشد. بنابراین برای الگوی تشعشی تیلور، ابتدا همه چیز در حوزه u طراحی می شود. برای یک الگوی تشعش تیلور

مقادیر نولها (صفرها) از اعداد صحیح مثبت و منفی تبعیت می کند؛ این بعلت حضور تابع سینک در معادله الگوی تشعشی می باشد. در مراجع [۲ و ۱] آمده است که اگر بخواهیم میزان ساید لوب های سمت چپ و راست متفاوت باشد، یعنی برای سمت چپ A_L و برای سمت راست A_R باشد، آنگاه رابطه ساید لوب های جانبی با A از فرمول زیر تبعیت می کند:

$$\cosh \pi A = b, SLL = 20 \log b \quad (4)$$

در این صورت موقعیت نول های سمت چپ و راست از رابطه زیر بدست می آید:

$$u_n^0 = n_R \left[\frac{A_R^2 + (n - \frac{1}{2})2}{A_R^2 + (n_R - \frac{1}{2})2} \right]^{1/2}, n = 1, 2, \dots, n_R - 1$$

$$u_n^0 = -n_L \left[\frac{A_R^2 + (n + \frac{1}{2})2}{A_R^2 + (n_L - \frac{1}{2})2} \right]^{1/2}, n = -1, -2, \dots, -(n_L - 1) \quad (5)$$

همچنین برای بدست آوردن الگوی تشعشی در حوزه u ، از رابطه تعمیم یافته تیلور استفاده خواهیم کرد:

$$S(u) = C_0 \frac{\sin \pi u}{\pi u} \frac{\prod_{n=-(n_L-1)}^{n_R-1} \left(1 - \frac{u}{u_n^0} \right)}{\prod_{n=-(n_L-1)}^{n_R-1} \left(1 - \frac{u}{n} \right)} \quad (6)$$

به روش طراحی الگوی با تغییر در موقعیت نولها، روش تطبیق نولی یا Adaptive Nulling گفته می شود. اصول حاکم بر این روابط نیز از آنجا ناشی می شود که عدد n_R برای تعداد صفرهای سمت راست بیم اصلی و عدد n_L برای تعداد صفرهای سمت چپ بیم اصلی است و نکته قابل توجه این است که در حوزه u بین $(-n_L, n_R)$ دیگر موقعیت نولهای ما اعداد صحیح نیستند ولی از خود n_R به سمت راست و n_L به سمت چپ، موقعیت نولها روی اعداد صحیح واقع شده است که پوش دامنه آنها از تابع u^{-1} تبعیت می کند. بنابراین برای شروع کار ابتدا طراحی خود را به سمت حوزه u معطوف می کنیم.

پیاده سازی مسأله

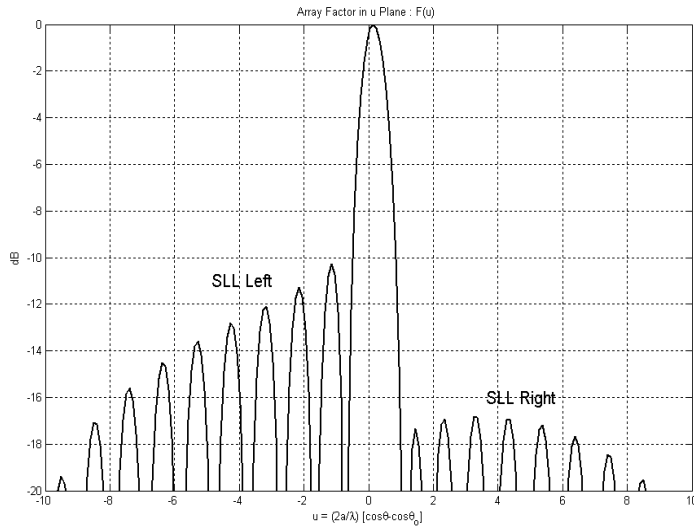
برای این رشته آنتن تعداد ۱۷ المان را در نظر می گیریم که هر کدام از آنها موازی با محور X هستند و محور رشته آنتن محور Z خواهد بود. هدف رسیدن به سایه لوب کناری سمت چپ 7 dB- و سایه لوب کناری سمت راست 20 dB- می باشد. تعداد نولها را در سمت چپ و راست برآود سایه یکسان و برابر با ۹ اختیار می کنیم. از آنجا که تعداد نولها یکی کمتر از تعداد آنتنهاست، بنابراین باید به تعداد ۱۶ نول داشته باشیم.

نکته قابل ملاحظه در طراحی اینست که چون در قسمتی از بیم اصلی پوش الگوی تشعشی از الگوی تابع $(\theta) \text{Cosec}$ تبعیت می کند، بطور صریح نمی توانیم فرمول تحلیلی برای این کار ارائه کنیم و می بایست از روشهای تکرار بهره بگیریم. اصول حاکم بر روشهای تکرار هم به اینصورت است که دقیقاً فرض می کنیم بین هر دو صفر از الگوی حوزه u دقیقاً یک ماکسیمم رخ داده است که نام آنرا u_p می گذاریم. با بدست آوردن مقدار این ماکسیمم $S(u_m^p)$ قادر هستیم تا موقعیت نولهای جدید را بدست آوریم. رابطه بازگشتی موجود برای این کار که در مرجع [۱] آمده است ما را در رسیدن به این امر کمک می کند. بنابراین اگر برای نولهای u_n تغییراتی به اندازه δu_n داشته باشیم، و همچنین الگوی تشعشی تغییراتی به اندازه δC داشته باشد، آنگاه برای رسیدن به الگوی مطلوب $S(u_m^p)$ از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$\frac{S(u_m^p)}{S_0(u_m^p)} - 1 = \frac{\delta C}{C_0} + \sum_{n=-(n_L-1)}^{(n_R-1)} \frac{(u_m^p / u_n^0)^2}{1 - \frac{u_m^p}{u_n^0}} \quad (7)$$

در رابطه فوق $S(u_m^p)$ مقدار مطلوب ماکسیمم هایی است که قرار است به آن برسیم و $S_0(u_m^p)$ مقدار اولیه این ماکسیمم ها است. از آنجایی که تعداد نولها برابر است با $2 - n_L + n_R$ و با در نظر گرفتن مجهول δC پس تعداد $MM = n_R + n_L - 1$ مجهول خواهیم داشت. از طرفی چون تعداد ماکسیمم ها نیز بین هر دو صفر است، با اضافه کردن دو ماکسیمم در سمت چپ و راست قادر هستیم تا به تعداد MM معادله برسیم و دستگاه معادلات فوق را حل کنیم. تعداد $Iteration = 3$ را بعنوان پایان روش تکرار در نظر می گیریم.

با رسم الگوی در حوزه u مشاهده می شود که این سایه لوبها از پوش مطلوب برخوردار هستند. نکته قابل توجه در اینجا اینست که الگوی تشعشی در حوزه u به میزان فاصله بین آنتنها یا d بستگی ندارد، بلکه در حوزه θ فاصله آنتن ها در ایجاد نول موثر است. در این مقاله فاصله بین آنتن ها $\frac{\lambda}{3}$ در نظر گرفته شده است.



استفاده از تکنیک Null Freeing برای حذف نولها در پرتو اصلی

برای حذف نولها در پرتو اصلی از تکنیک Null Freeing استفاده می کنیم [۲] اصول کلی استفاده از این روش نیز برمی گردد به دایره شلکونوف، آنجا که هر نول روی محیط این دایره واقع شده است. پس برای حذف هر نول دلخواه باید بدون تغییر دادن فاز آن نول، میزان اندازه آن را به مقدار کمی از یک انحراف دهیم. یعنی فرض کنید معادله الگوی از رابطه زیر تبعیت می کند:

$$F_1(w) = C_1 \prod_{n=1}^{16} (w - w_{n,1}) \quad (8)$$

پس برای استفاده از روش Null Freeing باید اندازه دو نول را طبق رابطه زیر تغییر دهیم و مجدداً معادله الگوی را بازنویسی کنیم:

$$w_{n,2} = (1 + b_n) e^{j\psi_{n,1}}, \quad n=9,10 \quad (9)$$

$$F_2(w) = C_2 \prod_{n=9}^{10} (w - w_{n,2}) \cdot \prod_{n=1, n \neq 9,10}^{16} (w - w_{n,1}) \quad (10)$$

که در آن b_n ها اعداد غیر صفر و کوچکتر از واحد می باشند البته انجام این عمل مستلزم بهینه سازی مجدد می باشد. چون حذف یک نول، خواه ناخواه بر روی دامنه سایه لوب مجاور آن تأثیر خواهد گذاشت.

برای بدست آوردن ضرایب تحریک آنتن ها باید ضرایب چند جمله ای شلکونوف را بدست آوریم که در آن ضرایب چند جمله ای دقیقاً همان ضرایب تحریک رشته آنتن ها است. بعبارت دیگر در این مسأله که در آن ۱۶ نول برای رشته آنتن خواهیم داشت بکمک رابطه زیر معادله چند جمله ای را بدست می آوریم :

$$F_1(w) = C_1 \prod_{n=1}^{16} (w - w_n) \quad (11)$$

پس از بدست آوردن ضرایب تحریک رشته آنتن ها بکمک رابطه موجود در [۳] الگوی تشعشی را در صفحه عمودی بدست خواهیم آورد:

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta - \cos \theta_0) \quad (12)$$

$$P(u) = \frac{E_p(u)}{\sqrt{d \sum_{n=1}^N q_n^2}} \sum_{n=1}^N q_n \exp(j n d u - j \varphi_n)$$

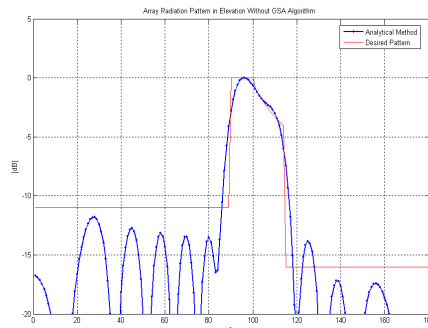
که در آن $\varphi_n < -\Phi_n$ تحریک آنتن n ام است. همچنین $E_p(u)$ الگوی المان است. اگر دامنه و فاز تحریک ها را ادغام کنیم، خواهیم داشت:

$$A_i = q_i \exp(-j \varphi_i) \quad (13)$$

بنابراین برای الگوی P خواهیم داشت:

$$P(u) = \frac{E_p(u)}{\sqrt{d \sum_{n=1}^N |A_n|^2}} \sum_{n=1}^N A_n \exp(j n d u) \quad (14)$$

پس از انجام طراحی به شکل الگوی تشعشی زیر خواهیم رسید:



شکل ۲. پرتو تشعشی در صفحه U

بهینه سازی با الگوریتم GSA

همانگونه که از شکل مشخص است میزان برخی از سایید لوب های جانبی از ناحیه مطلوب فراتر رفته است. برای رفع این مشکل و ایجاد تطابق بهتر بین الگوی تشعشعی مطلوب و الگوی تشعشعی بدست آمده به سراغ الگوریتم جستجوی گرادیان یا همان 1GSA می رویم [۴ و ۵]. اصول حاکم بر این الگوریتم تعریف یک تابع هزینه و کمینه کردن آن است [۶ و ۷]. اگر الگوی مطلوب برای آنتن E_K باشد و الگوی بدست آمده از سنتز رشته آنتن (u_k) باشد، برای تعریف تابع هزینه که انتظار داریم کمینه شود خواهیم داشت:

$$f = \sum_{k=1}^M |P(u_k) - E_k|^2 \quad (15)$$

طبق روابط موجود در الگوریتم GSA اگر مشتق f را نسبت به هر کدام از متغیرهای x_i در هر مرحله بدست آوریم، قادر هستیم تا بکمک فرمول زیر متغیرها را به گونه ای به روز رسانی کنیم که تابع f کمینه گردد:

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} - \rho \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (16)$$

$$\rho^2 \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|^2 = (\delta l)^2$$

برای گرفتن مشتقات نسبت به هر A_p از روابط مشتقات جزئی کمک می گیریم. این مراحل در زیر

آورده شده است. در روابط زیر تعداد نقاط نمونه گیری M است.

$$\frac{\partial f}{\partial A_p} = \frac{\partial f}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial A_p} = 2 \sum_{k=1}^K \frac{\partial P}{\partial A_p} (P(u_k) - E_k)$$

And

$$\frac{\partial P}{\partial A_p} = \frac{E_p(u)}{\sqrt{d}} \left\{ \frac{e^{jpd u} \sqrt{\sum_1^N |A_p|^2} - \left(\sqrt{\sum_1^N |A_p|^2} \right)^{-0.5} \sum_1^N A_p e^{jpd u}}{\sqrt{\sum_1^N |A_p|^2}} \right\}$$

$$= \frac{E_p(u)}{\sqrt{d}} \left\{ \frac{e^{jpd u} - \left(\sqrt{\sum_1^N |A_p|^2} \right)^{-1} \sum_1^N A_p e^{jpd u}}{\sqrt{\sum_1^N |A_p|^2}} \right\}$$

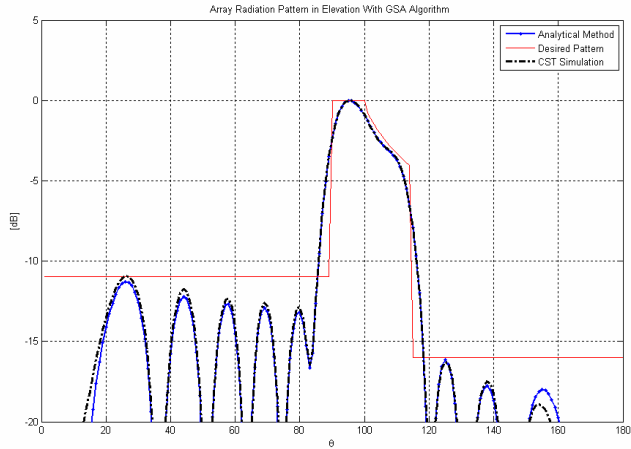
1. Gradient Search Algorithm

با داشتن روابط مشتق برای هر درایه و استفاده از رابطه به روز رسانی هر متغیر که به ضریب ρ وابسته است، قادر هستیم تا کلیه متغیرها را به روز رسانی کرده و وارد مرحله بعد شویم.

الگوریتم گرادینانی که در اینجا مورد استفاده قرار گرفت با $\delta l = 0.001$ و ۱۰ مرتبه تکرار کار خود را به پایان رساند و ضرایب تحریک را مطابق با جدول زیر تولید کرد. با رسم الگوی تشعشعی ناشی از این ضرایب تحریک، همانگونه که مشاهده می کنید بهبود زیادی نسبت به پاسخ قبلی حاصل شده است و نیز همه ساید لوب های جانبی نیز کمتر از حد مطلوب قرار گرفته اند:

شماره آنتن	اندازه تحریک	فاز (درجه)
1	2.4812	-14.4209
2	3.7881	-162.9202
3	2.4193	17.8012
4	4.9806	-160.0788
5	3.7877	11.7728
6	5.8407	-163.6954
7	4.8699	8.2967
8	6.7582	-173.4224
9	4.5647	0.4485
10	7.6403	-176.3992
11	4.1645	-27.3289
12	6.8353	-169.1775
13	5.3879	-44.3648
14	3.9944	-157.2125
15	5.5938	-35.1750
16	1.1130	-168.5554
17	4.4718	-7.0535

برای مقایسه نتایج با روش تحلیلی و روش بهینه سازی شده در نرم افزار Matlab شکل زیر را خواهیم داشت:

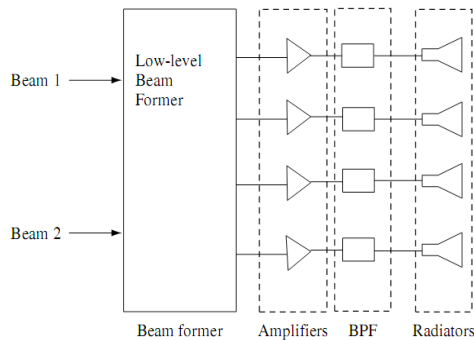


شکل ۴. پرتو تشعشی با انجام بهینه سازی

همانگونه که از شکل مشاهده می شود، پاسخها تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

بلوک دیاگرام شبکه اکتیو فید

استفاده از ساختار اکتیو شبکه تغذیه رشته آنتنها هنگامی بکار می رود که دامنه سیگنالهای عبوری از مقسم توان و شیفت دهنده های فاز کم باشد. از آنجا که بسیاری از شیفت دهنده های فاز (از جمله شیفت دهنده فاز مورد استفاده در پروژه) افت عبوری نسبتاً زیادی ایجاد می کنند (حدود 7 dB) بنابراین برای عمل فرستندگی (و گیرندگی) از ساختارهای فعال استفاده خواهد شد. بلوک دیاگرام یک ساختار تغذیه فعال در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل ۵. تحریک آرایه آنتنی فعال برای ایجاد دو پرتو متفاوت [۳]

در بلوک Low Level Beam Former که از شیفت دهنده های فاز متغیر استفاده شده است، مدار کنترلی DC برای ایجاد فرامین شیفت دهنده های فاز وجود دارد. همچنین در مسیر تقویت کننده های فعال نیز مقاومتی برای ایجاد بهره متغیر تقویت کننده موجود می باشد. معمولاً برای بلوک Beam Former از ماتریس Butler و یا لنز Rotman استفاده خواهد شد [۳]

نتیجه گیری

برای یک آرایه آنتنی خطی بکمک روشهای تطابق نولی و روش گرادیان، شکل دهی پرتو صورت گرفت. با استفاده از تکنیک Null Freeing عمل حذف صفرها درون پرتو اصلی صورت پذیرفت. الگوریتم GSA نیز برای کاهش سایه لوبهای جانبی و بهبود پاسخ الگوی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج کار بسیار رضایت بخش بوده است و بکمک نرم افزار CST Microwave Studio مورد شبیه سازی تمام موج واقع شد که پاسخهای آن بسیار نزدیک به پاسخهای تحلیلی بوده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این اثر از حمایتهای مادی و معنوی پژوهشگاه الکترونیک ایران (IERC) تشکر به عمل می آورند.

مراجع

1. R. S. Elliott, «Antenna theory and design,» revised edition, IEEE. Antennas & Propagation Society.
2. R. S. Elliott, “Improved pattern synthesis for equispaced linear arrays,,” *alta freq.*, vol. 51, pp. 296-300, nov. /dec. 1982.
3. Arun k. Bhattacharyya, «Phased array antennas, floquet analysis, Synthesis, and active array systems,» John Wiley & Sons, inc., hoboken. NJ. 2006.
4. H. Oraizi and m. fallahpour, “Nonuniformly spaced linear array design for the specified beam wide/side lobe level or specified directivity/side lobe

level with coupling considerations,” Progr. Electromagn. Res. M, vol.4, pp. 185-209, 2008.

5. H.Oraizi and m.fallahpour, “Array pattern synthesis with mutual coupling consideration,” international symposium on telecommunication ,pp. 77-82, 2008.

6. H.Oraizi and m.fallahpour, “Array pattern synthesis with mutual coupling consideration,” Med. Microwave Symposium, MMS 2008.

۷- همایون عریضی و مجتبی فلاح پور، “سنتز پرتو تشعشعی آنتن آرایه ای همراه با تنظیم امپدانس ورودی هر عنصر از طریق ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش های گرادیان،” شانزدهمین کنفرانس مهندسی برق- دانشگاه تربیت مدرس، صفحات ۷۲ تا ۸۴ سال ۲۰۰۸.

