

روشی ساده برای کاهش گلبُرگ‌های فرعی در آنتن آرایه فازی خطی با وزن‌دهی یکنواخت و غیریکنواخت با ایده از روش SLC

بیژن عباسی آرند^۱، وحید انصاری^{۲*}

۱- دکترای مخابرات میدان، پژوهشگاه الکترونیک ایران

۲- کارشناس ارشد مخابرات سیستم، پژوهشگاه الکترونیک

ansari.vahid@yahoo.com

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۹، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۹)

چکیده- کاهش گلبُرگ‌های فرعی آنتن همواره به عنوان هدفی مهم در طراحی مطرح است. در این مقاله، روشی جدید برای کاهش گلبُرگ‌های فرعی الگوی تشعشعی آنتن‌های آرایه فاز با وزدهی یکنواخت و غیریکنواخت ارائه شده است. در این روش می‌توان به کمک اصلاح وزن المان‌های آرایه یا با اضافه کردن چند المان، مانند روش SLC، به الگویی با گلبُرگ‌های فرعی کوچک دست یافت. در آرایه‌ای با وزنه‌دهی یکنواخت با توجه به ضرورت طراحی می‌توان مقدار SLL در گلبُرگ‌های فرعی سوم به بعد را تا بیش از -10 dB به گونه‌ای کاهش داد که پهنای گلبُرگ اصلی کمتر از ۳٪ تغییر کرده و بهره نیز تغییر ناچیز و قابل قبولی داشته باشد. از آنجا که در کاربردها، از وزنه‌دهی غیریکنواخت نیز استفاده می‌شود، لذا در اینجا روشی جدید برای کاهش گلبُرگ‌های فرعی در الگوی تشعشعی آنتن‌های آرایه فاز با وزنه‌دهی تی‌لور ارائه شده است. در این روش با استفاده از نتایج به دست آمده از حالت وزنه‌دهی یکنواخت، بردار وزن المان‌های آرایه به گونه‌ای اصلاح می‌شود که کاهش گلبُرگ‌های فرعی در الگوی تغییر یافته محسوس باشد. در این روش نیز می‌توان با توجه به ضرورت طراحی، مقدار SLL را در گلبُرگ‌های فرعی سوم به بعد تا -10 dB نسبت به وزنه‌دهی اولیه تی‌لور کاهش داد، به گونه‌ای که پهنای گلبُرگ اصلی در حدود ۱٪ تا ۲٪ تغییر کرده و بهره آرایه نیز تغییر ناچیز و قابل قبولی داشته باشد. از آنجا که در آنتن‌های آرایه فاز، موقعیت گلبُرگ اصلی را می‌توان به صورت الکترونیکی و با اعمال فاز مناسب در زاویه‌ی دلخواه قرار داد، کارایی این روش در چرخش الگو، در هر دو حالت بررسی و نشان داده شده که این روش نسبت به تغییر موقعیت گلبُرگ اصلی مقاوم است.

کلید واژگان: SLC، ضریب آرایه آنتن، کاهش گلبُرگ‌های فرعی.

۱- مقدمه

آنتن‌های جهتی که سطح دریافت از طریق گلبرگ‌های فرعی آنها پایین باشد، به دلیل کاهش دریافت سیگنال از این گلبرگ‌ها، کاربردهای وسیعی دارند. آنتن‌های آرایه به دلیل امکان تنظیم توزیع دامنه‌ی المان‌ها، برای رسیدن به چنین منظوری مناسبند. در اینجا فرض بر آن است آرایه‌ای خطی منطبق بر محور Z ها وجود دارد که فاصله‌ی بین المان‌های آن برابر با نصف طول موج است. وزن‌دهی یکنواخت چنین آرایه‌ای، هرچند بهره‌ی گلبرگ اصلی بیشینه دارد ولی گلبرگ‌های فرعی آن بالا است [۱]. لذا روشهای تحلیلی و عددی متعددی برای تعیین وزن‌های المان‌های آرایه‌ها وجود دارد که وزن‌های آرایه را برای رسیدن به سطوح گلبرگ فرعی مناسب به دست می‌دهند [۱] تا [۲]. برخی روشهای متکی بر الگوریتم ژنتیک در [۳] و [۴] شرح داده شده است. در سال‌های اخیر روشهای عددی اهمیت ویژه‌ای یافته و روش‌های بهینه‌سازی خطی و غیر خطی نیز در کنار روشهای وقتی توسعه‌ی زیادی یافته‌اند [۵] تا [۷]. پیکربندی این مقاله به صورت زیر است: نخست نمادهای مورد استفاده و پیشنیازها معرفی شده و سپس در بخش دوم روش جدید کاهش گلبرگ‌های فرعی در آرایه‌ای که به صورت یکنواخت وزن‌دهی شده ارائه می‌شود. در بخش سوم با توجه به نتایجی که از وزن‌دهی یکنواخت به دست آمده، بردار وزن غیریکنواخت (تیلور)، به منظور دستیابی به الگوی تشعشعی با سطوح پایین‌تر گلبرگ فرعی و به کمک شبیه‌سازی، اصلاح خواهد شد. در هر یک از دو بخش نتایج در حالتی که گلبرگ اصلی کل فضا را مرور می‌کند نیز بررسی شده است. در بخش پایانی نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- نمادگذاری

میدان کل ناشی از آرایه‌ای با المان‌های مشابه بدون در نظر گرفتن اثر متقابل آنها برابر است با:

$$(۱) \quad \text{ضریب آرایه} \times \text{میدان ناشی از یک المان} = \text{میدان کل}$$

بر اساس این رابطه، در شکل‌گیری میدان تشعشعی آرایه، الگوی هر المان و ضریبی به نام ضریب آرایه - که از این پس به اختصار با AF نشان داده می‌شود- مؤثر است. اگر المان‌های آرایه معلوم فرض شوند، آنچه برای تغییر الگوی تشعشعی باقی می‌ماند، ثابت آرایه است. در حالت کلی ثابت آرایه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱]:

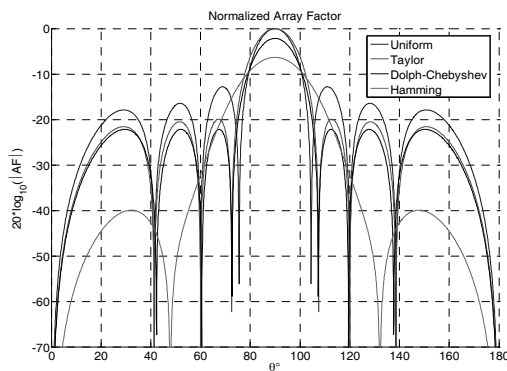
$$(۲) \quad AF = w^H v(k)$$

که w بردار ستونی شامل وزن‌های آرایه و $v(k)$ بردار هدایت است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(۳) \quad w^H = [w^*, w_1^*, \dots, w_{N-1}^*]$$

$$(۴) \quad v(k) = \begin{bmatrix} e^{-jk^T p_1} \\ e^{-jk^T p_2} \\ \vdots \\ e^{-jk^T p_{N-1}} \end{bmatrix}, k = \frac{-\omega}{c} \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{bmatrix}, p_i = \begin{bmatrix} p_{x_i} \\ p_{y_i} \\ p_{z_i} \end{bmatrix}$$

که p_i مکان المان i -ام آرایه است. لذا ضریب آرایه را می‌توان به صورت زیر نوشت:



شکل ۱ ضریب آرایه به ازای بردارهای وزن مختلف با هشت المان

هر یک از سه بردار وزن در نرم افزار متلب با استفاده از سه دستور زیر تولید می شود:

$W_t = \text{taylorwin}(N, \text{nbar}, \text{sll});$

این دستور برداری ستونی به طول N تولید می کند که تعداد nbar گلبرگ فرعی ضریب آرایه ناشی از آن، سطوح $\text{sll}(\text{dB})$ خواهند داشت. سایر گلبرگ های فرعی سطح پایین تری خواهند داشت.

$W_c = \text{chebwin}(N, r);$

این دستور برداری ستونی به طول N تولید می کند که گلبرگ های فرعی ضریب آرایه ناشی از آن، سطح $r(\text{dB})$ خواهند داشت.

$W_H = \text{hamming}(N);$

این دستور برداری ستونی با بعد N تولید می کند که گلبرگ فرعی اول ضریب آرایه ناشی از آن در حدود 40dB است و سایر گلبرگ های فرعی سطح پایین تری دارند.

۳- کاهش گلبرگ فرعی با دو المان کمکی

در روش SLC به منظور حذف جمر از یک یا چند المان به عنوان کانال کمکی استفاده می شود. این کانال های کمکی می توانند جزئی از آرایه اصلی باشند یا به آرایه اضافه شوند. با استفاده از این روش (به کارگیری کانال کمکی)، می توان الگوی گلبرگ های فرعی آرایه اصلی را

$$AF = \sum_{n=1}^N w_n e^{-jk^T p_n} \quad (5)$$

به راحتی می توان نشان داد که ثابت آرایه ی نرمالیزه شده حاصل از وزن دهی یکنواخت به صورت زیر است [۲]:

$$\begin{cases} AF = \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{\sin \frac{N\Phi}{2}}{\sin \frac{\Phi}{2}} \right) \\ \Phi = k_z d, \quad k_z = -\frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta = -k \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (6)$$

در میان روشهای وزن دهی غیر یکنواخت، با هدف دستیابی به باریکترین گلبرگ اصلی و کمترین سطح گلبرگ فرعی، سه روش وزن دهی تیلور، چبیشف و همینگ اهمیت ویژه ای دارند. شکل ۱ ثابت آرایه ی حاصل از چهار نوع وزن دهی را نشان می دهد. در این شکل وزنهای تیلور و چبیشف برای رسیدن به سطح گلبرگ فرعی 20dB تنظیم شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود به ازای وزن دهی واحد، باریکترین پهنای گلبرگ اصلی و بزرگترین گلبرگ های فرعی نتیجه می شود. وزن دهی چبیشف برای رسیدن به سطح گلبرگ فرعی داده شده، کمترین پهنای گلبرگ اصلی را در بین روشهای وزن دهی غیر واحد دارد و تمامی گلبرگ ها را در این سطح نگاه می دارد. وزن دهی تیلور نسبت به چبیشف پهنای گلبرگ اصلی پهن تری را نتیجه می دهد اما دامنه گلبرگ های فرعی الگوی حاصل، رفتار بهتری دارند. وزن دهی همینگ سطح گلبرگ فرعی 40dB را نتیجه می دهد که البته پهنای اشعه بیشتری به همراه دنبال دارد.

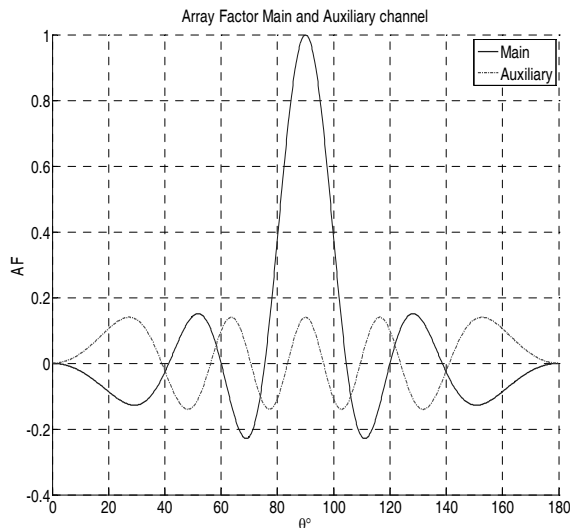
مقارن در دو طرف آرایه قرار گیرند. اگر وزن‌ها به صورت $w=w_1^*=w_2^*$ و فاصله بین دو المان کانال کمکی برابر L در نظر گرفته شود، در این صورت ضریب آرایه‌ی کمکی به صورت زیر خواهد بود:

$$AF_a = we^{jk_z \frac{L}{2}} + we^{-jk_z \frac{L}{2}} = 2w \cos\left(k_z \frac{L}{2} \cos \theta\right) \quad (8)$$

اگر رابطه‌ی خطی زیر بین L ، d و N در نظر گرفته شود $L=(N+m)d$ (m عددی حقیقی و تعیین کننده‌ی فاصله‌ی المان‌های کمکی است که در ادامه تعیین می‌شود) در این صورت:

$$AF_a = 2w \cos\left((N+m) \frac{\Phi}{2}\right) \quad (9)$$

دو رابطه‌ی (۶) و (۹) در شکل (۲) ترسیم شده است.



شکل ۲ ضریب آرایه‌ی کانال اصلی و فرعی

اولین گام در شبیه‌سازی گلبه‌های فرعی، منطبق‌سازی صفرهای این دو منحنی بر یکدیگر است.

شبیه‌سازی کرده و سپس با تفاضل‌گیری بین الگوی آرایه‌ی اصلی و الگوی ناشی از المان‌های کمکی، به الگویی با گلبه‌های فرعی پایین‌تر رسید. از آنجا که تک المان، ضریب آرایه‌ای با اندازه‌ی یک در تمامی جهات دارد، لذا به کمک آن نمی‌توان گلبه‌های فرعی را شبیه‌سازی کرد. از طرفی اگر فرض شود که آرایه‌ای طراحی شده در دست باشد، همواره مطلوب است که با حداقل تغییرات، کاهش گلبه‌های فرعی حاصل شود. به بیانی دیگر، یک شرط اساسی، استفاده از حداقل کانال کمکی است. ضریب آرایه ناشی از دو المان کمکی - که با AF_a نشان داده می‌شود - در حالت کلی از دو مؤلفه به صورت زیر تشکیل شده است:

$$AF_a = w^H v'(k) = \begin{bmatrix} w_1^* & w_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jk^T p'_1} \\ e^{-jk^T p'_2} \end{bmatrix} = w_1^* e^{-jk^T p'_1} + w_2^* e^{-jk^T p'_2} \quad (10)$$

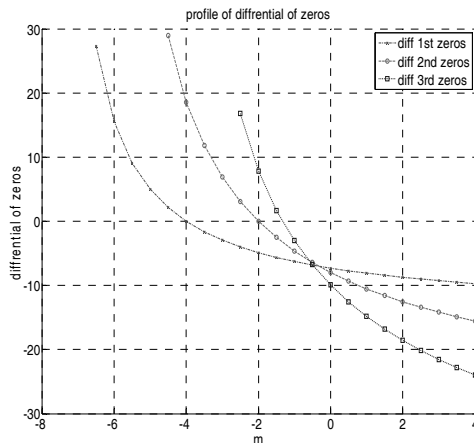
این عبارت در حالت کلی مختلط است. از سویی ضریب آرایه‌ی به دست آمده در رابطه‌ی (۶) - که هدف کاهش گلبه‌های فرعی آن است - حقیقی است. لذا اولین موضوعی که باید در نظر گرفته شود، حقیقی کردن رابطه (۱۰) است. البته این شرط، یعنی حقیقی کردن رابطه‌ی (۱۰) سبب سادگی تحلیل نیز می‌شود. با توجه به رابطه‌ی اوپلر، راه حل ساده‌ای برای این منظور، تنظیم پارامترهای رابطه‌ی (۱۰) به گونه‌ای است که نتیجه، تابعی سینوسی یا کسینوسی شود. چنانچه ضرایب توابع نمایی یکسان و فاز آنها قرینه‌ی یکدیگر باشد، این خواسته تحقق می‌یابد. این بدان معناست که اول باید وزن‌های دو کانال کمکی برابر باشد و دوم المان‌های کمکی باید به صورت

۳-۱- تعیین فاصله‌ی بین المان‌ها

جدول (۱) صفرهای این دو ضریب آرایه را در حالت کلی نشان می‌دهد.

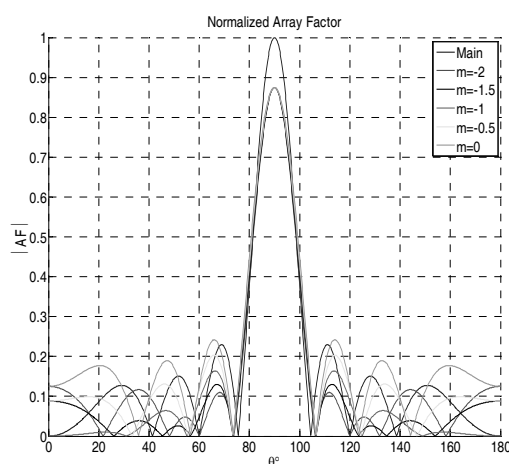
جدول ۱ صفرهای ضریب آرایه‌ی کانال اصلی و فرعی

شماره صفر	θ'_n	θ_n
صفر اول	$\pm \cos^{-1}(\lambda/2L)$	$\pm \cos^{-1}(\lambda/Nd)$
صفر دوم	$\pm \cos^{-1}(3\lambda/2L)$	$\pm \cos^{-1}(2\lambda/Nd)$
صفر سوم	$\pm \cos^{-1}(5\lambda/2L)$	$\pm \cos^{-1}(3\lambda/Nd)$
صفر چهارم	$\pm \cos^{-1}(7\lambda/2L)$	$\pm \cos^{-1}(4\lambda/Nd)$
.....		



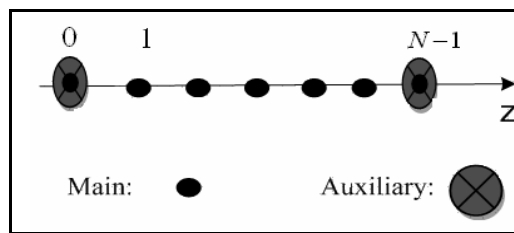
شکل ۳ نمایه‌ی اختلاف بین صفرهای کانال اصلی و کمکی

چنانچه m در بازه ۰ تا ۲- قرار گیرد، اختلاف بین صفرها حداکثر برابر ۱۰ درجه خواهد بود. شکل (۴) اندازه‌ی ضریب آرایه کانال اصلی و متجه ناشی از چند مقدار m در بازه‌ی گفته شده را به ازای وزن دلخواه ۰/۵ نشان می‌دهد. به ازای $m = -1$ کاهش مناسبی در سطح تمامی گلبرگ‌های فرعی نهایی رخ می‌دهد.

شکل ۴ اندازه ضریب آرایه کانال متجه به ازاء مقادیر مختلف m

همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، برای انطباق صفرها بر هم، فقط پارامتر L در اختیار است. با توجه به این که تعداد صفرها بیش از یکی است، جواب یکتایی برای L وجود ندارد. اما از آنجا که هدف انطباق حداکثری صفرها است، اختلاف بین صفرها به عنوان ملاک تعیین L مد نظر قرار می‌گیرد. برای حل مسأله تعداد المان‌های کانال اصلی برابر هشت و نسبت طول موج به فاصله‌ی بین المان‌ها برابر ۲ در نظر گرفته شده است. شکل (۳) منحنی اختلاف بین صفرهای متوالی کانال اصلی و کانال فرعی را به ازای مقادیر مختلف m نشان می‌دهد. ضریب آرایه کانال اصلی در محدوده‌ی دید، شش صفر دارد که به دلیل تقارن مسأله، بررسی فقط برای نیمی از صفرها انجام شده است. از این شکل می‌توان برای انتخاب مقدار مناسب m استفاده کرد. فاصله‌ی بین المان‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که اول، سطح تمامی گلبرگ‌های فرعی کانال حاصل

ساختار بهینه در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶ ساختار بهینه برای کاهش گلبرگ‌های فرعی

با توجه به بحث بالا رابطه‌ی الگو متوجه، AF_R ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

(۱۱)

$$AF_R = \left(\sin \frac{N\Phi}{2} / \sin \frac{\Phi}{2} \right) - 2 \times 0.48 \times \cos \left((N-1) \frac{\Phi}{2} \right)$$

از آنجا که المان‌های کمکی اضافه شده، بر المان‌های اول و آخر منطبق است، لذا با اصلاح بردار وزن از یکنواخت، به صورت زیر می‌توان به کاهش گلبرگ فرعی دست یافت:

$$W = [0.02, 1, 1, \dots, 1, 1, 0.02] \quad (12)$$

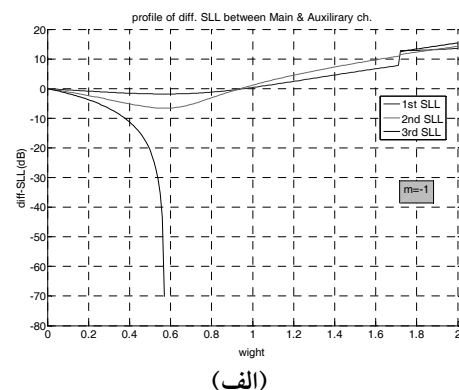
در [۸] با دیدگاه کاهش گلبرگ‌های فرعی، نه فقط معیار تعیین فاصله بین المان‌ها و وزن‌های اعمالی مشخص نیست، بلکه برای رسیدن به کاهش گلبرگ‌ها، دو المان به ابتدا و انتهای کانال اصلی اضافه شده است، در صورتی که در این پژوهش، علاوه بر مشخص بودن روند دستیابی به فاصله‌ی بین المان‌ها و وزن اعمالی، این نتیجه حاصل شده که دو المانی اضافه شده، بر دو المان ابتدایی و انتهایی آرایه اصلی منطبق است. به بیانی دیگر نیازی به اضافه کردن کانال اضافی نبوده و فقط با اصلاح وزن‌های اعمالی به المان‌های آرایه می‌توان به نتیجه مطلوب دست یافت.

۳-۲- تعیین وزن کانال کمکی

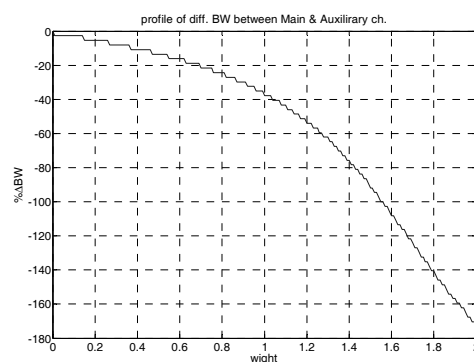
ملاک تعیین وزن‌ها، بهترین تضعیف در گلبرگ‌های فرعی به گونه‌ای است که پهنای گلبرگ اصلی و بهره تغییر چندانی نداشته باشد. به بیانی دیگر روابط ذیل شبیه‌سازی شده است.

$$\begin{cases} \% \Delta BW = \left(\frac{BW_M - BW_R}{BW_M} \right) \times 100 \\ diff \cdot SLL_i = SLL_{iM} - SLL_{iR} \end{cases} \quad (10)$$

اختلاف سطوح گلبرگ فرعی با پهنای اشعه اصلی به ازای مقادیر مختلف وزن به کانال کمکی در شکل (۵) آورده شده است. برای وزن‌های بزرگتر از یک، گلبرگ‌های فرعی افزایش خواهند داشت اما به ازای وزن 0.48 نه فقط تضعیف در سطح گلبرگ‌های فرعی داریم، بلکه تغییر پهنای گلبرگ اصلی نیز چندان زیاد نخواهد بود.

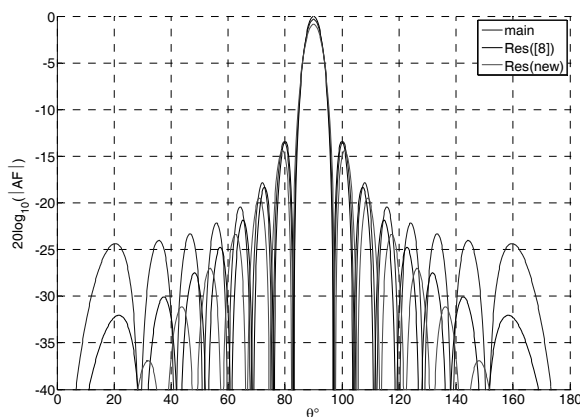


(الف)



(ب)

شکل ۵ اختلاف الف) سطح گلبرگ فرعی ب) پهنای گلبرگ اصلی



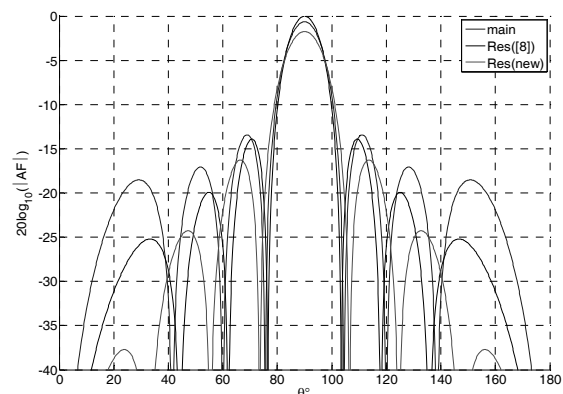
شکل ۸ الگوی ضریب آرایه به ازای تعداد کانال اصلی برابر ۱۶

۴- استفاده از چهار کانال کمکی

در بخش قبل دیدیم که در انطباق صفرهای الگوی ناشی از آرایه‌ی اصلی و کمکی، فقط یک پارامتر در اختیار است. به منظور دستیابی به شرایطی بهتر، یعنی در اختیار بودن تعداد بیشتری پارامتر در فرایند منطبق کردن دو منحنی، فکر افزایش تعداد کانال کمکی به شکل زیر مطالعه شد. اگر فقط یک کانال کمکی دیگر اضافه شود، در این صورت ضریب آرایه شامل سه جمله‌ی نمایی می‌شود که حقیقی کردن آن به راحتی امکان پذیر نیست. لذا تعداد کانال کمکی، برابر چهار المان در نظر گرفته می‌شود. اگر مطابق شکل (۹) فاصله بین دو المان کانال کمکی درونی L_1 و فاصله بین دو المان بیرونی L_2 باشد و اگر $A_1 = w_1^* = w_2^*$ و $A_2 = w_3^* = w_4^*$ در نظر گرفته شود، در این صورت داریم:

$$AF_a = w^H v'(k) = w_1^* e^{-jk^T p'_1} + w_2^* e^{-jk^T p'_2} + w_3^* e^{-jk^T p'_3} + w_4^* e^{-jk^T p'_4} \quad (13)$$

شکل (۷) الگوی کانال اصلی و نتیجه حاصل از دو روش را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود کاهش گلبه‌های فرعی ناشی از این روش بیشتر است هر چند از نظر بهره و پهنای گلبه‌ی اصلی، نتایج حاصل بهتر از [۸] است. اگر کار [۸] را با وجود استفاده از کانال کمکی اضافه شده، نوعی روش وزن دهی آرایه‌ای با ۱۰ المان در نظر گرفته شود، در این صورت این نتایج منطقی است زیرا هرچه تعداد المان‌های آرایه بیشتر باشد، بهره الگوی حاصل از آن آرایه بیشتر و پهنای اشعه کمتر است.



شکل ۷ الگوی ضریب آرایه به ازای تعداد کانال اصلی برابر هشت

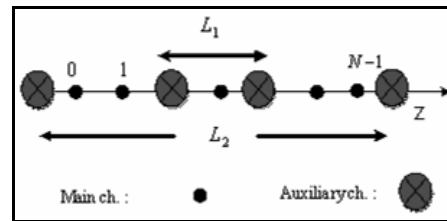
البته اگر تعداد المان‌های آرایه بیشتر باشد اثر نامطلوبی که در بهره و پهنای گلبه‌ی اصلی مشاهده می‌شود، کمتر خواهد بود. به عنوان مثال ضریب آرایه به ازای ۱۶ المان در شکل (۸) ترسیم شده است. در اینجا به منظور سادگی بررسی صفرها، تعداد المان‌ها برابر هشت در نظر گرفته شده، اما روند کار برای هر تعداد دلخواه المان قابل تعمیم است.

هدف منطبق کردن این صف‌های اضافی بر صف‌های کانال اصلی است، لذا این صف‌ها در جدول (۲) لیست شده‌اند.

جدول ۲ صف‌های کانال اصلی و کمکی

شماره صف	θ'_n	θ_n
صف اول	۹۰	$\pm \cos^{-1}(\lambda / Nd)$
صف دوم	$\pm \cos^{-1}(\lambda / md)$	$\pm \cos^{-1}(2\lambda / Nd)$
صف سوم	$\pm \cos^{-1}(2\lambda / md)$	$\pm \cos^{-1}(3\lambda / Nd)$
صف چهارم	$\pm \cos^{-1}(3\lambda / md)$	$\pm \cos^{-1}(4\lambda / Nd)$
...	...	...

از جدول (۲) چند نکته مهم برداشت می‌شود. اول آن که به ازای هر مقدار m حتماً در زاویه ۹۰ درجه (اشعه اصلی) صف وجود دارد. وجود صف در این بخش از الگوی کانال کمکی سبب می‌شود که پس از تفاضل‌گیری، در اشعه اصلی کانال متوجه تضعیف زیادی رخ ندهد. این همچنین به ازای هر مقدار دیگر m رخ می‌دهد و لذا در تعیین مقدار m با هر معیاری این مزیت وجود خواهد داشت. دوم آن که در حالت کلی این صف‌های اضافی بر صف‌های کانال اصلی منطبق نیستند که این از کارایی این روش می‌کاهد. برای هر آرایه‌ی مشخص، این نقص را فقط با یک روش می‌توان برطرف کرد و آن این است که m به گونه‌ای انتخاب شود که به جز صف اجباری که در ۹۰ درجه وجود دارد، سایر صف‌ها خارج از زاویه دید آرایه یعنی محدوده‌ی ۰ تا ۱۸۰ درجه واقع شود. برای آرایه‌ی مورد بحث، شکل (۱۰) تعداد صف‌های اضافی کانال کمکی را برای مقادیر مختلف m نشان می‌دهد.



شکل ۹ آرایه خطی با چهار کانال کمکی

به منظور سادگی تحلیل و با توجه به این که ضریب آرایه‌ی اصلی سینوسی است فرض ساده کننده‌ی قرینه بودن وزن کانال‌های کمکی ($A = -A_1 = A_2$) نیز در نظر گرفته می‌شود. با فرض $L_1 = (N + m_1)d$ و $L_2 = (N + m_2)d$ ضریب آرایه کانال کمکی به صورت زیر در می‌آید:

$$AF_a = -\epsilon A \sin\left(\left(\frac{N}{2} + \frac{m_1 + m_2}{2}\right)\Phi\right) \times \sin\left(\frac{m_1 - m_2}{2}\Phi\right) \quad (14)$$

اگر $m_2 = -m_1 = m$ در این صورت:

$$AF_a = -\epsilon A \sin(N\Phi/2) \sin(m\Phi/2) \quad (15)$$

از این معادله مزیت تعریف رابطه‌ی خطی بین المان‌های کمکی و المان‌های آرایه‌ی اصلی مشخص می‌شود. به بیانی دیگر، از سویی با تعاریف مناسب و ساده و از سوی دیگر با تعداد بیشتر المان کمکی، شباهت میان تابع کانال اصلی و کمکی به میزان زیادی بهبود یافته است.

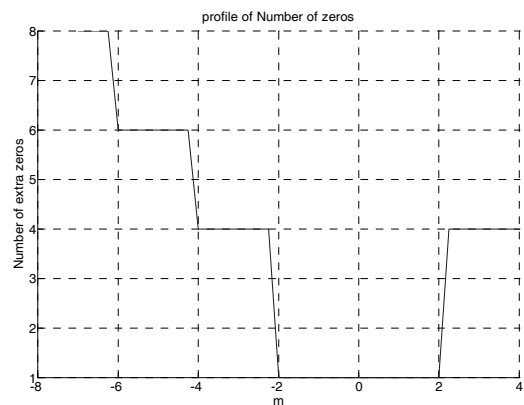
۴-۱- تعیین فاصله بین المان‌های کمکی

صف‌های کانال کمکی از معادله زیر به دست می‌آید:

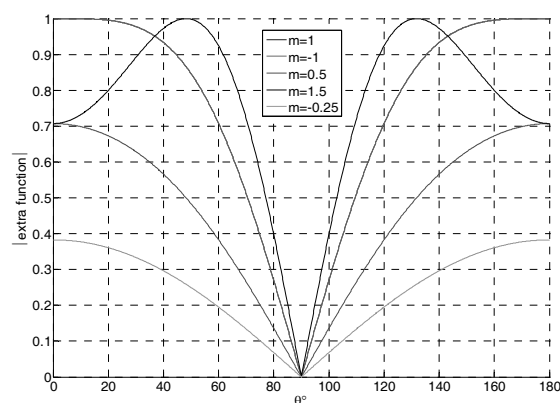
$$\sin(N\Phi/2) = 0, \sin(m\Phi/2) = 0 \quad (16)$$

به ویژه در این حالت علاوه بر صف‌های کانال اصلی، صف‌های دیگری نیز اضافه شده است. از آنجا که در اینجا

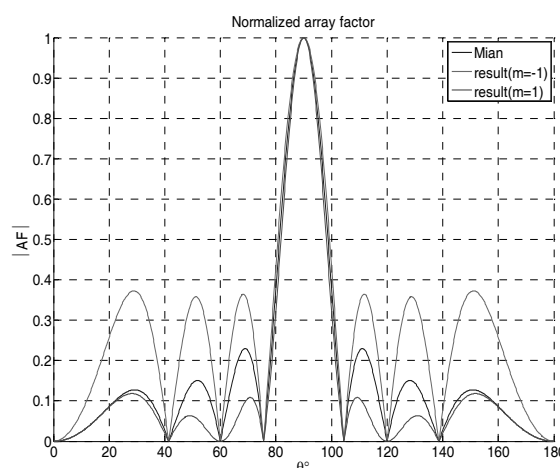
ازای وزن ۰/۲۴، افت مناسبی در هر سه گلبرگ داریم. اندازه‌ی ثابت آرایه به ازای این مقدار در شکل (۱۴) ترسیم شده است. همان‌گونه که دیده شد، در این حالت نیز دو المان از چهار المانی فرضی - که به‌عنوان کانال کمکی در نظر گرفته شده بود - در درون آرایه‌ی اصلی قرار گرفت. در عمل کافیت وزن اعمالی به دو المان یکی مانده به انتهای آرایه‌ی اصلی، اصلاح شده و فقط دو المان با فاصله‌ای برابر فاصله‌ی بین المان‌های کانال اصلی به دو انتهای آرایه‌ی اصلی اضافه شود.



شکل ۱۰ تعداد صفرهای اضافی کانال کمکی



شکل ۱۱ جمله دوم ضریب آرایه کمکی برای مقادیر مختلف m



شکل ۱۲ ضریب آرایه منتجه برای $m=\pm 1$

با توجه به بحثهای بالا، فکر اولیه‌ی روش تعیین مقدار مناسب m مشخص می‌شود. m به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که در زاویه‌ی دید، فقط یک صفر قرار گیرد. به ازای مقادیر m در بازه‌ی ۲- تا ۲، تعداد صفرهای اضافی یکی است. شکل (۱۱) اندازه‌ی عبارت دوم ضریب آرایه کانال کمکی را به ازای چند مقدار m در این بازه نشان می‌دهد. با توجه به زوج بودن این تابع نسبت به m، دو منحنی به ازای ۱ و -۱ روی هم قرار گرفته‌اند. با توجه به این شکل می‌توان گفت که به ازای $m=\pm 1$ ، تغییرات بخش دوم تابع کانال کمکی کم است. این موجب می‌شود که اشعه اصلی پس از اعمال روش، چندان خراب نشود. برای انتخاب مقدار m بین ۱ و -۱، ثابت آرایه کانال منتجه قبل و پس از اعمال این روش در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به این شکل $m=1$ ، به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب می‌شود.

۴-۲- تعیین وزن اعمالی به المان‌های کمکی

در این حالت نیز می‌توان همان معیارهای قبلی را به‌کار برد. نتایج شبیه‌سازی اختلاف سطوح گلبرگ‌های فرعی و اختلاف پهنای اشعه در شکل (۱۳) آورده شده است. به

گلبرگ‌های فرعی سوم، دوم و اول بدون تغییرات چندانی در بهره و پهنای گلبرگ اصلی می‌رسیم.

۵- بررسی اثر چرخش الگو

از ویژگی‌های اصلی آنتن آرایه فاز، چرخش بیم با اعمال فاز مناسب است. در بخش قبل وزن‌های اعمالی حقیقی بود، به بیانی دیگر تغییر موقعیت گلبرگ اصلی وجود نداشت. از آنجا که این روش بر انطباق صفرهای کانال اصلی و کمکی استوار است، لذا چنانچه حرکت الگوی آرایه‌ی اصلی و کمکی با هم هماهنگ شود، نتایج حاصل در بخش قبل حفظ خواهد شد. به بیانی دیگر می‌توان گفت که این روش در برابر چرخش الگو مقاوم است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) الگوی اولیه و اصلاح شده به روش دو و چهار کانال کمکی را در زاویه تنظیم شده‌ی ۱۲۰ درجه نشان می‌دهد.

۶- مسأله در حالت وزن‌دهی غیر یکنواخت

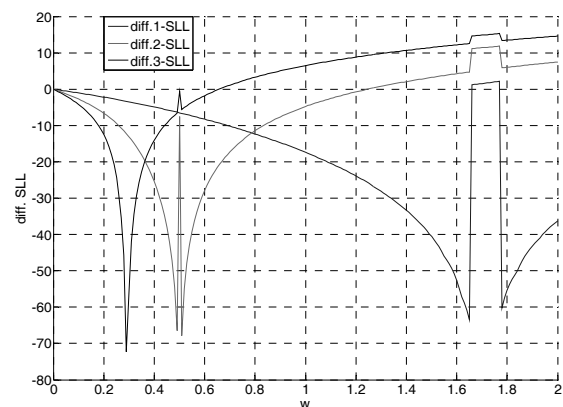
در حالت وزن‌دهی غیر یکنواخت فرض می‌شود که $(-۳۵, ۵, ۲۰)$ Taylorwin؛ تولید کننده‌ی بردار وزن باشد. برای بررسی کارایی روشهای مختلف، علاوه بر ترسیم الگو، از سه پارامتر زیر نیز استفاده شده است:

$$1-\Delta BW=BW_m-BW_r$$

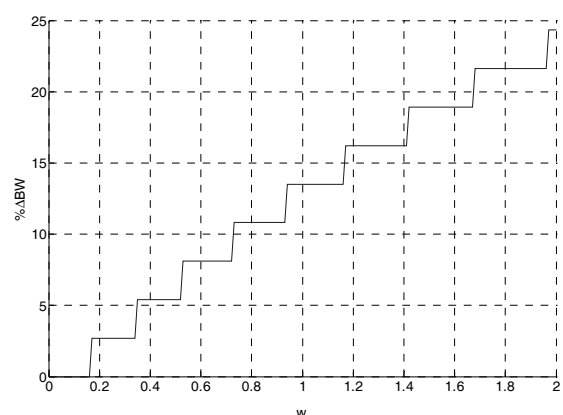
$$2-\Delta SLL_i=SLL_{mi}-SLL_{ri}$$

$$3-\Delta G=G_m-G_r$$

این پارامترها به ترتیب میزان تغییرات پهنای گلبرگ اصلی، سطوح گلبرگ فرعی و بهره را قبل و پس از اعمال روش نشان می‌دهند. ویژگی‌های مهم الگوی نرمالیزه شده در جدول (۳) آورده شده است. در این بخش بردار وزن اولیه به گونه‌ای اصلاح شده که الگوی نتیجه‌ی آن



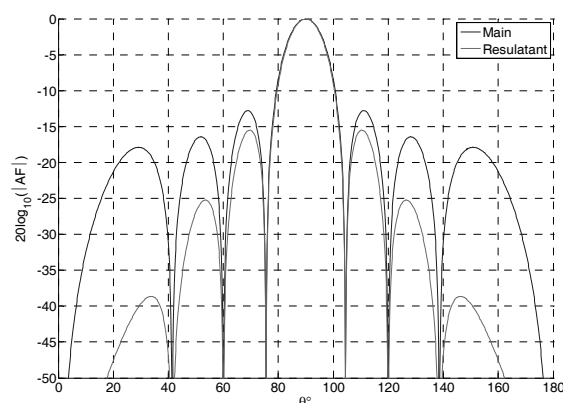
(الف)



(ب)

شکل ۱۳ نمایه اختلاف (الف) سطوح گلبرگ فرعی (ب) پهنای

گلبرگ اصلی



شکل ۱۴ اندازه‌ی ثابت آرایه کانال اصلی و نتیجه

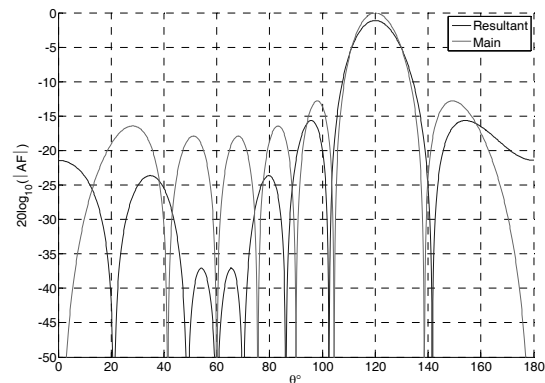
هرچند در این روش دو المان به آرایه‌ی اصلی اضافه شده، اما به بهبودی در حدود ۳۰dB، ۱۰dB و ۵dB در

چیشف و همینگ، می‌توان به الگویی با مشخصات مطلوبتر دست یافت. در این بخش وزن اعمالی به دو المان فرضی که بر المان‌های اول و آخر آرایه‌ی اصلی منطبق است، با انواع روشهای وزن‌دهی معرفی شده در بخش ۲ انتخاب و شبیه‌سازی می‌شود که در ادامه، شرح آنها خواهد آمد.

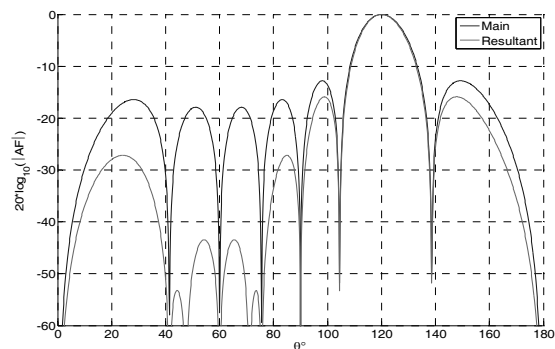
۲-۱- روش اول (اعمال وزن یکنواخت)

ابتدا به روش وزن‌دهی یکنواخت، وزن $0/48$ اعمال و به‌عنوان پارامتر شبیه‌سازی تغییر داده شد. در این حالت به ازای وزن $0/1$ بهترین شرایط از نظر کاهش گلبرگ فرعی رخ می‌دهد.

ویژگی‌های مطلوب‌تری را نسبت به ویژگی‌هایی که در جدول (۳) آورده شده، داشته باشد.



شکل ۱۵ ثابت آرایه در زاویه تنظیم ۱۲۰ درجه با دو کانال کمکی



شکل ۱۶ ثابت آرایه در زاویه تنظیم ۱۲۰ درجه با چهار کانال کمکی

۲-۲- روش دوم (استفاده از بردار تیلور همراه با وزن‌دهی اضافی)

ابتدا بردار وزن تیلور $(20, 5, -50)$ تولید و سپس مؤلفه‌ی اول و آخر این بردار با وزن‌دهی اضافی ۱ به کانال‌های کمکی داده شد. در این حالت $nbar$ و SLL و وزن اضافی به‌عنوان پارامترهای شبیه‌سازی تغییر داده شد که به ازای مقادیر مذکور بهترین نتایج حاصل شد.

جدول ۳ مشخصات الگو با وزن‌دهی $(20, 5, -35)$ taylorwin

BW°	N-Gin(dB)	Side Lobe Level (dB)								
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۶/۸	۰	۳۵/۱۲	۳۵/۰۱	۳۵/۱۳	۳۶/۰۲	۳۶/۰۲	۳۶/۶۸	۳۷/۲۳	۳۷/۵۵	۳۷/۷۲

۲-۳- روش سوم (استفاده از بردار همینگ همراه با وزن‌دهی اضافی)

ابتدا بردار وزن همینگ (20) Hamming تولید شده و سپس مؤلفه‌های اول و آخر این بردار همراه با وزن‌دهی اضافی $1/5$ به کانال‌های کمکی داده شد. در این حالت وزن اضافی به‌عنوان پارامتر شبیه‌سازی تغییر داده شد که به ازای مقدار $1/5$ بهترین نتیجه حاصل شد.

۷- حل مسأله با استفاده از دو کانال کمکی فرضی

در این بخش به روش بخش ۳، با شبیه‌سازی و همچنین با استفاده از روشهای وزن‌دهی غیریکنواخت دیگری مانند

۷-۴- روش چهارم (استفاده از بردار چیشف همراه با وزن‌دهی اضافی)

ابتدا بردار وزن چیشف (Chebwin) (۲۰, ۴۰) تولید شده و سپس مؤلفه‌های اول و آخر این بردار با وزن‌دهی اضافی ۱ به کانال‌های کمکی داده شد. در این حالت r و وزن اضافی به عنوان پارامترهای شبیه‌سازی تغییر داده شد که به ازای مقادیر مذکور بهترین نتایج حاصل شد. ویژگی‌های مربوط به الگوی ناشی از این چهار روش وزن‌دهی در جدول‌های (۴) و (۵) آورده شده است.

جدول ۴ مشخصات سطوح گلبرگ فرعی

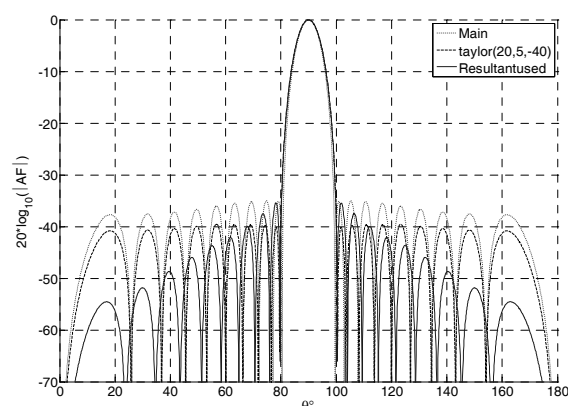
ΔSLL روش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	-۳	-۰/۹	۱/۱	۲/۵	۳/۹	۵/۶	۷/۸	۱۰/۳	۱۲/۴
۲	-۴	-۱	۱/۱	۲/۹	۴/۲	۶/۳	۹/۲	۱۳/۵	۱۹/۱
۳	-۴	-۱	۰/۹	۲/۶	۴/۳	۶/۴	۹/۳	۱۳/۹	۲۰/۶
۴	-۴	-۲	۰/۹	۲/۷	۴/۴	۶/۳	۹/۲	۱۳/۶	۱۹/۵

جدول ۵ مشخصات پهنای گلبرگ اصلی و بهره

روش مشخصه	۱	۲	۳	۴
ΔBW	۰/۱۲°	۰/۱۴°	۰/۱۴°	۰/۱۵°
$\Delta Gain(dB)$	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱۰۵	۰/۱۰۳

۷-۵- روش پنجم (وزن‌دهی تیلور - تیلور همراه با وزن‌دهی اضافی)

با هدف عدم افزایش سطوح گلبرگ فرعی اول و دوم، ضریب آرایه از تفاضل کانال اصلی وزن داده شده با بردار وزن تیلور (Taylorwin) (۲۰, ۵, -۴۰) و کانال کمکی وزن داده شده با مؤلفه‌ی ابتدا و انتهای بردار (Taylorwin) (۲۰, ۵, -۶۰) که با بهره‌ی ۱ برداشته می‌شود، به‌دست آمد. در نامگذاری این روش، بخش اول، بردار وزن استفاده شده برای کانال اصلی، بخش دوم، مربوط به بردار وزن استفاده شده برای کانال کمکی و بخش سوم، بهره‌ای است که مؤلفه‌های ابتدا و انتهای بردار وزن بخش دوم به کانال کمکی اعمال می‌شود. به‌منظور مشاهده‌ی نتیجه‌ی به‌دست آمده، ضریب آرایه در شکل (۱۷) آورده شده است.



شکل ۱۷ الگوی آرایه کانال اصلی اولیه، کانال اصلی استفاده شده و نتیجه

در این جدول دیده می‌شود که هرچند رفتار گلبرگ‌های فرعی تا حد زیادی مطلوب‌تر شده اما در تمامی این روشها سطح گلبرگ فرعی اول به‌طور متوسط در حدود ۳dB افزایش داشت. به‌منظور حل این مشکل در ادامه روشهای دیگری ارائه می‌شود.

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود به این روش نه فقط گلبرگ‌های فرعی اول و دوم در الگوی نتیجه افزایش نیافته، بلکه کاهش مناسبی در سایر گلبرگ‌های فرعی رخ داده است. در این حالت پارامترهای بردارهای تیلور به‌کار رفته و بهره‌ی اعمالی جزو متغیرهای

شبیه‌سازی بود که به ازای مقادیر مذکور بهترین نتایج به‌دست آمد.

۷-۷- روش هفتم (وزن‌دهی تیلور-چبیشف همراه با وزن‌دهی اضافی)

در این روش ضریب آرایه از تفاضل کانال اصلی وزن داده شده با وزن تیلور (۲۰, ۵, -۴۰) و کانال کمکی وزن داده شده با مولفه‌ی ابتدا و انتهای بردار Chebwin (۲۰, ۴۰) که با بهره‌ی ۰/۷ برداشته می‌شود، به‌دست آمد. در این حالت پارامترهای بردار تیلور و بردار چبیشف به‌کار رفته و بهره‌ی اعمالی جزو متغیرهای شبیه‌سازی بود که به ازای مقادیر مذکور بهترین نتایج به‌دست آمد.

۷-۶- روش ششم (وزن‌دهی تیلور - همینگ همراه با وزن‌دهی اضافی)

در این روش ضریب آرایه از تفاضل کانال اصلی وزن داده شده با وزن تیلور (۲۰, ۵, -۴۰) و کانال کمکی وزن داده شده با مؤلفه‌ی ابتدا و انتهای بردار (۲۰) Hamming که با بهره‌ی ۱ برداشته می‌شود، به‌دست آمد. در این حالت پارامترهای بردار تیلور به‌کار رفته و بهره‌ی اعمالی جزو متغیرهای شبیه‌سازی بود که به ازای مقادیر مذکور بهترین نتایج به‌دست آمد.

۷-۸- انتخاب بهترین روش

جدول‌های (۶) و (۷) ویژگی‌های این روشها را نشان می‌دهند.

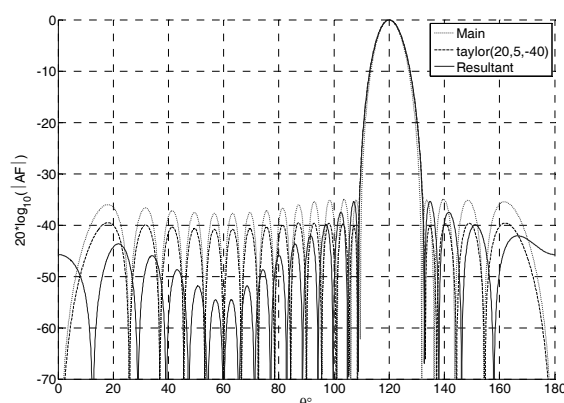
جدول ۶ اختلاف پهنای گلبرگ اصلی و بهره، قبل و پس از اعمال روشهای مختلف

روش مشخصه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
ΔBW	۰/۱۲°	۰/۱۴°	۰/۱۴°	۰/۱۵°	۰/۴۴°	۰/۴۶°	۰/۴۶°
$\Delta Gain(dB)$	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱۰۵	۰/۱۰۳	۰/۰۶۴	۰/۰۷	۰/۰۷

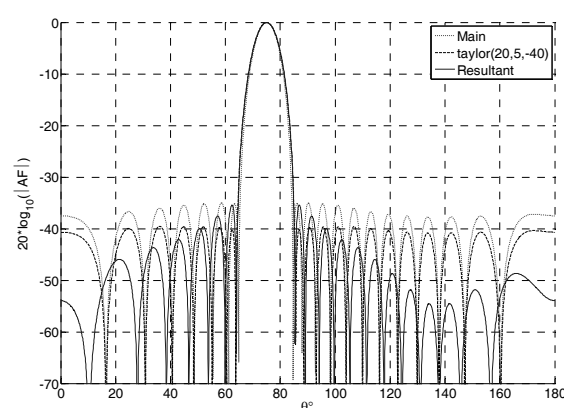
جدول ۷ اختلاف سطوح گلبرگ فرعی قبل و پس از اعمال روشهای مختلف

ΔSLL روش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	-۳/۴۸	-۰/۹۱	۱/۰۸	۲/۵۵	۳/۹۵	۵/۶۴	۷/۷۹	۱۰/۳	۱۲/۳۹
۲	-۳/۹۹۵	-۱/۱۲	۱/۱	۲/۹۷	۴/۲۶	۶/۳۱	۹/۱۹	۱۳/۴۶	۱۹/۱۲
۳	-۴/۰۷	-۱/۲۷	۰/۹۴۸	۲/۶۴۵	۴/۲۸۵	۶/۳۶۵	۹/۳۳۵	۱۳/۸۸۵	۲۰/۵۹۵
۴	-۴/۰۱۸	-۱/۲۴	۰/۹۶	۲/۶۴۷	۴/۲۶۷	۶/۳۱۷	۹/۲۲۷	۱۳/۵۶۷	۱۹/۴۷۷
۵	۰/۲۷۳	۲/۴۹۸	۴/۸۳۷	۶/۶۱۸	۷/۶۲۸	۹/۲۳۸	۱۱/۴۷	۱۴/۲۶۸	۱۶/۷۹۸
۶	-۰/۱۲۵	۲/۱۸	۴/۵۹۳	۶/۵۶	۷/۷۳	۹/۵۶	۱۲/۲۲	۱۶/۰۷	۲۰/۶۲
۷	-۰/۲۲۵	۲/۰۸	۴/۵۳۳	۶/۵۴	۷/۷۶	۹/۶۶	۱۲/۴۸	۱۶/۷۸	۲۲/۶۸

چنانچه آرایه اصلی با اعمال تغییر فاز بزرگترین اشعه خود را در موقعیت زاویه‌ای θ_B قرار دهد، فقط کافی است با اعمال یک وزن مختلط حرکت گلبُرگ اصلی هر دو کانال اصلی و کمکی با هم هماهنگ شود. دامنه‌ی این وزن مختلط همان اعداد به‌دست آمده از تحلیل‌های بخش قبل و فاز آن، بردار هدایت آرایه‌ای است که در آن به جای زاویه‌ی ۹۰، زاویه‌ی θ_B جایگزین شده باشد. در این صورت موقعیت صفرهای هر دو کانال نسبت به هم تغییری نخواهد کرد و پس از تفاضل کاهش گلبُرگ‌ها رخ خواهد داد. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) الگوی ضریب آرایه را در دو زاویه‌ی مختلف گلبُرگ اصلی نشان می‌دهد.

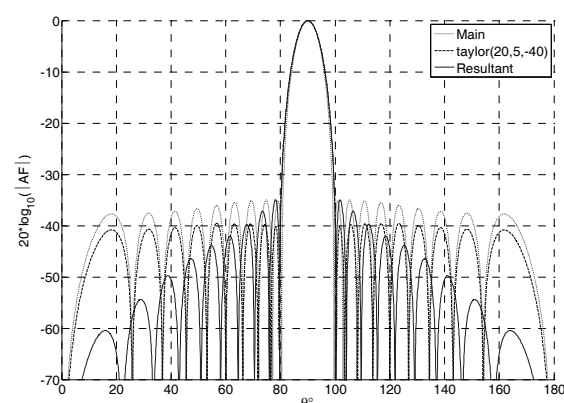


شکل ۱۹ ضریب آرایه‌ی روش هفتم در زاویه‌ی تنظیم ۲۰ درجه



شکل ۲۰ ضریب آرایه‌ی روش هفتم در زاویه‌ی تنظیم ۷۵ درجه

در جدول (۶) دیده می‌شود که برای روشهای مختلف تغییر چندانی در بهره و پهنای گلبُرگ اصلی رخ نمی‌دهد. بهترین اختلاف بین سطوح گلبُرگ فرعی در جدول (۷) مشخص شده است.



شکل ۱۸ الگوهای آرایه در روش ۷

در مجموع روش هفتم بهترین نتیجه را از نظر گلبُرگ فرعی به‌دست می‌دهد. شکل (۱۸) الگوی آرایه کانال اصلی، الگوی ضریب آرایه‌ی به‌کار رفته در روش هفتم و الگوی متوجه را نشان می‌دهد.

۸- بررسی اثر چرخش الگوی تشعشی

در بخش قبل فرض بر آن بود که حداکثر بهره‌ی آرایه در زاویه‌ی ۹۰ درجه قرار دارد. به بیانی دیگر وزن‌های اعمالی اعدادی حقیقی بودند که این به معنای اعمال نشدن فاز است. از آنجا که این روش نیز بر انطباق صفرهای کانال اصلی و کمکی استوار است، چنانچه حرکت الگوی آرایه‌ی اصلی و کمکی با هم هماهنگ شود، نتایج حاصل در بخش قبل حفظ شده و در این شرایط نیز کاهش گلبُرگ‌های فرعی را خواهیم داشت. به بیانی دیگر می‌توان گفت که این روش در برابر چرخش الگو نیز مقاوم است.

۹- نتیجه گیری

در این مقاله روشی ساده به منظور کاهش گلبرگ‌های آنتن آرایه‌ی خطی به روش SLC در حالت وزن‌دهی یکنواخت و غیریکنواخت ارائه شد. همان‌طور که دیده شد، به‌ویژه برای گلبرگ‌های فرعی سوم به بعد، کاهش مطلوبی در حدود -15dB تا -20dB (به ازای تغییر پهنای گلبرگ اصلی و بهره جزئی) نسبت به الگوی حاصل از وزن‌دهی تیلور حاصل شد. همچنین نشان داده شد که این روش در حالت چرخش الگو نیز کارایی خود را حفظ می‌کند. همچنین فرمول بندی این روش در حالت وزن‌دهی غیر یکنواخت در دست بررسی است که در مقالات بعدی ارائه خواهد شد.

۱۰- منابع

- [5] Y. C. Jiao, W. Y. Weir, L. W. Huang, and H. S. Wu, "A new low sidelobe pattern synthesis technique for conformal array", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 41, pp 824-831, June 1993.
- [6] C. A. Olen, and R. T. Compton, "A numerical pattern synthesis for arrays", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 38, pp. 1666-1676, 1990.
- [7] Akdagli, and K. Guney, "Array pattern nulling by phase and position perturbation with the use of modified Tabu search algorithm", Turk Jr. of Elect. Eng., Vol. 10, NO.3, pp. 449-458, 2002.
- [8] Abdullah H. Aboud B.Sc & Khalil A. Sayidmarie B.Sc, "Reduction of Sidelobe Structure in Phased Array by Auxiliary Antenna", IEEE, Vol. 20, NO.5, pp. 239-243, 2004.
- [1] Constantine A. Balanis., *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd Edition John Wiley & Sons, 1997.
- [2] W.L. Stutzman and G.A Thiele, *Antenna theory and Design*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1998.
- [3] K. K. Van, and Y. Lu; "Sidelobe reduction in array pattern synthesis using genetic algorithm", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 45, No.7, pp. 1117-1122, July 1997.
- [4] A. Tennant, M. M. Dawoud, and A. P. Anderson, "Array pattern nulling by element position perturbation using a genetic algorithm", Electronic lett., vol. 30, No.3, pp. 174- 176, Feb. 1994.