

طراحی و ساخت شبکه تغذیه بهینه برای یک آرایه خطی منوپالس

علی جعفرآبادی^۱، کیوان فرورقی^۲

^۱ دانشجوی دکتری مخابرات میدان دانشگاه تربیت مدرس، a.jafarabadi@modares.ac.ir

^۲ استاد دانشگاه تربیت مدرس، keyvan_f@modares.ac.ir

چکیده - در طراحی آرایه منوپالس، برای رسیدن به پترن مناسب و سطح لوب های کناری پایین در هر دو کانال مجموع و تفاضل، توزیع های متفاوتی وجود دارد. برای کانال مجموع، معمولاً از توزیع تیلور یا جیبی شف یا مشابه آنها و برای کانال تفاضل از توزیع بیلیس استفاده می گردد. بدین منظور معمولاً آرایه به چند زیر آرایه تقسیم شده و برای هر زیر آرایه شبکه مجموع و تفاضل جداگانه در نظر گرفته شده و در نهایت خروجی آنها با وزن دهی خاصی باهم ترکیب می گردند. هر چه تعداد زیر آرایه ها کمتر باشد، پیچیدگی و حجم شبکه تغذیه و هزینه ساخت و نگهداری آن بطور موثر کاهش می یابد. در این مقاله برای یک آرایه خطی ۲۴ تایی، یک شبکه تغذیه جدید و بهینه و بدون تلف ایجاد شده است که در آن کل آرایه تنها به سه زیر آرایه ۸ تایی تقسیم شده است. با استفاده از یک شبکه توزیع ابداعی در زیر آرایه میانی و با کمک الگوریتم ژنتیک، یک توزیع با تقریب بسیار نزدیک به تیلور و بیلیس، به ترتیب در کانال های مجموع و تفاضل ایجاد گردیده است. کلید واژه - آرایه خطی، آنتن، شبکه تغذیه، منوپالس.

$$\Delta = \sum_{n=1}^{N/2} c_n \sin\left(\frac{(2n-1)\pi d}{2\lambda} \sin(\theta)\right) \quad (۴)$$

۱- مقدمه

در معادلات ۳ و ۴، Δ سیگنال تفاضل و Σ سیگنال مجموع دو کانال است. برای دستیابی به یک الگوی خوب با سطح گلبرگ کناری قابل قبول در کانال مجموع، معمولاً از توزیع دامنه تیلور یا جیبی شف یا مشابه آنها استفاده می گردد که در این توزیع عناصر وسطی نسبت به عناصر کناری با ضریب دامنه بالاتری تحریک می گردند. در کانال تفاضل برای کسب شرایط مشابه در سطح لوبهای کناری، مناسب ترین توزیع دامنه، توزیع بیلیس (Bayliss) است که در اغلب آرایه های منوپالس از این توزیع استفاده می گردد [۳]. در این جا از پرداختن به معادلات توزیع های تیلور و بیلیس خودداری کرده و فقط به شکل توزیع آنها اکتفا می کنیم. این دو توزیع در شکل ۱ نشان داده شده اند.

آنتن های آرایه منوپالس که اغلب برای ردگیری زاویه در یک یا دو بعد بکار می روند، در سامانه های مخابراتی و راداری کاربرد گسترده ای دارند [۱]. در ساده ترین آرایه خطی منوپالس از دو عنصر آنتن استفاده می گردد. خروجی این دو عنصر در کانال مجموع (Σ) بصورت هم فاز جمع شده و یک بیم جهتی متشکل از همه عناصر آنتن تشکیل می دهد. اما خروجی دو عنصر، در کانال تفاضل (Δ) با فاز ۱۸۰ درجه باهم جمع می گردند. بدین منظور از یک هایبرید ۱۸۰ درجه می توان برای تشکیل کانالهای مجموع و تفاضل استفاده کرد. در یک آرایه خطی متشکل از N عنصر، در حالت کلی برای سیگنالهای مجموع و تفاضل داریم:

[۲]:

$$\Sigma = \sum_{n=-N/2}^{-1} c_n e^{jku_n x_n} + \sum_{n=1}^{N/2} c_n e^{-jku_n x_n} = \sum_{n=1}^{N/2} 2c_n \cos(ku_n x_n) \quad (۱)$$

$$\Delta = \sum_{n=-N/2}^{-1} c_n e^{jku_n x_n} - \sum_{n=1}^{N/2} c_n e^{-jku_n x_n} = \sum_{n=1}^{N/2} 2c_n \sin(ku_n x_n) \quad (۲)$$

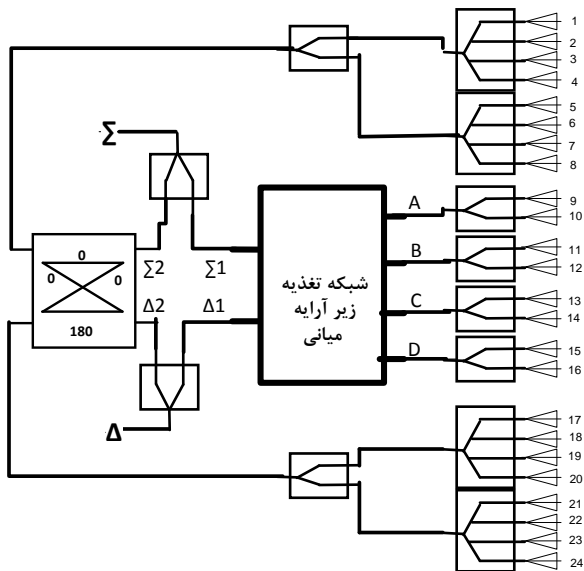
۲- روش های پیاده سازی شبکه توزیع منوپالس

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، این دو توزیع تفاوت های زیادی باهم دارند. عمده ترین مساله این است که در توزیع تیلور عناصر وسطی بیشترین مقدار دامنه را دارند و عناصر کناری حداقل هستند در حالیکه در توزیع بیلیس عناصر وسطی کمترین اشتراک را دارند و بالاترین دامنه مربوط به عناصر میانی بوده و دوباره در عناصر کناری سطح دامنه تحریک کاهش پیدا می کند [۳].

در این معادله c_n دامنه تحریک هر عنصر آرایه و x_n موقعیت هر عنصر و $k = 2\pi/\lambda$ و u_n تابعی سینوسی از زاویه چرخش نسبت به محور تقارن آنتن می باشد. در صورتی که چیدمان عناصر آنتن بصورت خطی و یکنواخت و فاصله گذاری بین عناصر آنتن d باشد، به طور مختصر خواهیم داشت [۲]:

$$\Sigma = \sum_{n=1}^{N/2} c_n \cos\left(\frac{(2n-1)\pi d}{2\lambda} \sin(\theta)\right) \quad (۳)$$

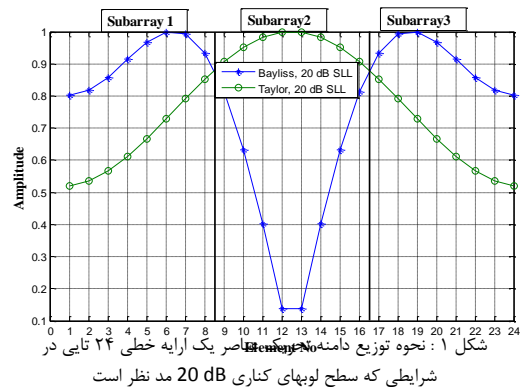
مقدار بوده و بازدهی آن بالا باشد. برای سادگی هر چه بیشتر طرح توزیع، از سه زیر آرایه ۸ تایی استفاده گردیده است. شمای کلی شبکه تغذیه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: بلوک دیاگرام کلی شبکه تغذیه منوپالس با ایجاد سه زیر آرایه

در شکل ۲، خروجی های Σ و Δ نخست بین دو زیر آرایه کناری و همچنین در زیر آرایه وسطی تشکیل شده است و در نهایت توسط دو ترکیب کننده توان و با نسبت های نامساوی، دو خروجی تفاضل و دو خروجی مجموع با هم ترکیب گردیده اند. در هر زیر آرایه که متشکل از ۸ عنصر آنتن می باشد، نسبت تقسیم توان بین عناصر یکسان نمی باشد تا بتوان به یک توزیع مناسب دست پیدا کرد.

نکته قابل توجه در طراحی این است که در داخل زیر آرایه های کناری، مسیر عبور سیگنال و در نتیجه، نسبت تقسیم برای هر دو مسیر مجموع و تفاضل یکسان است و این موضوع بایست در طراحی شبکه مد نظر قرارگیرد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دو توزیع تیلور و بیلیس در دو زیر آرایه کناری تشابه نسبی در نسبت توزیع دارند. چالش اصلی در زیر آرایه میانی می باشد و در این بخش امکان عبور سیگنال های Σ و Δ از یک مسیر واحد وجود ندارد. در این زیر آرایه نسبت توزیع بین کانال های Σ و Δ کاملاً متفاوت است یعنی ماکزیمم و مینییم توزیع ها در وسط آرایه کاملاً متضاد بوده و شیب منحنی دامنه نیز معکوس همدیگر می باشد.



برای تشکیل الگوهای منوپالس مناسب برای کانال های Σ و Δ راهکارهای زیر امکان پذیر است [۳]:

۱. تقسیم خروجی هر عنصر آنتن به دو بخش و ایجاد دو

شبکه تغذیه جداگانه برای کانال های Σ و Δ .

۲. استفاده از شبکه تغذیه دویشته نردبانی (Tandem feed)

۳. استفاده از چند زیر آرایه (Subarray) و تشکیل و

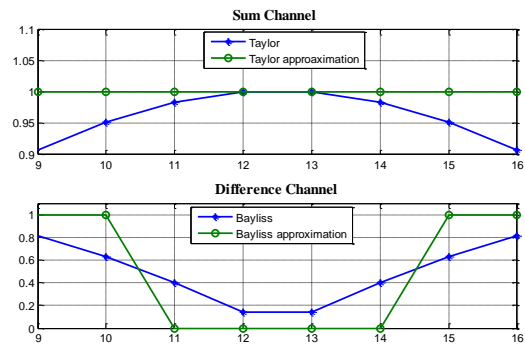
ترکیب جداگانه کانال های Σ و Δ

روش اول در حالت تئوری بهترین انتخاب است چون با آزادی عمل کامل می توان دقیقاً به الگوی دلخواه در هر کانال دست پیدا کرد اما داشتن دو شبکه تغذیه جداگانه، هزینه و پیچیدگی و شلوغی شبکه تغذیه را زیاد کرده و به خصوص در باندهای فرکانسی پایین (نظیر طرح فعلی) که از خطوط انتقال کواکسیال استفاده می گردد، نگهداری و قابلیت اعتماد را پایین می آورد و در عمل کمتر استفاده می گردد. روش دوم از دیرباز در فرکانس های میکروویو که شبکه تغذیه موجبری استفاده می گردد، کاربرد زیادی دارد [۴]. در طرح فعلی پیاده سازی روش دوم با خطوط انتقال کواکسیال امکان پذیر نبوده و ایجاد تزویج های مختلف توسط ماجول های جداگانه، کارایی شبکه تغذیه را پایین می آورد.

در روش سوم نخست کانال های مجموع و تفاضل برای هر زیر آرایه ایجاد می گردد. سپس خروجی زیر آرایه ها با یک ضریب تحریک مناسب دوباره باهم ترکیب می گردند. هرچه تعداد زیر آرایه بیشتر باشد، جواب دقیقتر بوده و به روش اول نزدیکتر شده ولی پیچیدگی شبکه تغذیه بالاتر می رود. در این طرح هدف ما این است که برای یک آرایه خطی ۲۴ تایی به یک طرح مناسب دست پیدا کنیم به طوریکه سطح گلبزرگ های کناری هر دو کانال مجموع و تفاضل کمتر از ۲۰ dB باشد. از طرفی در این طرح تاکید بر این است که تلفات اهمی شبکه تغذیه مینییم

۳- طراحی شبکه تغذیه زیر آرایه میانی

طراحی یک شبکه واحد برای زیر آرایه میانی در شکل ۲ که هر دو توزیع را ایجاد کند، چالش اصلی این مقاله بوده و ابتکار و نوآوری قابل ادعا برای طرح، مربوط به این بخش می باشد. برای حل این موضوع یک تقریب از کانال های Σ و Δ در زیر آرایه میانی در شکل ۳ نشان داده شده است.



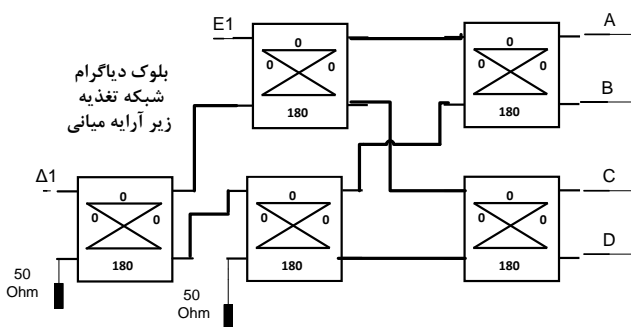
شکل ۳: تقریب توزیع های کانال مجموع و تفاضل، در زیر آرایه میانی

آنگونه که در ادامه خواهیم دید، این دو تقریب پاسخ های نزدیکی به توزیع های اصلی دارند و چالش اصلی نحوه ایجاد این تقریب ها به صورت فیزیکی است. با توجه به شکل های ۲ و ۳ بایست در یابیم که شبکه تغذیه زیر آرایه میانی یک ماجول ۶ پرتی است که در صورتی که سیگنال تزریقی s از پرت $\Sigma 1$ تزریق گردد، بایست با دامنه و فاز یکسان در هر چهار پرت خروجی ظاهر شود. اگر سیگنال تزریقی از پرت $\Delta 1$ باشد، در دو پرت وسطی B و C، هیچ سیگنالی ظاهر نشده و تمام سیگنال بایست در دو پرت کناری A و D این ماجول ظاهر شود و در ضمن اختلاف فاز بین این دو پرت 180° درجه باشد. این موضوع به طور خلاصه در جدول ۱ نشان داده شده است. نکته بسیار مهم در طراحی این ماجول بدون تلف بودن آن است یعنی اینکه نبایست بنا به نیاز تطبیق بودن و ایزوله بودن شبکه، بار تطبیقی در پرت های داخلی آن در مسیر سیگنال لحاظ شود و بخشی از توان ورودی در آنها تلف گردد. لذا مجموع توان خروجی در ۴ پرت، بایست معادل توان تزریقی از هر پرت $\Sigma 1$ و $\Delta 1$ باشد.

جدول ۱: توزیع دامنه و فاز مورد انتظار از شبکه تغذیه زیر آرایه میانی برای سیگنال ورودی S

	Port A	Port B	Port C	Port D
$\Sigma 1$	$\frac{s}{2} < 0^\circ$	$\frac{s}{2} < 0^\circ$	$\frac{s}{2} < 0^\circ$	$\frac{s}{2} < 0^\circ$
$\Delta 1$	$\frac{s}{\sqrt{2}} < 0^\circ$	--	--	$\frac{s}{\sqrt{2}} < 180^\circ$

اگرچه تابع ورودی-خروجی جدول ۱ به ظاهر ساده است اما پیاده سازی آن با یک یا چند قطعه بدون تلف به راحتی امکان پذیر نمی باشد. به علاوه، در صورتی که بخواهیم این نسبت تقسیم توان صورت گرفته و تطبیق پرت های ورودی و خروجی نیز رعایت گردد و ایزولاسیون کافی بین پرت ها نیز وجود داشته باشد، مساله پیچیده تر می شود. در این طرح با یک چیدمان ابتکاری از ۵ قطعه هایبرید 180° درجه و اتصال مناسب پرت های ورودی و خروجی آنها توانستیم به خروجی مورد نظر با تمام شرایط ذکر شده فوق دست پیدا کنیم. بلوک دیاگرام داخلی شبکه تغذیه زیر آرایه میانی در شکل ۴ نشان داده شده است.



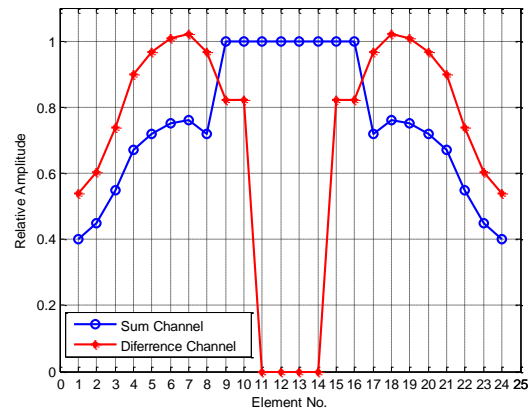
شکل ۴: بلوک دیاگرام داخلی شبکه تغذیه زیر آرایه میانی

همانطور که از شکل ۴ مشاهده می شود، تمام پرت های شبکه تطبیق بوده و بارهای اهمی استفاده شده، در پرت های ایزوله هایبرید ها بکار رفته اند و تلفاتی در مسیر سیگنال ایجاد نمی کنند. ضمناً پاسخ مطابق جدول ۱ است.

۴- محاسبه توزیع بهینه کانال های مجموع و تفاضل

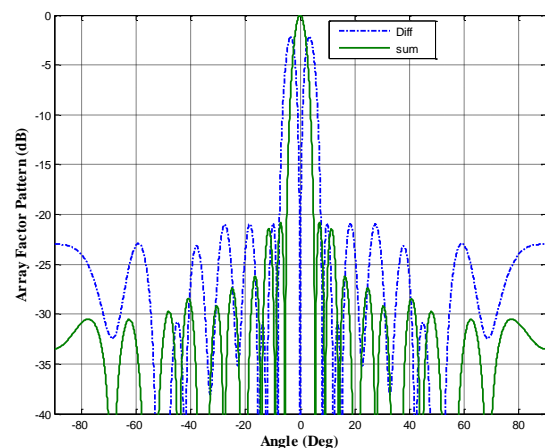
حال که موفق شدیم جواب مورد نظر در شکل ۳ را با مدار نشان داده شده در شکل ۴ پیاده سازی نماییم، دوباره به بلوک دیاگرام اصلی در شکل ۲ باز می گردیم و توزیع بهینه برای کانال های Σ و Δ را بدست می آوریم. با توجه به اینکه بسیاری از قطعات تقسیم/ترکیب کننده، برای مسیرهای تفاضل و مجموع عملکرد یکسان دارند، دستکاری در آنها هر دو توزیع را تحت تاثیر قرار می دهد. بدین منظور، نخست مدل ریاضی این بلوک دیاگرام در نرم افزار متلب پیاده سازی شده و با استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک موجود در این نرم افزار توزیع های کانال مجموع و تفاضل، بصورت توأمان بهینه سازی شده است. سطح لوبهای کناری بدست آمده برای هر توزیع بایست کمتر از 20 dB بوده و بهره ضریب آرایه و پهنای بیم نیم توان فاکتور آرایه آنها بایست تا حد امکان نزدیک به توزیع های تیلور و بیللیس باشد.

توزیع نهایی بهینه شده تحت شرایط فوق، در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، یک شباهت نسبی بین این توزیع ها و توزیع تیلور و بیلیس نشان داده شده در شکل ۱ وجود دارد.



شکل ۵: توزیع بهینه بدست آمده برای کانال های مجموع و تفاضل، با تقریب نزدیک به توزیع تیلور و بیلیس و قابل پیاده سازی با یک شبکه تغذیه

با استفاده از توزیع شکل ۵ پترن تشعشی فاکتور ارایه برای یک آرایه خطی ۲۴ تایی محاسبه شده و در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: بیم تشعشی فاکتور ارایه برای توزیع های نشان داده شده در شکل ۵

شکل ۶ نشان می دهد که سطح لوبهای کناری برای هر دو کانال مجموع و تفاضل، در سطح قابل قبول -22dB قرار دارد و مشخصه مورد نظر در این طرح را پوشش می دهد.

محاسبات نشان می دهد که جهت دهی فاکتور آرایه برای یک آرایه خطی ۲۴ تایی با فاصله گذاری 0.54λ و در نظر گرفتن توزیع تیلور با شرط بدترین سطح لوب کناری -22dB ، برابر با

13.8 dB است. مقدار جهت دهی برای توزیع شکل ۵ نیز برابر 13.8 dB بدست آمده است. همچنین پهنای بیم پترن فاکتور ارایه برای تیلور با شرایط فوق، برابر با $4/51$ درجه است. برای توزیع شکل ۵، پهنای بیم $4/54$ بدست می آید که تفاوت بسیار کمی با تیلور دارد. تشابه بسیار بالا در بیم اصلی دو طرح نیز نشان می دهد که در شیب منوپالس که تعیین کننده دقت ردگیری زاویه است، تفاوت بین توزیع بدست آمده با روش استاندارد بسیار ناچیز است.

با توجه به مطالب فوق می توان نتیجه گرفت که آرایه خطی با توزیع بدست آمده در شکل ۵، ضمن اینکه انحراف بسیار ناچیزی در مقایسه با توزیع های تیلور و بیلیس دارد، این مزیت بسیار بزرگ را دارد که به جای استفاده از شبکه های تغذیه جداگانه برای توزیع های کانال مجموع و تفاضل، از یک شبکه تغذیه برای پیاده سازی هر دو توزیع استفاده شده است که منجر به سادگی و کاهش هزینه ساخت و نگهداری پایین برای شبکه تغذیه می گردد.

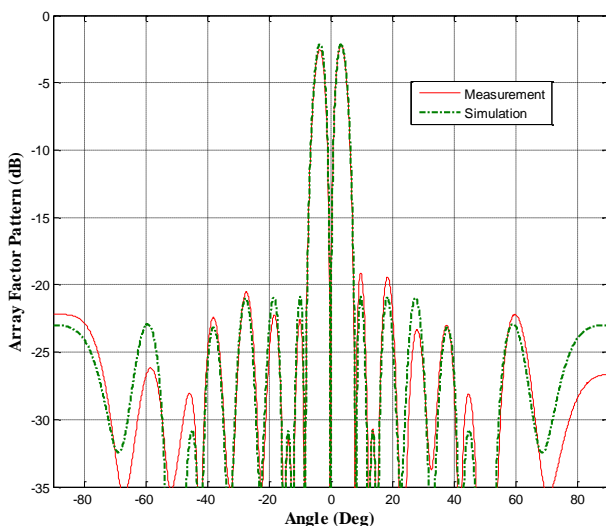
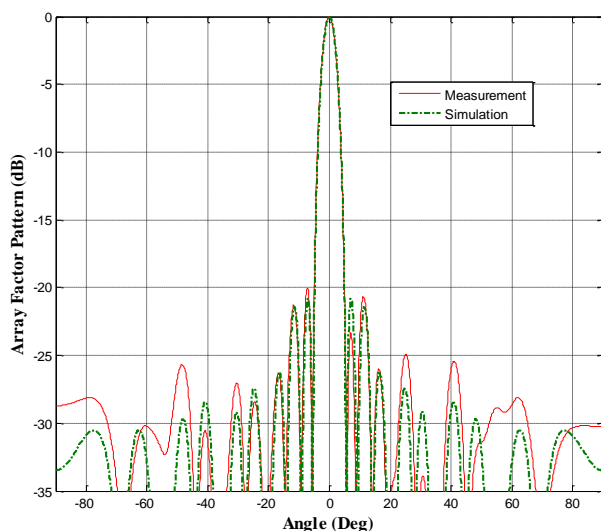
در گذشته طرح هایی برای آرایه های خطی ارائه شده است اما تقریب استفاده شده در آنها بالا بوده و پاسخ بدست آمده از آنها نیازمندی های طرح فعلی را پوشش نمی دهد [۵].

۵- نتایج اندازه گیری

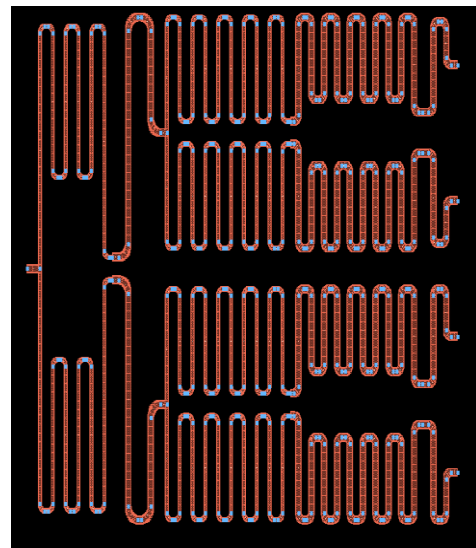
بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۲، بطور کامل در نرم افزار ADS پیاده سازی شده است و در این راستا مدل های واقعی ترکیب کننده ها و مقسم های توان استفاده شده اند و پیاده سازی همه آنها توسط مدارات میکرواستریپ انجام گردیده است. با توجه به کاربرد این طرح در باند فرکانسی پایین و بزرگ شدن طول خطوط ربع طول موج در مقسم های توان، خطوط انتقال به صورت مارپیچ پیاده سازی شده تا اندازه فیزیکی جعبه های مقسم توان کوچک گردد. لازم به ذکر است که اثر کوپلینگ بین خطوط مارپیچ، در شبیه سازی توسط نرم افزار ADS نظر گرفته است. به عنوان مثال مدار چاپی یک نمونه مقسم توان ۱ به ۴ که بصورت ویلکینسون دو مرحله ای و نامتقارن پیاده سازی شده، در شکل ۷ نشان داده شده است.

برای پیاده سازی شبکه تغذیه نشان داده شده در شکل ۴ از قطعات هایبرید آماده در بازار استفاده گردید. مقسم های توان به دلیل نیاز به تقسیم نامتقارن توان و با توجه به اینکه نسبت دامنه خروجی آنها برای هر بخش متفاوت است، قابل خرید نبوده و به این دلیل همه آنها جداگانه طراحی و ساخته شده اند.

مقادیر خطای فاز و دامنه اندازه گیری شده منشا اثر متعددی دارد که از جمله آنها می توان به اثر هم طول نبودن کابل های کواکسیال ارتباطی در شبکه تغذیه، خطای ساخت مقسم های توان، در نظر نگرفتن اثر کانکتورهای ماجول ها و همچنین خطای جزئی امپدانس ورودی و خروجی و عدم تطبیق کامل پرت های ورودی و خروجی ماجول ها اشاره کرد. حال بایست ببینیم که با توجه به مقادیر خطای فاز و دامنه، پترن تشعشی کانال های مجموع و تفاضل چگونه است. با توجه به مقادیر اندازه گیری شده فاز و دامنه، شکل پترن تشعشی فاکتور ارایه در شکل ۹ نشان داده شده است.

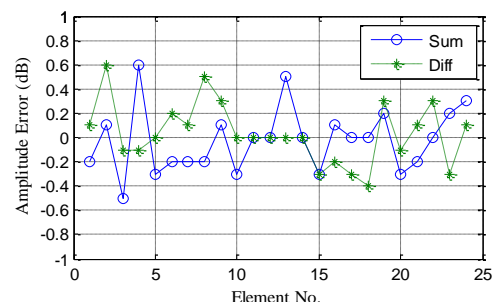
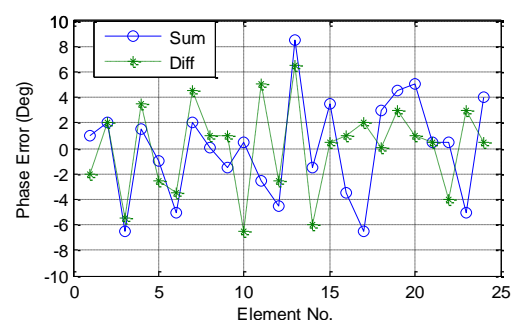


شکل ۹: شکل پترن تشعشی فاکتور ارایه برای کانال های مجموع و تفاضل با توجه به مقادیر اندازه گیری شده دامنه و فاز پرت های خروجی شبکه تغذیه، در مقایسه با مقادیر شبیه سازی



شکل ۷: مدار چاپی یک مقسم توان ۱ به ۴ نامتقارن دو مرحله ای، پیاده سازی شده به روش ویلکینسون

پس از ساخت و مونتاژ همه قطعات و مدارات، مطابق بلوک دیاگرام شکل ۲، همه آنها با شبکه کابل کواکسیال به هم متصل گردید. مدار حاصل یک شبکه ۲۶ پرتی است که دو پرت ورودی Σ و Δ داشته و ۲۴ پرت خروجی دارد. پس از تطبیق همه پرت های خروجی با بار ۵۰ اهم، تست دامنه و فاز انتقالی از هر یک از پرت های Σ و Δ به هر یک از پرت های ۲۴ گانه انجام گرفت. انحراف فاز و دامنه اندازه گیری شده توسط دستگاه Network Analyzer، نسبت به مقدار مورد انتظار بدست آمده در شبیه سازی، در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: اختلاف فاز و دامنه اندازه گیری شده با شبیه سازی

بیلیس پیاده سازی شده و در ضمن شبکه تغذیه در همه پرت ها دارای ایزولاسیون و منطبق و بدون تلف می باشد. نتایج بدست آمده برای جهت دهی کانال مجموع و سطح لوب های کناری ان و همچنین شیب کانال تفاضل در مقایسه با روش های موجود در دنیا وضعیت مطلوبی دارد [۴].

سپاسگزاری

از کلیه عزیزانی که در مونتاژ و تست کابل ها و شبکه تغذیه ما را یاری نمودند، تشکر و قدردانی می نمایم .

مراجع

- [1] Samuel M. Sherman, David K. Barton, Monopulse Principles and Techniques, Artech House, 2011
- [2] Jafar R. Mohammed, "An alternative method for difference Pattern formation in monopulse antenna", Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 42, 45-54, 2013
- [3] R.C. Hansen, *phased Array Antennas*. John Wiley & Sons, pp. 49-87, 2010.
- [4] Kinsey, R. R., Tandem Series-Feed System for Array Antennas, US Patent 3,509,577, April 1970
- [5] J. Thraves, S. R. Fairweather, "Compact 24 Horn Linear Array" THORN EMI Electronics Limited, U K, 1992
- [6] L. Manica, P. Rocca, and A. Massa, "Monopulse Compromise Arrays-A Review", Technical Report #DISI-11-157, Eledia Research Group, January 2013

نتیجه بدست آمده در شکل ۹ نشان می دهد که سطح لوب کناری اول کانال مجموع در سمت چپ حدود ۲dB بالا آمده است اما همچنان نیازمندی طرح در رسیدن به سطح لوب کناری ۲۰dB را پوشش می دهد. در کانال تفاضل دو لوب کناری اول سمت راست، با افزایش حدود ۳dB به مقدار ۱۹dB رسیده اند که حدود ۱dB از مقدار مورد انتظار (۲۰dB) بدتر است. انتظار می رود که با بهینه سازی طول کابل های شبکه تغذیه و تنظیم دقیق آنها این مشکل برطرف گردد.

با توجه به اینکه در همه مسیرها از مقسم های توان ویلکینسون استفاده شده و به جای قطعات هایبرید ۱۸۰ درجه نیز از قطعات موجود در بازار که ایزولاسیون خروجی بالایی دارند، استفاده گردیده است، نتایج اندازه گیری نشان داد که همه پرت های ورودی و خروجی شبکه تغذیه، حداقل ایزولاسیون ۲۰dB را دارا می باشند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک طرح جدید و بهینه برای پیاده سازی شبکه تغذیه منوپالس پیشنهاد گردید که بدون نیاز به شبکه تغذیه جداگانه برای کانال های مجموع و تفاضل، هر دو کانال، با یک شبکه تغذیه واحد و با تقریب بسیار نزدیک به توزیع تیلور و