

تثبیت تغییرات مرکز فاز آنتنهای متناوب لگاریتمی

محمد اسحاق میرزاپور^۱، سید محمد جواد رضوی^۲، سید حسین محسنی ارمکی^۳

۱ کارشناسی ارشد برق مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، Mmri.mirzapour@gmail.com

۲ مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳ مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۶ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۲۷

چکیده

در این مقاله، روش جدیدی برای تثبیت تغییرات مرکز فاز آنتنهای متناوب لگاریتمی، بر مبنای اصلاح تغییرات فاز جریان تحریک المانهای آنتن، ارائه شده است. بمنظور تصدیق این روش، آنتن فوق پهن باند متناوب لگاریتمی سطحی، برای پوشش باندهای L و $S(1-4\text{GHz})$ ، با 12 المان طراحی گردید. برای خطی سازی تغییرات فاز جریان تحریک المانهای آنتن، انواع ساختارهای ریزنوار ناقص و خطوط ریزنوار پیچ دار مورد بررسی قرار گرفته و ساختار ریزنوار پیچ دار، به عنوان بهترین ساختار، با بالاترین محدوده دینامیکی در ایجاد تغییر فاز بر مبنای فواصل محدود بین المانها و تطبیق امپدانس آنتن، مورد استفاده قرار گرفت. آنتن اصلاح شده نهایی، تنها با 6 ساختار ریزنوار پیچ دار، طراحی و ساخته شد. نتایج شبیه سازی و اندازه گیری نشان داد که تغییرات مرکز فاز این آنتن بدون تغییر در ابعاد آن، اصلاح گردیده و الگوهای تشعشی در دو حالت، از تطابق مناسبی برخوردار می باشند. بعلاوه، پاسخ تلفات انعکاسی آنتن حاکی از 4.5GHz ، پهنای باند 10dB - می باشد.

کلیدواژه

مرکز فاز، آنتن متناوب لگاریتمی، آنتن فوق پهن باند، ساختارهای ریزنوار تغییر دهنده فاز

مقدمه

زیادی داشته باشد، خطای اندازه گیری، بیش از حد قابل قبول بوده و منجر به باطل شدن آزمایش می گردد [۳]. بنابراین کاهش تغییرات مرکز فاز این آنتن، یکی از دغدغه های بسیار مهم در استفاده از آن می باشد. با توجه به اینکه هر آنتنی چندین ناحیه فعال دارد (بسته به پهنای باند آن) و هر ناحیه فعالی نیز مراکز فاز (وابسته به فرکانس) مربوط به خود را دارد، بنابراین نمی توان آنتن متناوب لگاریتمی با یک مرکز فاز داشت [۵]، از اینرو تغییرات مرکز فاز باید اصلاح گردد.

در این مقاله، روش جدیدی جهت اصلاح تغییرات مرکز فاز، بر اساس اصلاح تغییرات فاز جریان تحریک، ارائه شده است. در این روش که دامنه کاربرد آن، همه انواع آنتنهای متناوب لگاریتمی است، تغییرات مرکز فاز از دید هر ناحیه فعال تثبیت گردیده است. از اینرو از دید کلی اصلاح تغییرات مرکز فاز و از دید هر ناحیه فعال، آنتنی با مرکز فاز ثابت خواهیم داشت. بمنظور تصدیق این روش، از آنتن متناوب لگاریتمی سطحی^۵ (PLPDA) استفاده گردیده است. این آنتن، بواسطه برخورداری از ویژگیهایی همچون وزن کم، ساخت آسان، قابلیت حمل و نقل و هزینه ساخت پایین، از جمله پرکاربردترین آنتنهای متناوب لگاریتمی به شمار می رود.

یکی از ساختارهایی که بسیار به مفهوم آنتنهای مستقل از فرکانس نزدیک است، ساختارهای متناوب لگاریتمی هستند که در سال ۱۹۵۷ توسط دوهمال و ایزبل معرفی شدند [۱]. ساختار این آنتنها تنها بوسیله زوایا تعریف نمی شود، از اینرو، به صورت کامل مستقل از فرکانس نیستند. این آنتنها به عنوان تغذیه آنتن انعکاسی [۲]، در آزمایشهای سازگاری الکترومغناطیسی^۱ [۳] و جهت یابی^۲ (DF) [۴] بکار می روند. اما عیب عمده آنها، تغییرات زیاد مرکز فاز نسبت به فرکانس، به خصوص در ارتباطات پهن باند می باشد [۳-۱].

تغذیه آنتن انعکاسی باید در کانون آن قرار گیرد، اگر مرکز فاز این تغذیه در بازه فرکانسی تغییر یابد، بدان معنی است که تغذیه آنتن در کانون آن قرار نداشته و از اینرو خطاهایی در فاز ایجاد می گردد. به عنوان مثالی دیگر از اهمیت عدم تغییر مرکز فاز، می توان به آزمایشهای سازگاری الکترومغناطیسی اشاره نمود. این آزمایشها، بر اساس ساختار آزمایشی^۳ انجام می گیرند، که در استانداردهایی همچون استاندارد نظامی ۴۶۱ و یا تجاری IET/EN، معین گردیده است. بر اساس آنها، تجهیزات مورد آزمایش^۴ (EUT) باید در فاصله مشخصی از آنتن قرار گیرند، اگر این فاصله، با تغییر فرکانس تغییر

1. ElectroMagnetic Compatibility
2. Direction Finding
3. Test Setup
4. Equipment Under Test

5. Planar Log-Periodic Dipole Array

$$|r| = \frac{dv}{df} \left(\frac{C}{2\pi} \right) \quad (3)$$

با توجه به رابطه (۳) واضح است که برای ثابت بودن مرکز فاز (مستقل از تغییرات فرکانس)، تغییرات فاز جریان تحریک المانهای آنتن (سمت راست تساوی)، باید به فرم تابعی خطی بر حسب فرکانس باشد، بنابراین

$$\psi = Mf + N \quad (4)$$

با توجه به اینکه المانهای با فرکانس پایین‌تر، در انتهای بزرگ آنتن قرار دارند و در نتیجه جریان تحریک، طول بیشتری را برای رسیدن به المان طی می‌کند، فاز جریان، در فرکانس پایین‌تر منفی‌تر می‌شود، بنابراین، فاز با کاهش فرکانس، منفی‌تر می‌شود که این به معنای مثبت بودن نرخ تغییرات فاز بر حسب نرخ افزایش فرکانس می‌باشد، بنابراین M در رابطه (۴) می‌بایست عددی ثابت، غیر صفر و مثبت باشد. حال اگر رابطه (۴) را بر حسب شماره المانها جایگذاری کنیم (شماره‌گذاری از نقطه تغذیه در نظر گرفته می‌شود) منجر به منفی شدن نرخ تغییرات فاز بر حسب شماره المانها می‌گردد.

از رابطه (۳) به نظر می‌رسد، که می‌توان مرکز فاز را برای کل بازه فرکانسی ثابت نمود، در صورتیکه فاز جریان تحریک نیز محدوده قابل قبولی دارد که در آن شکل الگوی تشعشعی تغییر نمی‌کند، بنابراین در هر بازه فرکانسی تا حدودی می‌توان فاز جریان تحریک را تغییر داد و خارج از آن محدوده، شکل الگوی تشعشعی، خراب خواهد شد. از اینرو، نمی‌توان تغییرات مرکز فاز را برای کل بازه فرکانسی (شامل چندین ناحیه فعال)، ثابت نمود [۵]. بنابراین می‌توان انتظار داشت که اگر تغییرات فاز جریان تحریک، نسبت به تغییر فرکانسهای هر ناحیه فعال، خطی باشد، مراکز فاز آنها نیز (یک بازه فرکانسی)، بدون تغییر خواهد ماند.

مهمترین علت تغییر مرکز فاز این آنتن، نوع هندسه آن می‌باشد. مرکز فاز یک آنتن دوقطبی تک، در وسط آن و به عبارت دیگر در نقطه تغذیه می‌باشد [۵]. با آرایه شدن المانها و اثر بارگذاری امپدانس آنها، بر روی خط انتقال مرکزی (خط تغذیه)، فاز جریان تحریک المانها غیرخطی شده و منجر به تغییر مراکز فاز می‌گردد. با توجه به اینکه بارگذاری حاصل از المانها، اجتناب ناپذیر است، بنابراین برای اصلاح تغییرات مراکز فاز، باید تغییرات فاز جریان تحریک المانها را به صورت خطی اصلاح نمود، برای این منظور، می‌بایست از ساختارهای تغییردهنده فاز مناسب با نوع آنتن متناوب لگاریتمی مورد نظر، استفاده نمود.

در ادامه مرکز فاز و عوامل موثر در تغییرات آن، به همراه روش پیشنهادی جهت اصلاح این تغییرات شرح داده شده است. سپس آنتن فوق پهن باند PLPDA برای پوشش باندهای فرکانسی L و S (۱-۴GHz) طراحی شده و تغییرات مرکز فاز آن بوسیله ساختارهای ریزنوار پیچ‌دار، اصلاح گردیده است. آنتن اصلاح شده^۶ (MPLPDA) نهایی، بر روی زیرلایه شرکت 3M با ضخامت ۰٫۷۶۲ میلی‌متر و ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی ۲٫۵۵ و تانژانت تلفات ۰٫۰۲ ساخته و مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار گرفته است.

مرکز فاز

مرکز فاز یک آنتن، نقطه‌ای بر روی آنتن است که از دید میدان دور، امواج کروی آنتن از آن نقطه انتشار یافته و میدان منتشره دارای فاز ثابتی است، به عبارت دیگر، از دید میدان دور، آنتن جهت‌داری در این نقطه قرار دارد که چنین الگوی تشعشعی را نتیجه می‌دهد [۲، ۳، ۸-۵]. در کلیه مباحثی که فاصله از آنتن تعریف می‌شود، منظور همان فاصله تا مرکز فاز آن آنتن می‌باشد، بنابراین تغییرات شدید این نقطه نسبت به فرکانس مشکلات عدیده‌ای (نسبت به نوع کاربرد) را پدید خواهد آورد.

آنتنهای متناوب لگاریتمی، دارای سه ناحیه فعال، انتقال و انعکاس هستند [۲]. ناحیه فعال^۷، شامل المانهایی است که طول آنها بین ۰٫۳۵ تا ۰٫۵۴ طول موج می‌باشد [۵]. ناحیه فعال، با افزایش فرکانس، از المانهای بزرگ به سمت المانهای کوچک حرکت می‌کند، همچنین انرژی، از المانهای فعال کوچک به سمت المانهای غیر فعال بزرگ، به شدت کاهش می‌یابد (وجود ناحیه فعال در فرکانس بالا)، از اینرو المانهای انتهایی آنتن تشعشع ناچیزی دارند. این حرکت ناحیه فعال و مرکز فاز مربوطه به آن، بویژه در آنتنهای پهن‌بند یک ویژگی نامطلوب به شمار می‌رود [۵و۲].

مولفه اصلی میدان الکتریکی هر آنتنی در میدان دور و در یک جهت خاص (به ازای θ و ϕ مشخص)، معمولاً به صورت زیر است

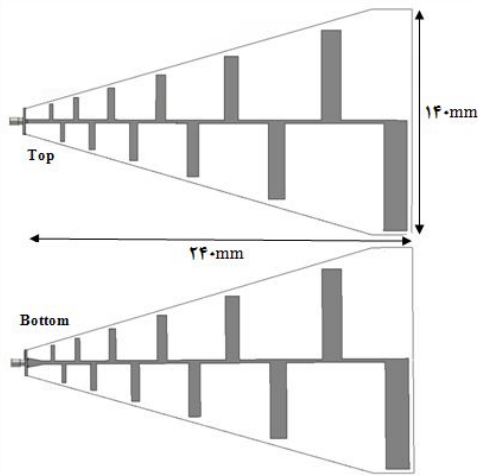
$$E = |E|e^{-j(Kr+\psi)} \quad (1)$$

که در آن دامنه میدان بصورت تابعی از $1/r$ در نظر گرفته شده است و ψ نمایانگر فاز جریان تحریک^۸ (ECPH) آنتن می‌باشد. با توجه به تعریف مرکز فاز و رابطه (۱)، r مرکز فاز می‌باشد. بنابراین، اگر لازم باشد تغییری در مرکز فاز آنتن پدید آید، تنها می‌توان بر روی فاز جریان تحریک المانها کار کرد. امواج منتشره از آنتن در میدان دور بصورت موج صفحه‌ای می‌باشند، از اینرو باید دارای فاز ثابتی باشند، بنابراین

$$Kr + \psi = A \quad (2)$$

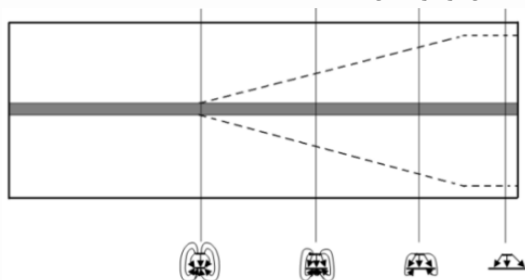
با مشتق‌گیری از رابطه (۲) بر حسب فرکانس، داریم

6. Modified PLPDA
7. Active Region
8. Excitation Current Phase



شکل ۱. ساختار آنتن فوق پهن‌بند متناوب لگاریتمی سطحی

خط ریزنوار باریک شونده^{۱۱}، اولین بار توسط آقای کلوفنشتاین و بمنظور تطبیق امپدانس در خطوط ریزنوار، در سال ۱۹۵۶ ارائه گردید [۱۰]. از این ساختار، در بخشی از خط تغذیه از نوع متعادل آنتن و در لایه زیرین آن استفاده گردید. اساس این بالن که در شکل ۲ نشان داده شده است، بر مبنای تبدیل مود می‌باشد. مطابق شکل ۲، مود سیگنال ورودی که شبه TEM می‌باشد در طول این بالن، به TEM کامل (خط متعادل) تبدیل می‌گردد. مهمترین ویژگی این بالن نسبت به بالن کلاسیک در آنتنهای متناوب لگاریتمی سطحی (که عبارتست از امتداد شیلد بیرونی کابل کوکسیال در یک طرف آنتن و روی خط تغذیه مرکزی و اتصال هادی درونی کابل به خط تغذیه طرف دیگر آنتن بوسیله گذر آن از یک سوراخ^{۱۲} ایجاد شده در زیرلایه)، قابلیت بکارگیری ساختارهای تغییر دهنده فاز بمنظور جبران‌سازی فاز جریان تحریک می‌باشد. از دیگر مزایا آن می‌توان به کوچک بودن (طول ۱۰ mm)، سادگی در ساخت و تطبیق امپدانس فوق پهن‌بند آن اشاره نمود، بطوریکه با تقریب خوبی می‌توان آنرا به عنوان بالنی مستقل از فرکانس دانست.



شکل ۲. ساختار بالن مبدل مود

نتایج شبیه‌سازی نشان داد، که تلفات انعکاسی این آنتن، (شکل ۳) نه تنها در بازه مورد نظر کمتر از ۱۰ dB است، بلکه پهنای باند

طراحی آنتن فوق پهن‌بند PLPDA

نقطه شروع در طراحی آنتن متناوب لگاریتمی، انتخاب راستاوری است. با در نظر داشتن راستاوری و استفاده از نمودار کارل [۹] ضرایب فاصله (σ) و مقیاس (τ) ، و با دانستن پهنای باند مورد نظر، تعداد المانهای لازم بدست می‌آید. در جدول ۱، تعداد المانهای لازم برای پوشش دو باند L و S، به ازای ضرایب مقیاس مختلف به همراه راستاوری حاصل، محاسبه و آورده شده است.

جدول ۱. تعداد المانها و راستاوری‌های آنتن PLPDA به ازای ضرایب مقیاس مختلف در باند L و S

ضریب مقیاس	تعداد المانهای لازم	راستاوری به ازای ضریب فاصله بهینه (dB)
۰.۸	۱۰	$8 < D < 8.5$
۰.۸۲	۱۱	$8 < D < 8.5$
۰.۸۴	۱۲	$8.5 < D < 9$
۰.۸۶	۱۴	$8.5 < D < 9$
۰.۸۸	۱۶	$9 < D < 9.5$
۰.۹	۱۹	$9 < D < 9.5$
۰.۹۲	۲۲	$9.5 < D < 10$
۰.۹۴	۳۰	$10.5 < D < 11$
۰.۹۶	۴۲	$11.5 < D < 12$

نکته‌ای که باید مد نظر داشت این است که افزایش تعداد المانها، منجر به افزایش تعداد نواحی فعال، افزایش بهره و البته افزایش تغییرات مرکز فاز می‌شود. از اینرو ضریب مقیاس ۰.۸۴ انتخاب و آنتن متناوب لگاریتمی سطحی با ۱۲ المان و ابعاد $140 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ طراحی و شبیه‌سازی گردید که در شکل ۱ نشان داده شده است. پارامترهای اصلی آنتن طراحی شده در جدول ۲ لیست شده است، که در آن α نصف زاویه محوری و N تعداد المانهای آنتن می‌باشد.

جدول ۲. پارامترهای آنتن متناوب لگاریتمی سطحی برای پوشش باند L و S

τ	σ_{opt}	α (Degree)	N	L/W
۰.۸۴	۰.۱۵	۱۴/۹	۱۲	۹/۱۶۲۲

طول المانهای آنتن، بر اساس کوچکترین و بزرگترین فرکانس باند، طراحی و با استفاده از ضریب مقیاس بدست می‌آید. در یک طراحی ایده‌آل، نسبت L/W (نسب طول به عرض) برای کلیه المانها برابر یک عدد ثابت می‌باشد [۲].

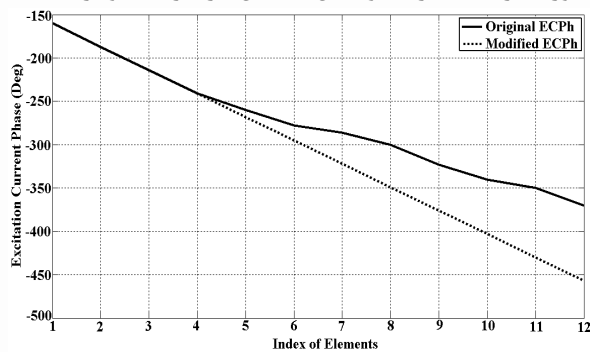
خط تغذیه این آنتن، از نوع متعادل^۹ است و برای اتصال آن به کانکتور SMA و در نتیجه کابل هم محور، که ذاتا نامتعادل^{۱۰} است، باید از بالن استفاده شود. برای این طراحی، ساختاری تحت عنوان بالن مبدل مود، طراحی و استفاده گردیده است.

11. Microstrip Tapered line
12. Via

9. Balance
10. Unbalance

که در آن N ، شماره المان مورد نظر و $MECPH$ ، فاز جریان تحریک اصلاح شده می‌باشد. به این ترتیب، مقادیری که فاز جریان تحریک المانها باید داشته باشند، محاسبه گردیده و در جدول ۳، در کنار فاز جریان تحریک اصلی داده شده است. با مشخص شدن اختلاف فاز بین حالت اصلی و اصلاح شده، کافیسیت، مقادیر مورد نظر را با ساختارهای تغییر دهنده فاز مناسب، بسازیم.

مقادیر فاز اصلاح شده که در جدول ۳ داده شده است، مقادیر مرجع می‌باشند، به این معنی که در نهایت فاز جریان تحریک هر المانی باید برابر آن گردد. بدلیل آنکه مقادیر فاز المانها، مستقل از یکدیگر نبوده و اصلاح یکی، منجر به تغییر در دیگری می‌شود، نمی‌توان به صورت یکجا فاز المانها را اصلاح نمود، بلکه باید بصورت مرحله به مرحله و المان به المان فازها را به نمودار



شکل ۵. مقایسه فاز جریان تحریک المانها در حالت عادی و خطی سازی شده

خطی، منتقل نموده و اختلاف فاز المان بعدی، مجدداً محاسبه و اصلاح گردد. این پروسه بازگشتی تا اصلاح فاز آخرین المان ادامه می‌یابد.

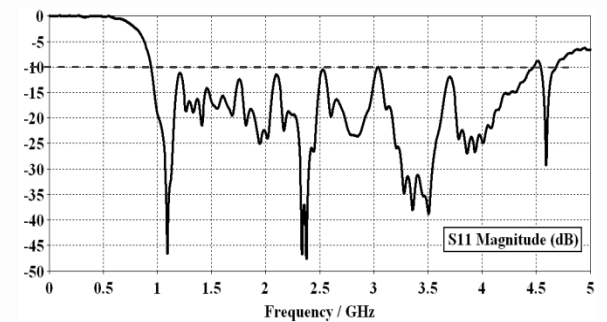
جدول ۳. مقادیر فازهای جریان تحریک معمولی و خطی سازی شده

Index of Elements	OECPH(Deg)	MECPH(Deg)
۱	-۱۶۰	-۱۶۰
۲	-۱۸۷	-۱۸۷
۳	-۲۱۵	-۲۱۵
۴	-۲۴۱	-۲۴۱
۵	-۲۶۰	-۲۶۸
۶	-۲۷۵	-۲۹۵
۷	-۲۸۶	-۳۲۲
۸	-۳۰۰	-۳۴۹
۹	-۳۲۳	-۳۷۶
۱۰	-۳۴۰	-۴۰۳
۱۱	-۳۵۰	-۴۳۰
۱۲	-۳۷۰	-۴۵۷

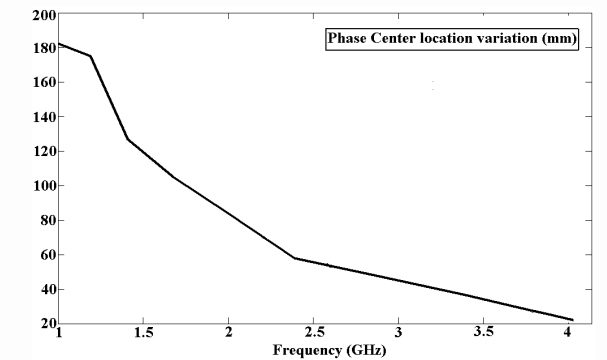
۱۰dB - آن (VSWR کمتر از ۲) در حدود ۴/۵GHz می‌باشد. تغییرات مرکز فاز این آنتن، در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل واضح است که رابطه (۳) برای این آنتن صادق نبوده و تغییرات فاز جریان تحریک نسبت به فرکانس، غیرخطی می‌باشد که منجر به کاهش فاصله مرکز فاز تا مبدا (انتهای باریک آنتن) با افزایش فرکانس می‌گردد.

طراحی آنتن فوق پهن‌بند MPLPDA

بمنظور اصلاح تغییرات مرکز فاز آنتن، می‌بایست فاز جریان تحریک المانها را بدست آورده و خطی‌سازی کنیم، این امر توسط نرم افزار CST محاسبه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشخص است که تا المان چهارم، تغییرات فاز جریان تحریک به صورت خطی است اما از این المان به بعد تغییرات را به صورت غیرخطی داریم، در نتیجه باید این تغییرات غیرخطی به صورت خطی اصلاح گردد.



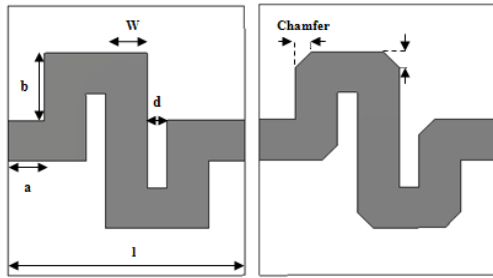
شکل ۳. تلفات برگشتی آنتن متناوب لگاریتمی سطحی



شکل ۴. تغییرات مرکز فاز آنتن

از اینرو، می‌بایست بهترین شیب را برای این خطی‌سازی بدست آوریم. با توجه به این نکته که در المانهای ابتدایی تغییرات کاملاً به صورت خطی است و با استناد به این مطلب که برای نوشتن معادله یک خط وجود دو نقطه کافیسیت، براحتی معادله خط بهینه به فرم زیر بدست می‌آید که در شکل ۵ و در کنار فاز اصلی ترسیم شده است.

$$MECPH = -(27N + 133) \quad (5)$$

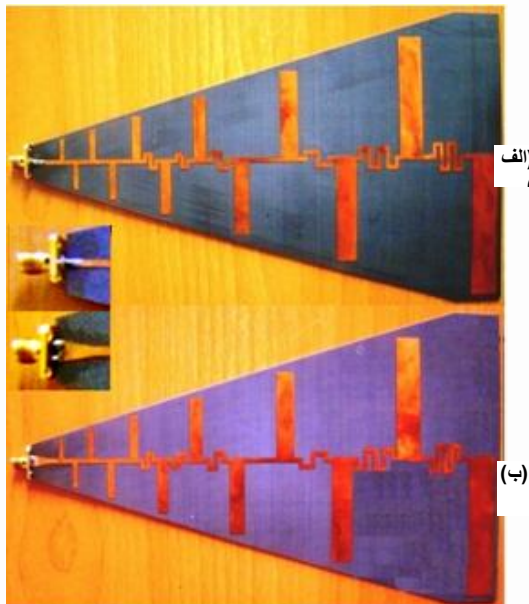


شکل ۷. پارامترهای یک سلول از ساختار ریزنوار پیچدار

طول خط کل لازم برای ایجاد تغییر فاز مورد نظر، از رابطه (۶) بدست می‌آید. با توجه به ثابت بودن مقدار W (پهنای خط تغذیه) و مشخص بودن l (فاصله دو المان مجاور در آرایه)، پارامترهای مشخص شده در شکل ۷، محاسبه و بهینه‌سازی گردید. این مقادیر به همراه تعداد سلولهای لازم، در جدول ۴ داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

آنتن اصلاح شده (MPLPDA) نهایی، بر روی زیرلایه شرکت 3M با ضخامت ۰/۷۶۲ میلی‌متر و ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی ۲/۵۵ و تانژانت تلفات ۰/۰۲ ساخته شد که در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به گستردگی بازه فرکانسی، اندازه‌گیری‌ها بصورت نمونه و تنها در ۴ فرکانس (۱، ۲، ۳ و ۴ گیگاهرتز) انجام پذیرفت.



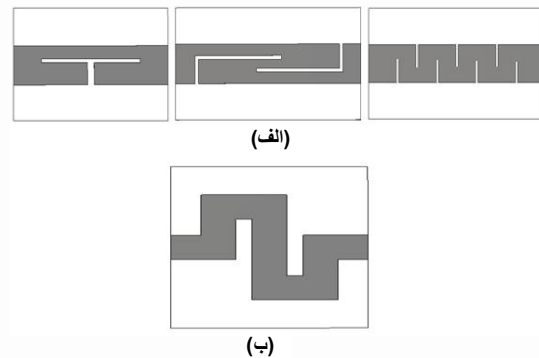
شکل ۸. نمونه ساخته شده آنتن اصلاح شده
(الف) سطح بالایی (ب) سطح پایینی

ساختارهای تغییردهنده فاز

با توجه به اینکه تغییر فازهای لازم، منفی هستند، با افزایش طول خطوط انتقال، براحتی قابل پیاده‌سازی و ساخت می‌باشند. در واقع افزایش طول خط، منجر به افزایش طول الکتریکی و ایجاد تغییر فاز منفی، مطابق رابطه (۶) می‌گردد. اما این امر مستلزم افزایش بعد آنتن خواهد شد، که مطلوب ما نیست.

$$\varphi = -\beta L \quad (۶)$$

بنابراین، به ساختارهایی نیاز داریم که طول الکتریکی را افزایش دهند، بدون اینکه تغییری در طول فیزیکی (که مقدار آنرا فاصله بین دو المان مجاور در آنتن تعیین می‌کند) پدید آورند و یا بگونه‌ای طول فیزیکی را افزایش دهند که بعد آنتن تغییری نیابد. از اینرو، انواع ساختارهای ریزنوار ناقص^{۱۴} (DMS) [۱۱] (که اساس همه آنها افزایش طول الکتریکی بدون تغییر در طول فیزیکی است) و ریزنوار پیچدار^{۱۵} (تغییر طول فیزیکی بدون تغییر ابعاد آنتن) که در شکل ۶ نشان داده شده است، مورد مطالعه، بررسی و طراحی قرار گرفت.



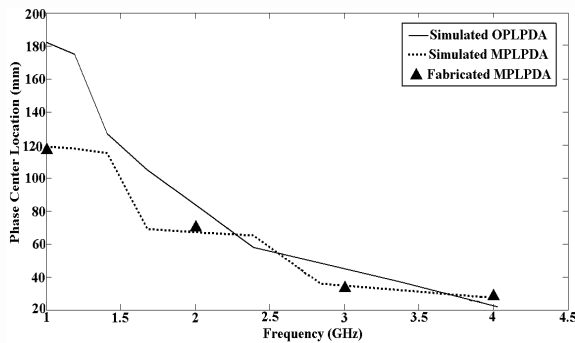
شکل ۶. انواع ساختارهای تغییردهنده فاز
(الف) ساختارهای DMS (ب) ساختار ریزنوار پیچدار

مطالعه و بررسی نتایج شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داد، که ساختارهای DMS دارای محدوده دینامیکی کمی بوده و تنها برای تغییر فازهای کم (در حدود ۲۰ درجه) در آن طول فیزیکی خاص (فاصله بین المانهای مجاور در آنتن)، قابل استفاده می‌باشند. البته، اعوجاجی در سیگنال خروجی این ساختارها، بخصوص در فرکانسهای بالا نیز مشاهده گردید، که قابل پیش‌بینی بود. اما خطوط ریزنوار پیچدار، دارای محدوده دینامیکی مناسبی بوده و هر تغییر فازی را می‌توان به کمک آنها ساخت. بمنظور حذف اثر اعوجاجی گوشه‌های ۹۰ درجه، می‌بایست آنها را اریب^{۱۶} (گوشه‌های ۴۵ درجه) کرد [۱۲]. یک سلول از این ساختار به همراه پارامترهایش، در شکل ۷ نشان داده شده است.

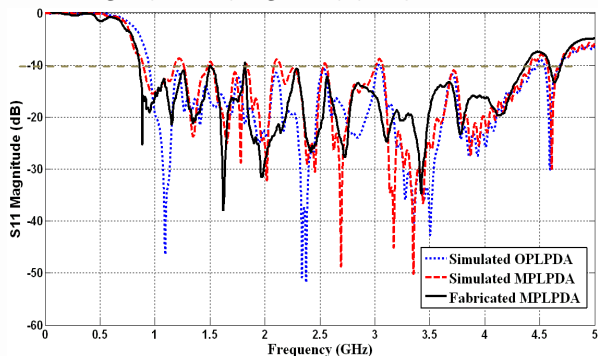
14. Defected Microstrip structure
15. Microstrip Meander Structure
16. Chamfer

جدول ۴. تعداد و پارامترهای سلول ریزنوار پیچ‌دار

Index of Elements	l (mm)	W (mm)	Number of cell	a (mm)	b (mm)	d (mm)	Chamfer(mm)
۶	۹,۴۰۱۵	۲,۱۱۳۸	۱	۱,۰۳	۳,۲	۰,۵	۰,۸
۷	۱۱,۱۹۲۲	۲,۱۱۳۸	۱	۱,۸۲۵	۲,۸	۰,۶	۰,۸
۸	۱۳,۳۲۴	۲,۱۱۳۸	۱	۱,۹۹۱	۳,۵	۱,۵	۰,۵
۱۰	۱۸,۸۸۳۲	۲,۱۱۳۸	۱	۲,۲۷۱	۳	۴	۰,۵
۱۱	۲۲,۴۸	۲,۱۱۳۸	۲	۰,۹۵۶	۴,۳۲	۲,۵	۰,۵
۱۲	۲۶,۷۶۱۹	۲,۱۱۳۸	۲	۵,۰۹۶	۶	۱,۵	۰,۵



شکل ۹. تغییرات مرکز فاز آنتن‌ها بر حسب فرکانس



شکل ۱۰. تلفات انعکاسی آنتن‌ها

با توجه به ساختارهایی که برای اصلاح فاز استفاده گردید، بهره آنتن اصلاح شده بطور متوسط در حدود ۲dB کاهش یافت، که البته با توجه به ساختار ریزنوار پیچدار اجتناب ناپذیر می‌باشد (شکل ۱۱). اگر توزیع جریان بر روی آنتن را بصورت کلی زیر در نظر بگیریم

$$I_{\text{equivalent}} = |I_{\text{equivalent}}| e^{-\gamma l}, \quad \gamma = \alpha + j\beta \quad (7)$$

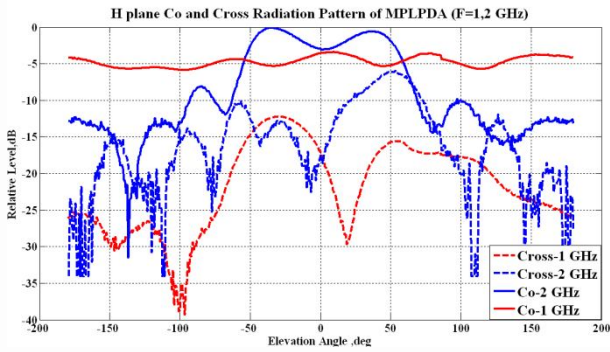
تلفات جریان و به عبارتی سیگنال به شدت به طول مسیر حرکت آن بستگی خواهد داشت زیرا در شرایط مساوی، تغییر محیطی و ماهیتی نداشته و فقط طول مسیر تغییر می‌یابد. به همین دلیل ساختار ریزنوار پیچدار در کنار ایجاد تغییر فاز با بالاترین محدوده دینامیکی، بصورت اجتناب ناپذیری کاهش راندمان آنتن و به عبارت دیگر بهره می‌باشد. از طرفی بدلیل آنکه برای جبران فاز در المانهای پایانی آنتن (فرکانس پایین) نیازمند استفاده از دو سلول ریزنوار پیچدار شده‌ایم، این مسئله بصورت تشدید شده‌ای در فرکانسهای پایین نمایان گردیده است (شکل ۱۱).

اندازه‌گیری مرکز فاز

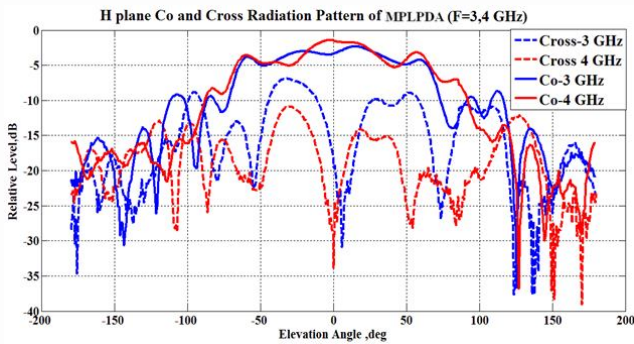
اساس روش اندازه‌گیری مرکز فاز آنتن، بر تعریف آن استوار است. بدین معنا که، اگر آنتن در مرکز فازش قرار داشته باشد، انتظار می‌رود که در میدان دور، دارای الگوی فاز یکنواختی باشد [۷] که البته با توجه به روابط (۱) و (۲) قابل استنباط می‌باشد. از اینرو باید موقعیت آنتن را در فرکانس مورد نظر در اندازه‌گیری، نسبت به موقعیت مرجعش (نقطه تغذیه)، تغییر مکان داده و الگوی فاز را مشاهده نماییم، برای این منظور از ساختاری جهت حرکت خودکار آنتن در دو بعد استفاده می‌گردد [۷]. اما می‌توان با فرض صحیح بودن نتایج شبیه‌سازی، پروسه اندازه‌گیری را ساده‌تر و سریع‌تر نموده و در نهایت درستی فرض اولیه را اثبات نمود. با توجه به اینکه میدانیم (از نتایج شبیه‌سازی)، موقعیت مرکز فاز آنتن MPLPDA، بر روی محور آنتن تغییر می‌یابد، بنابراین، ابتدا، بررسی در بعد دیگر را کنار گذاشته و تغییرات محوری را نیز در حدود موقعیت حاصله از نتایج شبیه‌سازی بررسی نمودیم. با تعیین دقیق نقطه مرکز فاز که با تقریب مناسبی ($\pm 2\text{mm}$) برابر نتایج شبیه‌سازی گردید، آنتن را در بعد دیگر حرکت داده و بدین ترتیب صحیح بودن فرض‌های اولیه را اثبات نمودیم. این مطلب، حاکی از نتایج قابل قبول شبیه‌سازی دارد (شایان ذکر است که پروسه بررسی بعد دوم، تنها در یک فرکانس انجام گرفته است).

بررسی نتایج

نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نشان داد که تغییرات مرکز فاز آنتن اصلی بدون تغییر در ابعاد آن، اصلاح شده و در هر ناحیه فعال، با تقریب مناسبی ($\pm 2\text{mm}$) برابر مقدار ثابتی گردیده است (شکل ۹). بعلاوه، مقایسه تلفات انعکاسی آنتن‌ها که در شکل ۱۰ نشان داده شده، حاکی از آن است که تطبیق آنتن اصلاح شده، همچنان در محدوده قابل قبول بوده و پهنای باند -۱۰dB آن نیز همچون آنتن اصلی در حدود ۴,۵GHz می‌باشد. همانطوریکه مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود دارد.



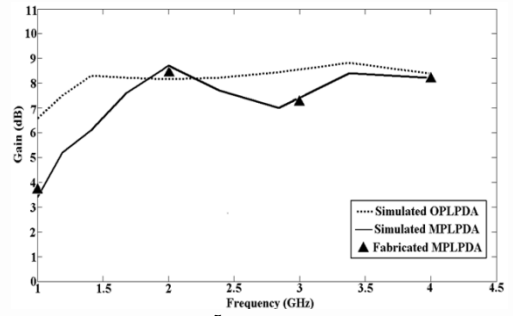
شکل ۱۳. الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده موازی و متقاطع صفحه H آنتن MPLPDA در فرکانسهای ۱ و ۲ گیگاهرتز



شکل ۱۴. الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده موازی و متقاطع صفحه H آنتن MPLPDA در فرکانسهای ۳ و ۴ گیگاهرتز

نتیجه گیری

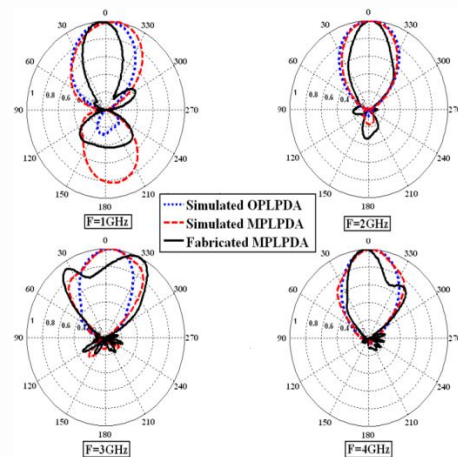
در این مقاله، نشان دادیم که با اصلاح فاز جریان تحریک المانهای آنتن متناوب لگاریتمی، می توان تغییرات مرکز فاز آن را نسبت به فرکانس و در هر ناحیه فعال ثابت نمود. دامنه کاربرد این روش، همه انواع آنتنهای متناوب لگاریتمی است. در این مقاله و بمنظور تصدیق روش فوق، از آنتن متناوب لگاریتمی سطحی، که پرکاربردترین آنها می باشد، استفاده گردید. این آنتن فوق پهن باند، برای پوشش باندهای L و S طراحی و شبیه سازی گردید. برای بالن این آنتن از ساختار مبدل مود، به عنوان تنها ساختار مفید با توانایی تغییر در فاز جریان تحریک المانها استفاده شد. بمنظور خطی سازی تغییرات فاز جریان تحریک المانهای آنتن، از ساختار ریزنوار پیچ دار به عنوان بهترین ساختار، با بالاترین محدوده دینامیکی در ایجاد تغییر فاز بر مبنای فواصل محدود بین المانها و تطبیق امپدانس آنتن، استفاده گردید. آنتن اصلاح شده نهایی تنها با ۶ ساختار ریزنوار پیچ دار، طراحی و ساخته شد. نتایج شبیه سازی و اندازه گیری نشان داد که تغییرات مرکز فاز آنتن بدون تغییر در ابعاد آن، اصلاح گردیده و بهره آن به میزان ۲dB (بطور متوسط) نسبت به آنتن اصلی کاهش یافته است. بعلاوه، پهنای باند ۱۰dB آن (در حدود ۴٫۵GHz) می باشد.



شکل ۱۱. تغییرات بهره آنتن ها بر حسب فرکانس

با توجه به بهینه سازی مقادیر پارامترهای ساختار ریزنوار پیچدار، بنظر می رسد که برای جبران سازی این کاهش بتوان از تکنیکهای افزایش بهره در آنتنهای آرایه استفاده نمود که البته منجر به افزایش تغییرات مرکز فاز می گردد، از اینرو باید روشهای دیگری مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد، که هدف این مقاله نیست. بنابراین با شرایط موجود، می بایست مصالحه های^{۱۷} بین این دو پارامتر برقرار نمود.

نتایج مطالعه و بررسی الگوی تشعشعی آنتنها (در ۱۰ فرکانس در حالت شبیه سازی و ۴ فرکانس در حالت اندازه گیری) نشان داد که آنتن اصلاح شده به عنوان یک آنتن فوق پهن باند، دارای الگوهای تشعشعی مناسبی در بازه فرکانسی مورد نظر و بخصوص در فرکانسهای بالاتر از ۱٫۲GHz می باشد. بعلاوه، تطابق مناسبی با الگوهای تشعشعی آنتن اصلی دارد. نمودار الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده صفحه E (شبیه سازی و اندازه گیری) آنتنها و صفحه H (الگوهای قطبی شدگی موازی^{۱۸} و متقاطع^{۱۹} اندازه گیری شده) آنتن اصلاح شده، در ۴ فرکانس به ترتیب در شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده صفحه E دو آنتن

- 17. Trade off
- 18. Co-polarization
- 19. Cross-polarization

مرجع‌ها

- with the Method of Moving Reference Point', ISAPE IEEE, p 114-117, 2008.
- [8] Z. Allahgholi pour and L. Shafai, 'Control of Phase Center and Polarization in Circular Microstrip Antennas', IEEE ISAPS, p 1441-1444, 2006.
- [9] Carrel Robert L., 'Analysis and Design of the Log-Periodic Dipole Antenna', Technical Report No.52, Antenna Laboratory, University of Illinois, 1961.
- [10] Klopfenstein, R. W., 'A Transmission Line Taper of Improved Design', Proc. of the I.R.E No.44, Jan. 1956, pp.31-35.
- [11] Kazerooni M, Cheldavi A, and Kamarei M, 'Analysis, modeling and design of cascaded defected microstrip structure (CDMS) for planar circuits', International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol.20, 2010.
- [12] Sainati Robert A., 'Cad of Microstrip Antenna for Wireless Applications' Artech House, London, 1995.
- [1] Duhamel, R. H., and Isbell D.E, 'Broadband Log-periodic Antenna Structures', I.R.E 1957 National Convention Record, Part .1 pp. 119-128.
- [2] Balanis C. A., 'Antenna Theory: Analysis and Design', Third edition, Wiley-Interscience, New Jersey & Canada, 2005, p.611.
- [3] Morgan D., 'A Handbook for EMC Testing and Measurement', IET, London, United Kingdom, 2007.
- [4] Yeo, J., and Lee, J. L., 'Miniaturized LPDA Antenna for Portable Direction Finding Applications'. ETRI Journal, Volume 34, No.1, pp. 118-121, Feb. 2012.
- [5] Thomas A. Milligan, Modern Antenna Design, Second Edition, Wiley-Interscience, New Jersey & Canada, 2005.
- [6] Z. Allahgholi pour and L. Shafai, 'Adaptive Aperture Antennas with Adjustable Phase Centre Locations', IWAT IEEE, pp. 355-357, 2012.
- [7] Jun-ping Shang, De-min Fu, Yingbo Deng, Shuai Jiang, 'Measurement of Phase Center for Antenna