

طراحی و ساخت آنتن شیپوری چهارتیغه‌ای پهن باند با بهره ثابت

علی احمدی^۱، دانشجوی دکتری؛ مجید اخوت^۲، دانشیار؛ داود ظریفی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران- ایران- alieahmadi@ihu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران- ایران- mokhovvat@ihu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان - ایران- zarifi@kashanu.ac.ir

چکیده: در این مقاله طراحی، شبیه‌سازی، ساخت و اندازه‌گیری آنتن شیپوری چهارتیغه‌ای پهن باند با بهره و الگوی آنتنی^۱ تقریباً ثابت ارائه می‌گردد. آنتن مورد بحث در این مقاله برای پوشش باند فرکانسی ۲ تا ۱۸ گیگاهرتز و بهره ثابت ۱۳dBi طراحی شده‌است. در این طراحی برای رسیدن به مشخصات فنی مطلوب باند فرکانسی ۲ تا ۱۸ گیگاهرتز، به دو باند فرکانسی ۲ تا ۶ و ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز تقسیم شد و از آنتن‌های شیپوری^۲ چهار تیغه‌ای^۳ پهن باند^۴ استفاده شدند، آنتن‌ها دارای دو خروجی با دو قطبش^۵ متعامد افقی و عمودی هستند. این آنتن‌ها دارای الگوی متقارن بوده و در آرایه آنتنی پهن باند که نیاز به تغییرات کم در الگوی آنتن باشد، مثل جهت‌یاب‌های تک‌پالس^۶ راداری و همچنین در اندازه‌گیری‌های پهن باند مخابراتی کاربرد دارند. باتوجه به بهره خوب از این آنتن‌ها می‌توان به‌عنوان آنتن با بهره متوسط، یا تغذیه^۷ آنتن‌های با صفحات منعکس‌کننده^۸ برای بالا بردن بهره روزنه^۹ نیز استفاده کرد. در این مقاله در مورد نحوه طراحی آرایه آنتن با الگوهای آنتنی ثابت و همچنین ساخت، تغذیه و نقش پارامترهای مختلف مکانیکی در تطبیق آنتن بحث می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و ساخت آنتن‌ها باهم مقایسه شده‌است و آزمایش‌های صورت گرفته برای این آنتن‌ها نشان‌دهنده صحت شبیه‌سازی‌ها و دست‌یابی به نتایج مورد نظر در طراحی بوده‌است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده ثبات الگوی آنتنی بهتر، نسبت به موارد مشابه در مراجع معتبر هست.

واژه‌های کلیدی: آنتن شیپوری چهارتیغه‌ای، آنتن پهن‌باند، اندازه‌گیری سیگنال‌های پهن‌باند، جهت‌یاب‌رادیویی تک‌پالس، آرایه آنتن دایروی.

Design and Implementation of Wideband Quad-ridged Horn Antenna near Constant Gain

A. Ahamadi¹, PHD Student; M.Okhovvat², Associate Professor; D.Zarifi³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Imam Husain University, Tehran, Iran, Email: alieahmadi@ihu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Imam Husain University, Tehran, Iran, Email: mokhovvat@ihu.ac.ir

3- Faculty of Electrical Engineering and computer, Kashan University, Kashan, Iran, Email: zarifi@kashanu.ac.ir

Abstract: In this paper, design, simulation, Implementation and measuring of wide band quad-ridged horn antenna near constant gain is presented. These antennas designed for about 13dBi gain and 2-18GHz frequency band. For achieving good specifications, we divided it in two frequency band 2-6 and 6-18 GHz and used quad-ridged horn antenna. Each antennas have two orthogonal vertical and horizontal polarization outputs. The radiation patterns are almost symmetrical. These type of antennas have many applications in wideband Monopulse radio direction finding and communication measuring. These antennas can use as: medium gain antennas, wideband antenna array and wideband reflector antenna's feed. In this paper we discusses about wide band quad-ridged horn antenna, designing with reasonably constant beam width and gain, implementation, driving, adjusting and matching of antenna. Also mechanical tolerance affect in antennas output matching will explain. At the end two simulated and measured data compared with each other and show they are very close to each other. The designed antennas beam width stability compared with some similar references, and show that have better stability than them.

Keywords: Horn antenna, quad-ridged, wideband antenna, wideband signal measurements, monopulse radio direction finding, circular antenna array.

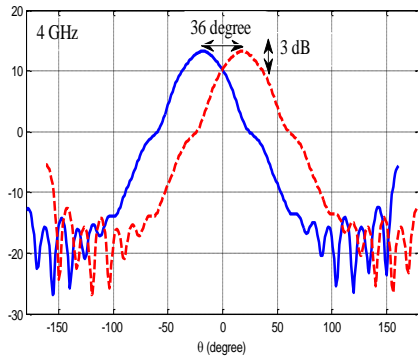
تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱ و ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶

نام نویسنده مسئول: مجید اخوت

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - انتهای اتوبان شهید بابایی-دانشگاه جامع امام حسین (ع)- دانشکده مهندسی برق



شکل ۲: نمودار الگوی دو آنتن در فرکانس ۴ گیگاهرتز در کنارهم

در این مقاله باتوجه به پهنای باند مورد نیاز ۲ تا ۱۸ گیگاهرتز برای داشتن الگو و بهره تقریباً ثابت از دو آرایه مجزا یکی در باند فرکانسی ۲-۶ و دیگری در باند ۶-۱۸ گیگاهرتز استفاده شد تا پهنای باند ۱:۹ به دو باند مساوی ۳:۱ تقسیم شود تا نسبت فرکانسی دو طراحی آنتن مشابه هم باشند. هدف طراحی یک آنتن با الگوی ثابت و متقارن حدود ۳۶ درجه بود. این تقسیم باند، طراحی و مشخصات فنی استخراج شده نسبت به مراجعی که استفاده شده یک کار جدید بوده و مشخصات ثابت الگوی آن بهتر است.

آنتن‌های شیپوری از گذشته‌های دور تا به امروز، باتوجه به طراحی نسبتاً ساده، بهره بالا و جهت‌دهی مناسب الگوی آنتن، یک انتخاب مناسب برای بسیاری از کاربردهای مخابراتی و اندازه‌گیری به شمار می‌آیند [۴-۲]. آنتن‌های شیپوری به اشکال مختلف، بدون تیغه، با دو تیغه، چهار تیغه و حتی به صورت کنگره‌دار قابل ساخت می‌باشند. در بعضی از طرح‌ها که آنتن شیپوری برای پوشش باند وسیع استفاده می‌شود در فرکانس‌های بالا گلبرگ اصلی به چند گلبرگ تقسیم می‌شود [۷-۵]. با آنتن‌های چهار تیغه‌ای می‌توان دو قطبش و پهنای باندهای بیشتری را با VSWR پایین ایجاد کرد [۱۲-۸]. آنتن‌های شیپوری معمولی در باند فرکانسی ۲ تا ۱۸ گیگاهرتز حدود ۵۰ درجه تغییرات الگوی آنتنی دارند [۱۳]. در برخی از کاربردها مثل اندازه‌گیری‌های مخابراتی پهن باند و یا آرایه آنتنی پهن باند، شکل الگو و بهره آنتن در پهنای باند عمل کردی خود می‌بایست دارای تغییرات کمی باشند [۱۹-۱۳]. برای پوشش باند ۲ تا ۱۲ گیگاهرتز از آنتن چهار تیغه‌ای استفاده کرده‌است اما نتایج طرح ارائه شده در این مقاله نسبت به مرجع مذکور حدود ۱۰۰ درصد بهبود در ثبات الگو دارد و تغییرات الگوی آنتن به کمتر از نصف آن کاهش یافته‌است و پهنای باند بیشتری را با کیفیت بهتر پوشش داده‌است. نسبت به مراجع [۱۹-۱۷] نیز نتایج نسبی ثبات الگو و بهره مناسب‌تر است.

۲- ساختار کلی آنتن شیپوری چهار تیغه‌ای

ساختار کلی و شکل تیغه‌های یک آنتن شیپوری چهار تیغه‌ای با استفاده از موج‌بر دایروی در شکل ۳ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این آنتن دارای بدنه‌ای است که نحوه باز شدن آن به‌گونه‌ای

۱- مقدمه

رادارهای تک پالس برای ردگیری اهداف نیاز به دو آنتن با الگوی متقاطع دارند. این رادارها معمولاً تک فرکانس یا دارای باند فرکانسی محدود چند صد مگاهرتزی می‌باشند. برای تعمیم این روش به یک جهت‌یاب تک پالس پهن باند غیرتشنه‌شی در باند فرکانسی ۲ تا ۱۸ گیگاهرتز لازم است مثل شکل (۱-الف) از تعدادی آنتن در یک آرایه دایروی و یا دو آنتن کنار هم با سکوی چرخان استفاده شود. در طرح شکل (۱-الف) برای پوشش ۳۶۰ درجه از ۱۲ عدد آنتن با الگوهای حدود ۳۰ درجه استفاده می‌شود و در طرح شکل (۱-ب) از دو آنتن با الگوی متقاطع بر روی یک سکوی چرخان ۳۶۰ درجه‌ای استفاده می‌گردد. در روش جهت-یابی راداری تک پالس هرچه الگوی آنتن‌ها ثابت باشد دقت جهت‌یابی بهتر خواهد بود [۱] و در محل تلاقی دو الگو با تغییر فرکانس، توان دریافتی تقریباً باند فرکانسی ثابت خواهد ماند. این مقدمه نیاز و کاربرد آنتن‌های با بهره و الگوی ثابت را بیشتر روشن می‌کند. هدف و نیاز، طراحی و ساخت آنتن با الگوی تقریباً ثابت و بهره متوسط حدود ۱۳ dBi در باند فرکانسی ۱۸ تا ۲ گیگاهرتز بود.



(ب)



(الف)

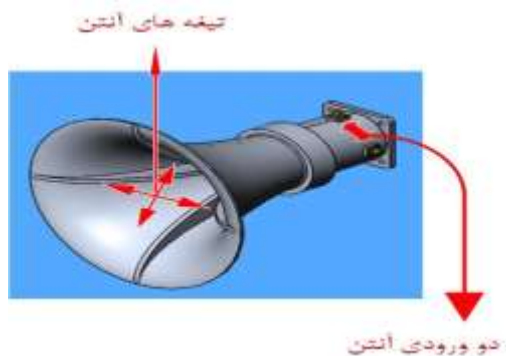
شکل ۱: الف) آرایه دایروی، ب) آرایه چرخان

باتوجه به بهره مورد نیاز، آنتن شیپوری برای طرح انتخاب شد. در آنتن‌های آرایه دایروی پهن باند حفظ بهره و الگوی ثابت یک چالش جدی است. طراحی و ساخت آنتن شیپوری با نسبت پهنای باند ۱:۲ با شرط ثابت بودن بهره و پهنای الگوی آنتن دشوار نیست اما طراحی و ساخت آن با پهنای باند ۱:۳ و بالاتر پیچیده است. در این مقاله برای غلبه بر این چالش از آنتن‌های شیپوری چهار تیغه‌ای استفاده شده‌است. یک نمونه از الگوی دو آنتن ۶-۲ گیگاهرتز در کنار هم در شکل ۲ نشان داده شده‌است. نمونه‌ای که طراحی شده زاویه بین دو محور آنتن‌ها ۳۶ درجه بودند. در فرکانس مرکزی ۴ گیگاهرتز، نقاط ۳dB الگوها در محل تلاقی دو الگو بر هم منطبق بودند، در فرکانس ۲ گیگاهرتز محل تلاقی ۲/۲dB و در فرکانس ۶ گیگاهرتز محل تلاقی در نقطه ۳/۶dB پایین‌تر از نقطه بیشینه الگوها قرار داشت. با این طراحی میزان تغییرات توان در محل تلاقی دو الگو در محدوده فرکانسی ۲ تا ۶ گیگاهرتز ۱/۴dB است. این تغییرات هرچه کمتر باشد عمل کرد آنتن در آرایه مطلوب‌تر است.

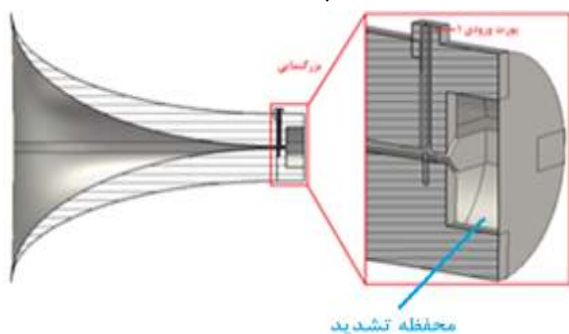
شکل (۳-ج) محفظه تشدید در انتهای آنتن، نحوه نصب کانکتور و برش عمودی از نحوه قرارگیری تیغه‌ها را نشان می‌دهد. برای تغذیه از کابل هم‌محور سفت باروکش مسی از نوع (QF۰۸۶) استفاده شده‌است. این کابل هم‌محور با مقاومت پنجاه اهم دارای قطر بیرونی ۲/۲ میلی‌متر و قطر داخلی ۰/۵۱ میلی‌متر می‌باشد. مغزی این کابل در تیغه مقابل در سوراخی با همان قطر مغزی متصل می‌گردد. در قسمت انتهایی دوتیغه مغزی کابل به‌عنوان تشعشع‌کننده سیگنال بدون روکش بوده و به تیغه روبرو متصل است. برای داشتن دو قطبش متعامد دو کانکتور از دو ورودی مطابق شکل ۳-ب متصل شده و به‌صورت متعامد قرار گرفته‌اند. از این خروجی‌های متعامد می‌توان برای ایجاد قطبش افقی و عمودی به‌صورت هم‌زمان یا قطبش مایل $\pm 24.5^\circ$ و یا با ترکیب آن‌ها به قطبش دایروی چپ یا راست گرد استفاده کرد. کابل مسی به بدنه کانکتور لحیم شده و بدنه کانکتور با چندپیچ به بدنه آنتن اتصال دارد. بدنه آنتن هم از جنس آلومینیوم و بدون رنگ است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: (الف) چگونگی شکل‌گیری یک تیغه (ب) نمای سه‌بعدی

(ج) نمای جانبی یک آنتن شیپوری چهارتیغه‌ای

انتخاب می‌شود تا موج خروجی از موج‌بر را به بهترین شکل با فضای آزاد تطبیق نماید. پهنای باند، بهره و شکل پرتو در آنتن‌های تیغه‌ای وابسته به شکل تیغه‌ها هست. می‌توان آنتن‌های تیغه‌ای داشت بدون این‌که آن‌ها داخل صفحات شیپوری شکل قرار داده‌شوند. صفحات کناری برای محدود کردن الگوی تشعشعی در یک راستای خاص هست. در این طراحی آنتن، از چهارتیغه باز شونده، یک محفظه تشدید در پشت آنتن و دو کانکتور به‌منظور تغذیه آنتن استفاده شده‌است. معمولاً تیغه‌های فلزی به یکی از شکل‌های نمایی، بیضی، X^n یا تانژانتی ترسیم می‌شوند هم‌چنین امکان استفاده از شکل‌های ترکیبی نیز مانند رابطه (۱) وجود دارد [۱۵]:

$$a(z) = A(c_1 e^{Rz} + c_2) + (1-A)[a_i + (a_0 - a_i)z/L] \quad (1)$$

که در آن c_1, c_2, a_0, a_i پارامترهای طراحی، R آهنگ تغییر تابع‌نمایی و L طول تیغه است. در این مقاله تیغه‌های فلزی به‌صورت فضای محدود بین منحنی‌های بیضی‌شکل مطابق شکل (۳-الف) انتخاب شده‌اند که شعاع‌های این بیضی‌ها جزء پارامترهای بهینه‌سازی هستند که مقادیر بهینه در جدول (۱) مشخص شده‌اند.

هم‌چنین برای تغذیه آنتن از دو کانکتور که به‌صورت عمودبرهم و با فاصله کم از یک‌دیگر قرار گرفته‌اند مطابق شکل (۳-ب) استفاده شده‌است. محفظه تشدید پشت کانکتور تغذیه در انتهای آنتن مطابق شکل (۳-ج) برای تطبیق آنتن‌های تیغه‌ای با کابل هم‌محور هست. ابعاد موج‌بر دایروی تغذیه طوری انتخاب شده‌است که بتواند در محدوده فرکانسی موردنظر، یعنی ۲ تا ۶ و ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز آنتن‌ها را در مود غالب خود یعنی مود TE_{11} تغذیه کند. مبدل کابل هم‌محور به موج‌بر دوتیغه هم طوری طراحی شده‌است که مود TEM با کمترین تلفات جای‌گذاری و برگشتی به مود TE_{11} موج‌بر دایروی تبدیل شود. برای رسیدن به این هدف، شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شده‌است تا طول و عرض محفظه و فاصله محل اتصال تغذیه‌های هم‌محور از ته محفظه تشدید بهینه‌سازی شود.

با توجه به بهره موردنظر ($G=13\text{dBi}$)، هم‌چنین راندمان دهانه آنتن 0.16 ، ابعاد سطح مقطع دهانه آنتن (A_p) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده‌است [۲۰]:

$$G = 0.6(4\pi A_p / \lambda^2) \quad (2)$$

طول ناحیه شیب‌دار آنتن معمولاً باید بزرگ‌تر از طول موج (λ) انتخاب شود. تابع هدف در طراحی برای دستیابی به بهره مشخص در پهنای باند موردنظر با S_{11} قابل قبول، طبق رابطه (۳) تعریف شده‌است.

$$Fitness = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (|S_{11}(f_m)|^2 + |G_0 - G(f_m)|^2) \right)^{0.5} \quad (3)$$

مقادیر تابع هدف در رابطه (۳)، G_0 بهره موردنظر، f_m مؤلفه فرکانسی شبیه‌سازی و M تعداد مؤلفه‌های فرکانسی در بازه موردنظر هستند.

۳- طراحی و شبیه‌سازی آنتن‌ها

مشخصات فیزیکی آنتن‌های ساخته‌شده در جدول ۱ ارائه شده‌است. این جدول از شبیه‌سازی‌های متعدد جهت رسیدن به پارامترهای موردنظر آنتن‌های مطلوب به‌دست آمده‌است. در ادامه نمونه‌هایی از شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته برای دستیابی به مشخصات موردنظر ارائه می‌شود. شکل ۵ نمودار S_{11} شبیه‌سازی‌شده را برای هر دو آنتن نشان می‌دهد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار S_{11} در بازه‌های فرکانسی تعریف‌شده برای هر آنتن قابل قبول و کمتر از -10 dB است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی آنتن‌ها

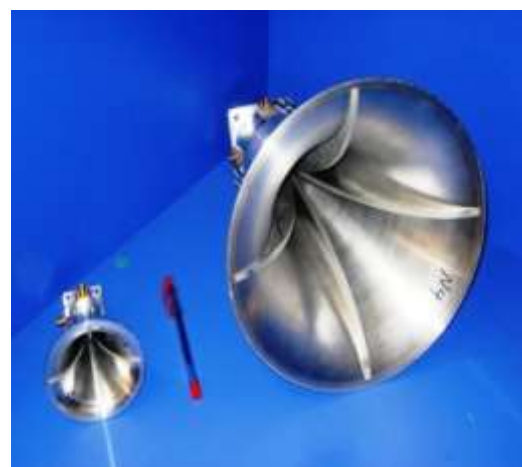
آنتن		پارامتر
۲ تا ۶ گیگاهرتز	۶ تا ۱۸ گیگاهرتز	قطر موج‌بر تغذیه (mm)
۶۰/۶	۲۱/۲	ابعاد محفظه تشدید (mm)
۳۴/۶ × ۱۷/۶۵	۱۲/۵۴ × ۵/۹	شعاع بیضی‌ها (mm)
(۱۲ و ۲۵)	(۴/۲ و ۸/۷)	کمترین فاصله تیغه‌ها (mm)
(۹/۱ و ۲۵)	(۲/۲ و ۸/۷)	ضخامت تیغه‌ها (mm)
۱/۸۵	۰/۸	قطر مغزی تغذیه (mm)
۶	۳/۱۵	ابعاد کلی cm^3
۲۸ × ۲۵ × ۲۵	۹/۴ × ۸/۵ × ۸/۵	

طراحی قسمت تغذیه باتوجه‌به باند فرکانسی موردنظر و بر اساس فرکانس‌های قطع موج‌بر دایروی از مباحث مرجع [۲۱] انجام شده‌است. ضخامت تیغه‌ها و همچنین فاصله بین آن‌ها تعیین‌کننده قسمت حقیقی امیدانس ورودی آنتن است که با افزایش فاصله، قسمت حقیقی امیدانس افزایش و برعکس آن کم می‌شود. هم‌چنین با افزایش ضخامت تیغه‌ها، قسمت حقیقی امیدانس کاهش و برعکس آن زیاد می‌شود. شکل دهانه آنتن هم براساس کمینه‌بودن پراکندگی امواج در لبه‌ها انتخاب شده‌است. در انتخاب مقادیر اولیه قسمت‌های مختلف آنتن از جمله ساختار تغذیه، مشخصات تیغه‌ها و سایر پارامترها و بهینه‌سازی آن‌ها از مباحث صورت‌گرفته در مراجع [۱۵، ۲۱، ۲۲] استفاده شده‌است. مراحل مختلف طراحی آنتن شبیه‌سازی تیغه‌دار را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- انتخاب شعاع موج‌بر دایروی تغذیه باتوجه‌به روابط فرکانس قطع و باند فرکانسی موردنظر
- انتخاب عمق محفظه تشدید با مقدار اولیه‌ی ربع طول موج
- تعیین سطح دهانه آنتن باتوجه‌به بهره موردنظر
- تعیین مقادیر اولیه شعاع بیضی‌ها کوچک و بزرگ، باتوجه‌به مقادیر انتخاب‌شده برای شعاع‌های موج‌بر و دهانه آنتن
- انتخاب مقدار اولیه برای فاصله نقطه تغذیه و ضخامت تیغه‌ها
- انجام بهینه‌سازی پارامترهای فوق برای رسیدن به مشخصه S_{11} ، S_{22} ، بهره مناسب و الگوی ثابت در بازه فرکانسی موردنظر

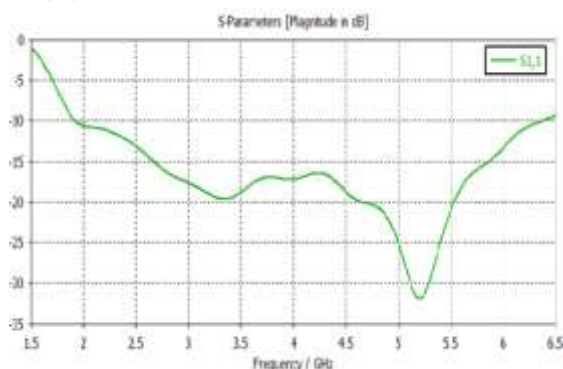
با استفاده از امکانات بهینه‌سازی و شبیه‌سازی نرم‌افزار CST دو نمونه آنتن برای پوشش باند فرکانسی ۲-۶ و ۶-۱۸ گیگاهرتز طراحی شدند.

عکس واقعی آنتن‌های ساخته‌شده از جنس آلومینیوم در شکل ۴ نشان داده شده‌است. تصویر سمت راست مربوط به آنتن باند ۲-۶ گیگاهرتز و تصویر سمت چپ برای آنتن باند ۶-۱۸ گیگاهرتز است.

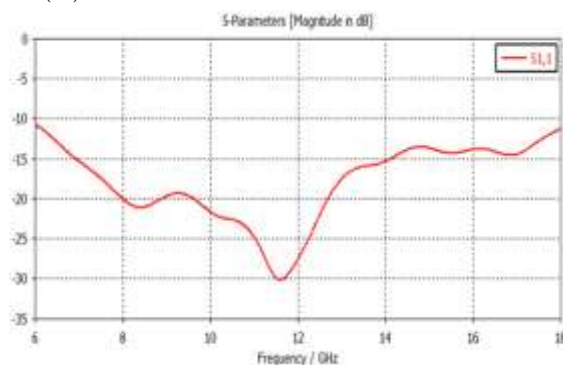


شکل ۴: عکس نمونه آنتن‌های ساخته‌شده

باند ۲-۶ گیگاهرتز سمت راست و ۶-۱۸ گیگاهرتز سمت چپ.

 S_{11} (dB)

(الف) آنتن ۲ تا ۶ گیگاهرتز

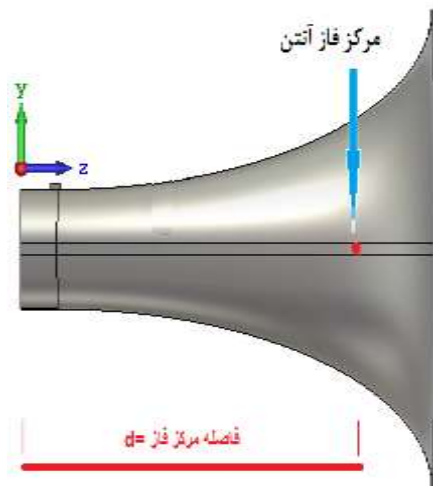
 S_{11} (dB)

(ب) آنتن ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز

شکل ۵: نمودار شبیه‌سازی S_{11} آنتن‌ها.

برای حالت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری رسم شده و مقدار پهنای الگوی نیم توان آنتن نیز نوشته شده‌است. در شکل ۸ (ث، ج)، نتایج شبیه‌سازی سطح قطبش متقاطع^{۱۳} آنتن‌ها در زاویه ۴۵ درجه در فرکانس‌های مختلف رسم گردیده‌است. در این نوع آنتن‌ها با نسبت فرکانسی بالای ۲:۱ معمولاً سطح قطبش متقاطع خیلی کم نیست و معمولاً در حدود ۱۰dB- است که یکی از نقاط ضعف این نوع آنتن‌ها است.

نمودار پهنای الگوی نیم‌توان و بهره آنتن شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در ادامه با جزئیات بیشتر در شکل ۹ نشان داده می‌شود. چنان‌که در این شکل‌ها با وضوح بیشتری ملاحظه می‌شود، پهنای الگوی آنتن‌ها در کل باند فرکانسی طراحی شده ۲-۱۸ گیگاهرتز دارای تغییرات کم و در بازه ۵±۳۸ درجه می‌باشند. الگوهای آنتن در صفحه E و D نسبت به صفحه H دارای ثبات الگوی آنتنی بهتری هستند. این ثبات به خاطر وضعیت بهتر میدان‌های TE₁₁ در این صفحات هست. تغییرات الگو در صفحه H برای آنتن‌های ساخته شده حدود دو برابر بدتر از صفحات E و D بود.

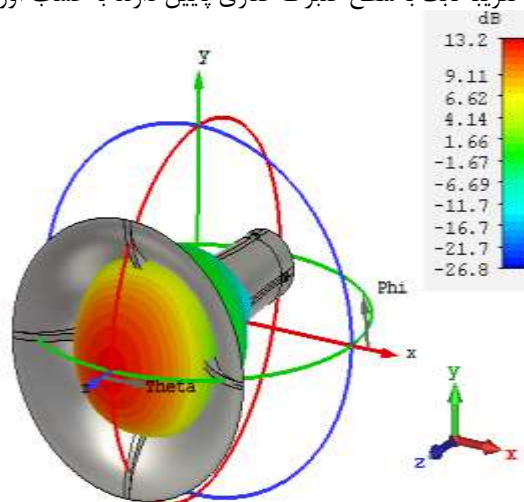


شکل ۷: نمایش فاصله مرکز فاز در آنتن‌های طرح شده

جدول ۲: فاصله مرکز فاز آنتن (d)

فرکانس (GHz)	۲	۳	۴	۵	۶	آنتن ۲-۶
مرکز فاز (mm)	۲۳۰	۱۷۳	۱۶۴	۱۶۳	۱۶۰	
فرکانس (GHz)	۶	۹	۱۲	۱۵	۱۸	آنتن ۶-۱۸
مرکز فاز (mm)	۷۷	۵۹	۵۷	۵۸	۵۷	

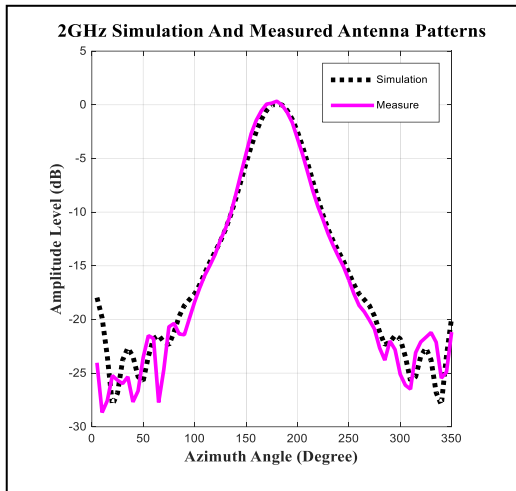
در شکل ۶ یک نمونه از الگوی شبیه‌سازی شده سه‌بعدی آنتن در فرکانس ۴ گیگاهرتز رسم شده‌است، چنان‌که ملاحظه می‌شود الگو با توجه به ساختار متقارن آنتن دارای تشابه خوبی در محور افقی و عمودی و اریب است. الگوی اندازه‌گیری شده آنتن‌ها در صفحه E در کل باند فرکانسی ۲-۱۸ گیگاهرتز دارای تغییرات کم ۵± درجه هستند. یکی از محاسن این آنتن‌ها آن است که سیگنال‌های با قطبش افقی و عمودی را می‌توان با بهره ثابت از دو خروجی آنتن دریافت کرد. همچنین در کل باند فرکانسی بهره و شکل الگوی آنتن‌ها تقریباً ثابت باقی می‌ماند. ساختار این آنتن‌های شیپوری طوری طراحی شده که سطح گلب‌های کناری پایینی داشته‌باشند. سطح گلب‌های کناری بیش از ۱۴dB پایین‌تر از سطح گلب‌های اصلی هستند. همچنین تقارن در دو محور متعامد از ویژگی‌های خوب این نوع آنتن است. در مجموع با توجه به ویژگی‌های ذکر شده و پهنای باند زیاد می‌توان این طراحی را یک طرح مناسب برای کاربردهایی که نیاز به پهنای باند، قطبش دوگانه، بهره و الگوی تقریباً ثابت با سطح گلب‌های کناری پایین دارند به حساب آورد.



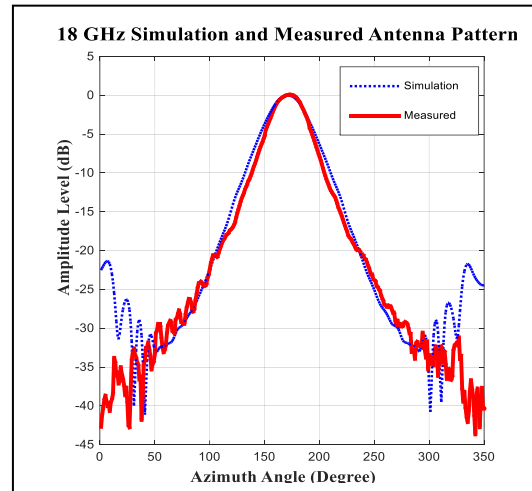
شکل ۶: الگو سه‌بعدی آنتن‌ها در فرکانس ۴ گیگاهرتز

شکل ۷ محل مرکز فاز و فاصله آن را در آنتن طرح شده نشان می‌دهد. در جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی فاصله یا محل مرکز فاز آنتن‌ها مشخص شده‌است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود مرکز فاز آنتن روی خط وسط آنتن با فرکانس جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی برای آنتن باند ۲ تا ۶ گیگاهرتز ۷۰ میلی‌متر و برای آنتن باند ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز برابر با ۲۰ میلی‌متر است.

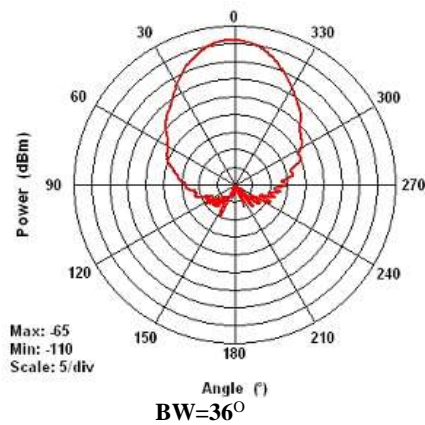
در شکل ۸ (الف، ب)، الگوی دوبعدی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن‌های ساخته شده رسم شده‌اند. الگوهای اندازه‌گیری شده با دقت خوبی با شبیه‌سازی‌ها تطابق دارند. در شکل ۸ (پ، ت)، پهنای الگوی نیم توان آنتن به صورت نمایش قطبی در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز



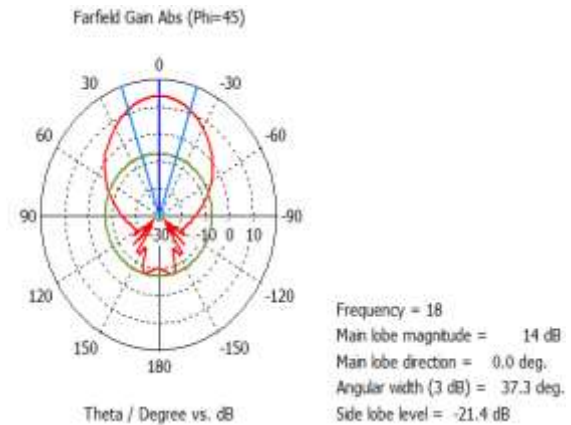
(الف) مقایسه نتایج الگوی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن در صفحه E در ۲ گیگاهرتز



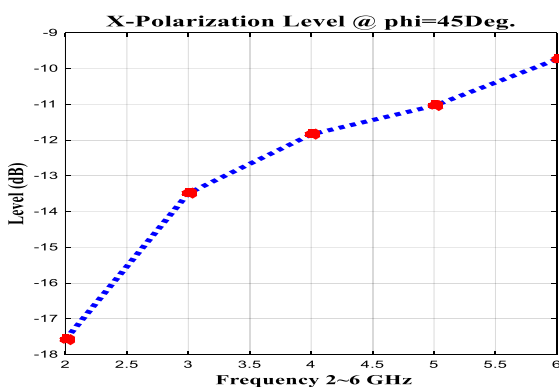
(ب) مقایسه نتایج الگوی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن در صفحه E در ۱۸ گیگاهرتز



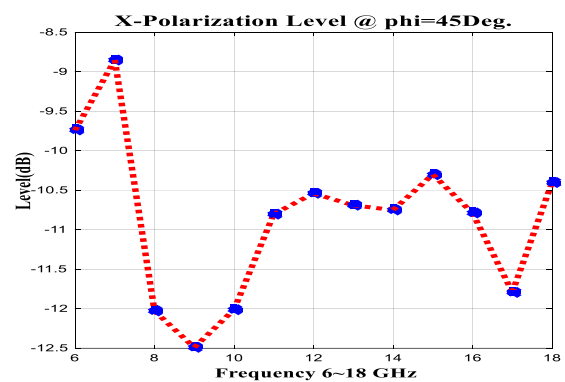
(پ) الگوی اندازه‌گیری شده آنتن در ۱۸ گیگاهرتز



(ت) الگوی شبیه‌سازی آنتن در ۱۸ گیگاهرتز



(ث) سطح قطبش متقاطع در زاویه ۴۵ درجه آنتن ۲ تا ۶ گیگاهرتز



(ج) سطح قطبش متقاطع در زاویه ۴۵ درجه آنتن ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز

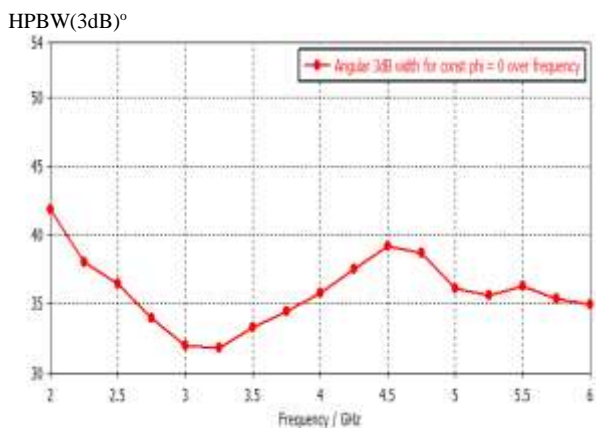
شکل ۸: نتایج الگوی آنتن‌ها و سطح قطبش متقاطع در زاویه ۴۵ درجه

این شکل‌ها دیده می‌شود تغییرات پهنای الگوی آنتن‌ها در فرکانس‌های مختلف و در هر دو باند فرکانسی کمتر از ± 5 درجه است که یکی از

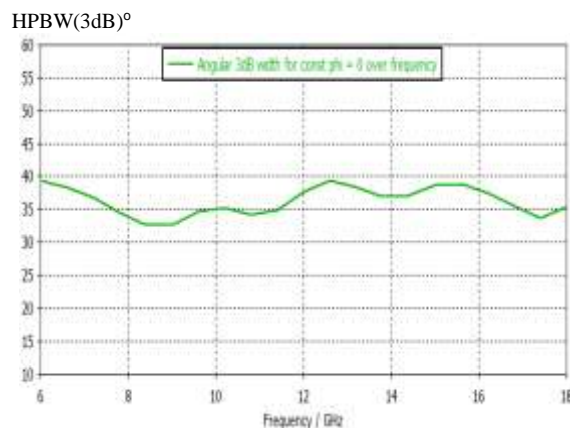
در شکل ۹ (الف و ب)، تغییرات الگوی آنتن یا پهنای الگوی شبیه‌سازی شده در فرکانس‌های مختلف مشاهده می‌شوند. چنان‌که در

گردند، تغییرات بهره شبیه‌سازی شده برابر مقدار 13 ± 1 dB می‌باشد. هم-چنین در شکل ۹ (ث و ج) نسبت محوری دو خروجی برای هر دو آنتن نشان داده شده‌است. وقتی دو نمودار در کنارهم برای کل باند فرکانسی مشاهده می‌گردد، ثبات خوبی در الگوی آنتن‌ها و بهره آن‌ها دیده می‌شود.

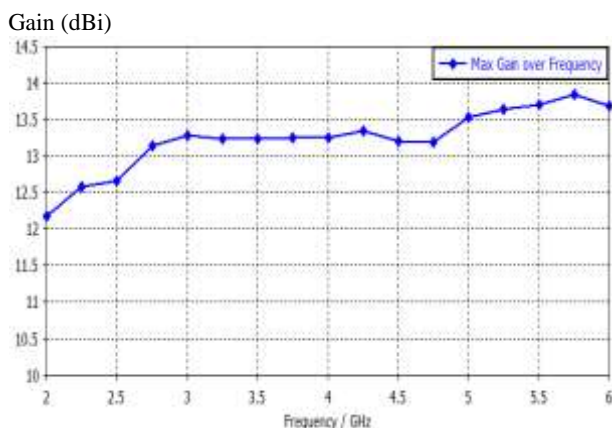
اهداف مهم تعیین شده برای طراحی این آنتن‌ها بودند. این شکل‌ها برش صفحه صفر درجه از میزان پهنای الگوی آنتن‌ها در فرکانس‌های مختلف می‌باشند. در شکل‌های ۹ (پ و ت)، تغییرات بهره شبیه‌سازی شده آنتن‌ها برحسب فرکانس در دو باند ۶ تا ۶ و ۱۸ تا ۱۸ گیگاهرتز مشاهده می‌



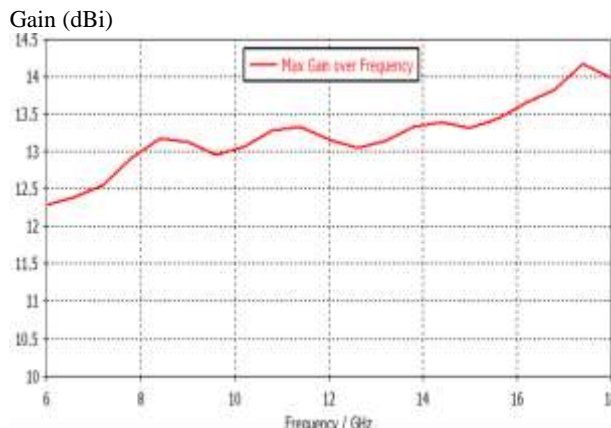
(الف) پهنای الگوی نیم توان شبیه‌سازی در باند ۲-۶ گیگاهرتز



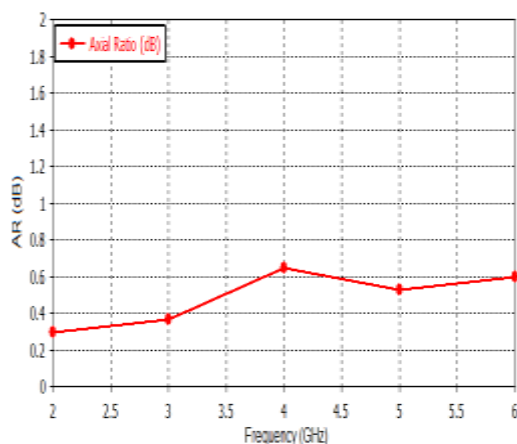
(ب) پهنای الگوی نیم توان شبیه‌سازی در باند ۶-۱۸ گیگاهرتز



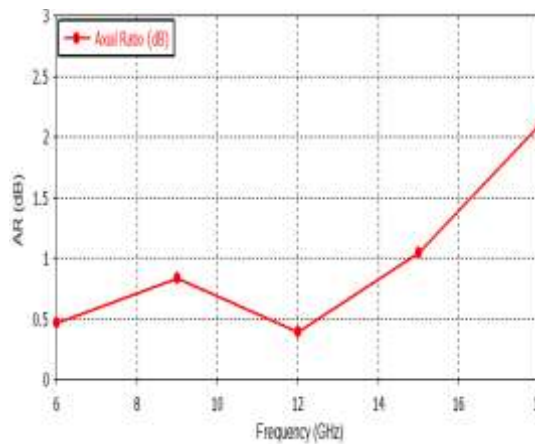
(پ) نمودار بهره شبیه‌سازی در باند ۲-۶ گیگاهرتز



(ت) نمودار بهره شبیه‌سازی در باند ۶-۱۸ گیگاهرتز



(ث) نمودار شبیه‌سازی نسبت محوری^{۱۴} در باند ۲-۶ گیگاهرتز



(ج) نمودار شبیه‌سازی نسبت محوری در باند ۶-۱۸ گیگاهرتز

شکل ۹: نمودار پهنای الگوی نیم‌توان، بهره و نسبت محوری آنتن‌ها

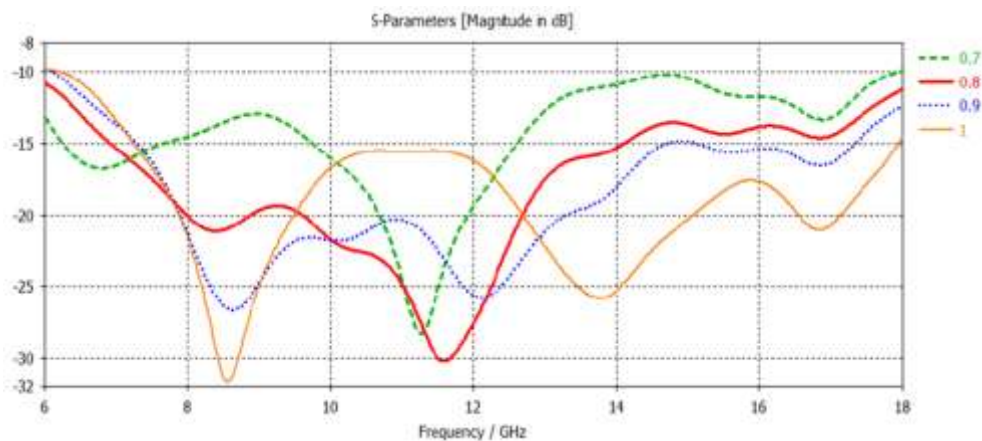
۴- تحلیل بخش‌های حساس مکانیکی

۶ تا ۱۸ گیگاهرتز در محل تغذیه آنتن نشان می‌دهد. چنان‌که دیده می‌شود تغییرات حدود یک‌دهم میلی‌متر می‌تواند در میزان تطبیق خروجی تغییر زیادی ایجاد کند.

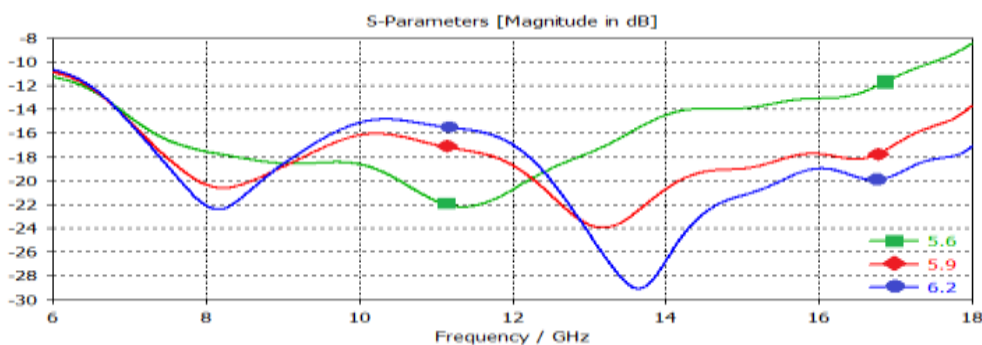
یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر روی S_{11} یا میزان تطبیق و جواب مناسب آنتن‌ها عمق محفظه تشدید است. در شکل ۱۱ این فاصله را برای آنتن ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز که به دقت ساخت، حساس‌تر از باند ۲ تا ۶ گیگاهرتز بوده، ترسیم شده‌است. مقادیر بهینه برای این باند ۵/۹ میلی‌متر انتخاب شده‌است که در جدول ۱ نیز مشخص شده‌است.

از بررسی منحنی‌های شکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان نتیجه‌گیری کرده که عمق محفظه تشدید نسبت به فاصله تیغه‌ها به دقت ساخت کمتری نیاز دارد.

تطبیق آنتن‌ها به شکل، طول و فاصله تیغه‌ها و ابعاد محفظه تشدید وابسته است. برای پاسخ فرکانسی خوب در محل تغذیه و اتصال کانکتورها، فاصله بین تیغه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند و باید با دقت خوبی ساخته شوند. چنان‌که در شکل (۳-ج) دیده می‌شود فاصله تیغه‌ها در محل تغذیه و عمق محفظه تشدید نشان داده شده‌است. برای تطبیق بهینه آنتن‌ها، این پارامترها برای هر دو آنتن باند ۲ تا ۶ و ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز شبیه‌سازی شده و مقادیر بهینه آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌است. دقت ساخت در باند ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز مهم‌تر بود لذا نتایج شبیه‌سازی آن برای انتخاب فاصله بهینه تیغه‌ها و عمق محفظه تشدید در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده‌است. شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای تعیین فاصله بهینه تیغه‌ها از یکدیگر را برای آنتن باند



شکل ۱۰: منحنی S_{11} آنتن ۶-۱۸ گیگاهرتز به ازای فاصله بین تیغه‌های مقابل برابر با ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ میلی‌متر.



شکل ۱۱: منحنی S_{11} آنتن ۶-۱۸ گیگاهرتز به ازای عمق‌های مختلف محفظه تشدید ۵/۹، ۶/۲، ۵/۵ میلی‌متر

۵- نتایج ساخت و اندازه‌گیری

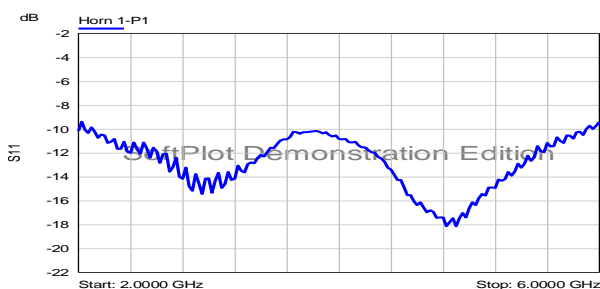
باشند. اندازه‌گیری بهره و الگوی آنتن‌ها در یکی از آزمایشگاه‌های معتبر داخل کشور (آزمایشگاه آنتن دانشگاه تهران) صورت گرفته‌است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی بهره آنتن‌ها ارائه شده‌است. نتایج اندازه‌گیری شده بهره آنتن‌های ساخته شده در بازه

شکل ۱۲ منحنی S_{11} اندازه‌گیری آنتن‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. این اندازه‌گیری‌ها با دستگاه نتورک آنالیزر انجام شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در اکثر نقاط باند فرکانسی، S_{11} کمتر از -10 dB است و خروجی‌های به دست آمده در محدوده تعریف شده برای آنتن‌ها می

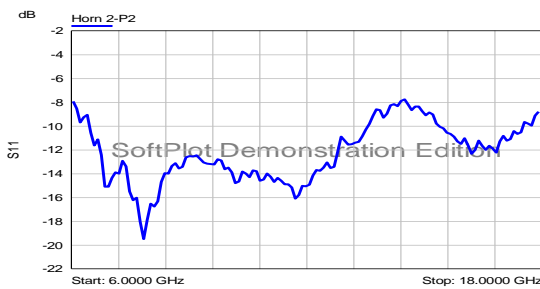
می‌دهند. این الگوها در صفحه E برای هر سه رسم شده‌است تا مقایسه مناسبی انجام شود. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که میزان تغییرات الگوی آنتن در نمونه ساخته‌شده بهتر از نمونه‌های مرجع است. به طوری که تغییرات الگوی حدود ± 10 درجه مرجع [۱۵] به ± 5 درجه در باند فرکانسی متناظر کاهش یافته‌است. در مرجع [۱۵] از شکل تیغه‌های نمایی استفاده کرده ولی در این مقاله ما از تیغه‌های به شکل بیضی استفاده کرده و نتایج بهتری گرفته شده‌است. پهنای الگوی آنتن‌های اندازه‌گیری شده این مقاله 38 ± 5 است. به طوری که نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی تطابق خوبی دارند و اختلاف بین نتایج به دلیل تلورانس ساخت و مونتاژ آنتن‌ها هست.

$12/5 \pm 1$ dB است که با نتایج شبیه‌سازی مطابقت دارند. به دلیل محدودیت در باند فرکانسی آنتن‌های مرجع (استاندارد) آزمایشگاه آنتن، بهره هر آنتن فقط با یک استاندارد مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند لذا بهره آنتن باند پایین در محدوده فرکانسی ۲/۶-۳/۹۵ گیگاهرتز و آنتن باند بالا در محدوده فرکانسی ۸/۲-۱۲/۴ گیگاهرتز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

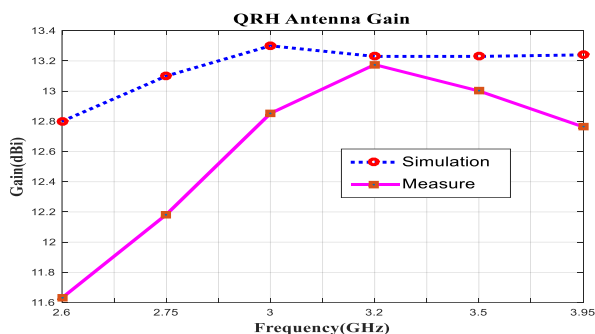
شکل (۱۶-الف) نتایج اندازه‌گیری تغییرات الگوی مرجع [۱۵] را نشان می‌دهد. شکل (۱۶-ب) نتایج اندازه‌گیری تغییرات الگوی آنتن‌های ساخته‌شده این مقاله را در کل باند فرکانسی نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل (۱۶-پ) نتایج اندازه‌گیری تغییرات الگوی مرجع [۱۸] را نشان



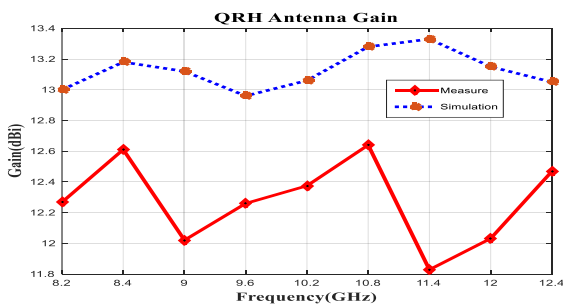
شکل ۱۲: نمودار S11 اندازه‌گیری شده آنتن باند ۲-۶ گیگاهرتز



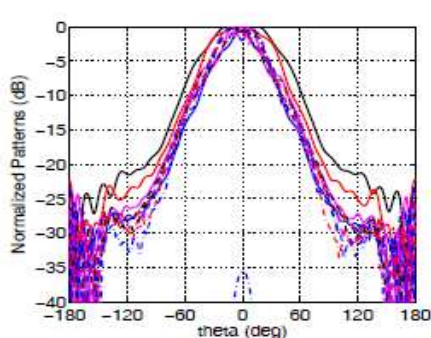
شکل ۱۳: نمودار S11 اندازه‌گیری شده آنتن باند ۶-۱۸ گیگاهرتز



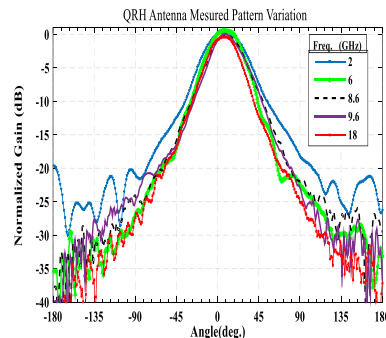
شکل ۱۴: بهره اندازه‌گیری و شبیه‌سازی آنتن ۲-۶ گیگاهرتز



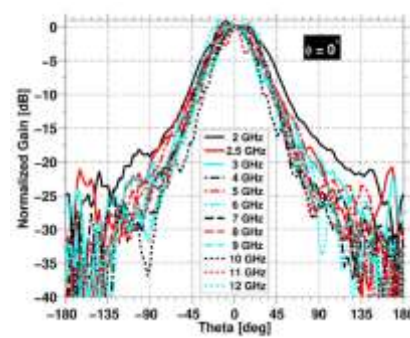
شکل ۱۵: بهره اندازه‌گیری و شبیه‌سازی آنتن ۶-۱۸ گیگاهرتز



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۱۶: مقایسه الگوهای مراجع [۱۵، ۱۸] با نتایج اندازه‌گیری این مقاله

(پ) تغییرات الگوی آنتن مرجع [۱۸] در باند ۴ تا ۲۴ گیگاهرتز

(ب) الگوی آنتن‌های ساخته این مقاله در صفحه E، باند ۲ تا ۱۸ گیگاهرتز (در دو باند)

(الف) تغییرات الگوی آنتن مرجع [۱۵] در باند ۲ تا ۱۲ گیگاهرتز

- [8] O.B.Jacobs, J. W. Odendaal, and J. Joubert, "Elliptically Shaped Quad-Ridge Horn Antennas as Feed for a Reflector", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 10, 2011.
- [9] A. R. Mallahzadeh, A. A. Dastranj, S. Akhlaghi, "Quad-Ridged Conical Horn Antenna for Wideband Applications," Wiley Periodicals, Inc., 2009.
- [10] Robert J. Bauerle, Robert Schrimpf, Eric Gyorko, and John Henderson, "The Use of a Dielectric Lens to Improve the Efficiency of a Dual-Polarized Quad-Ridge Horn From 5 to 15 GHz," IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 57, NO. 6, JUNE 2009.
- [11] Ockert B. Jacobs, Johann W. Odendaal, and Johan Joubert, "Quad-Ridge Horn Antenna with Elliptically Shaped Sidewalls," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61, No. 6, June 2013.
- [12] R. Dehdasht-Heydari, H. R. Hassani, and A. R. Mallahzadeh, "A NEW 2-18 GHZ QUAD-RIDGED HORN ANTENNA," Progress in Electromagnetics Research, PIER 81, 2008.
- [13] A.R. Mallahzadeh and A.A. Dastranj, "Double-Ridged Conical Horn Antenna for 2-18 GHz," Electromagnetics, vol. 28, no. 6, pp. 450-461, 2008.
- [14] Ahmed Akgiray, Sander Weinreb, William Imbriale, "Design and Measurements of Dual-Polarized Wideband Constant-Beamwidth Quadruple-Ridged Flared Horn," AP-S/URSI, IEEE, 2011.
- [15] A.Akgiray, S. Weinreb, W. A. Imbriale, and C. Beaudoin, "Circular Quadruple-Ridged Flared Horn Achieving Near-Constant Beamwidth Over Multioctave Bandwidth," IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 61, No.3, pp. 1099-1108, March 2013.

[۱۶] رضا ترینیا، مرتضی کازرونی، محسن فلاح، « تحلیل و ارزیابی اثر پارامترهای مهم آنتن و ریدوم بر روی زاویه‌یابی یک شبه‌ساز رادار مونوپالس برای یک سکوی پرتابه‌ای »، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۷۴، شماره ۷، زمستان ۱۳۹۶.

[۱۷] علی‌اکبر دسترنج، « آنتن حلزونی ارشمیدسی چهار بازویی در باند فرکانسی ۲ تا ۴ گیگاهرتز برای سیستم‌های ردگیری مونوپالس اهداف هوایی »، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۷۴، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶.

- [18] Bin Dong, Jian Yang, Jens Dahlström, Jonas Flygare, Miroslav Pantaleev, and Bhushan Billade, "Optimization and Realization of Quadruple-ridge Flared Horn with New Spline-defined Profiles as a High-efficiency feed over 4.6-24 GHz, MANUSCRIPT TO TRANSACTION ON ANTENNAS AND PROPAGATIONS, 2018.
- [19] Sara Manafi, M. Al-Tarifi, and D. S. Filipovic, "45-110 GHz Quad-Ridge Horn with Stable Gain and Symmetric Beam," IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 2017.
- [20] W.L. Stutzman and G. A. Thiele, "Antenna Theory and Design," 3rd ed., New York, Wiley, 2012.
- [21] W. Sun and C. A. Balanis, "Analysis and design of quadruple-ridged waveguides," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 42, pp. 2201-2207, Dec. 1994.
- [22] T. S. Beukman, M. V. Ivashina, R. Maaskant, P. Meyer, and C. Bencivenni, "A quadaxial feed for ultra-wide bandwidth quadruple-ridged flared horn antennas," in EuCAP, Den Haag, Netherlands, pp. 1135-1138, April 2014.

۶- نتیجه‌گیری

برای باند فرکانسی ۲ تا ۱۸ گیگاهرتز، نیاز به آنتنی با مشخصات فنی با بهره ثابت 13 ± 1 dBi و الگوی ثابت حدود 38 ± 5 درجه بود. برای پوشش این باند فرکانسی و مشخصات فنی، در دو باند فرکانسی ۲-۶ و ۶-۱۸ گیگاهرتز آنتن‌های شیبوری چهارتیغه‌ای طراحی و ساخته شدند. براساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در آزمایشگاه معتبر، مطابقت خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود داشت. تأثیر خطای ساخت مکانیکی اجزای اصلی آنتن در خروجی آنتن مورد مطالعه قرار گرفتند. با بررسی تأثیر خطای مکانیکی در مشخصات الکتریکی آنتن‌ها، مقدار بهینه برای هر یک از آن‌ها مطابق جدول ۱ استخراج گردید. از این آنتن‌ها در کاربردهایی که نیاز به تغییرات کم، در بهره یا الگوی آنتن باشد می‌توان استفاده کرد. آنتن‌های ساخته‌شده با نسبت فرکانسی ۳:۱ و با ترکیب دو طبقه ۹:۱ نسبت به نمونه‌های ارائه‌شده در مراجع معتبر با نسبت فرکانسی ۶:۱ دارای ثبات الگوی آنتنی مناسبی هستند. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است در مقایسه با مرجع [۱۵] تغییرات الگو در بازه فرکانسی متناظر از حدود ± 10 درجه، در این مقاله به ± 5 درجه تقلیل یافته‌است و نسبت به مرجع [۱۸]، از مقایسه شکل‌های ۱۶-پ با شکل ۱۶-ب مشخص است که نسبت به این مرجع وضعیت ثبات الگو، بهتر و تغییرات کمتری دارد.

مراجع

- [1] Stephen E. Lipsky, "Microwave Passive Direction Finding", SciTech Publishing Inc, 2004.
- [2] Lei Chang, Ling-Lu Chen, Jian-Qiang Zhang, Dan Li, "A 1.95-19.35 GHz Quad-Ridge Horn Antenna with Stable Unidirectional Radiation Patterns," Conference 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), 2018.
- [3] Nafati A. Aboserwal, Constantine A. Balanis and Craig R. Birtcher, "Conical Horn: Gain and Amplitude Patterns," IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 61, NO. 7, JULY 2013
- [4] Chao Wang, EnLi, Yunpeng Zhang, and Gaofeng Guo, "Ridged Horn Antenna with Adjustable Metallic Grid Sidewalls and Cross-Shaped Back Cavity," IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 15, 2016.
- [5] C. Burns, R. Vahldeick, "Analysis and simulation of 1-18 GHz broad band Double ridged horn Antenna," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 45, NO. 1, FEBRUARY 2003
- [6] Bennie Jacobs, Johann W. Odendaal, and Johan Joubert, "An Improved Design for a 1-18 GHz Double-Ridged Guide Horn Antenna," IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 60, NO. 9, SEPTEMBER 2012.
- [7] M. Abbas-Azimi, F. Arazm, and R. Faraji-Dana, "Design and optimisation of a high-frequency EMC wideband horn antenna," Antennas Propag., Vol.1, No.3, 580-583, June 2007.

زیر نویس‌ها

8 -Reflector

9-Aperture efficiency

10 -Double ridged

11 -Corrugated horn

12- Slant

13 -Cross-polar level

14 -Axial ratio

1- Antenna pattern

2-Horn antenna

3-Quad ridged

4-Wideband

5-Polarization

6-Monopulse radio direction finding

7-Feed