

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی برق گرایش مخابرات-میدان

عنوان پایان نامه :

طراحی و ساخت آنتن شیپوری TEM برای بانده ۲-۱۸ GHz

استاد راهنما: دکتر علیرضا ملاح زاده

نگارش: فرداد کارشناس

تابستان ۱۳۸۸

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهد
است و هر گونه چاپ و تکثیر از محتویات این اثر بدون
اجازه کتبی ممنوع است.

این پروژه تحت حمایت مرکز تحقیقات مخابرات ایران که
طبق قرارداد شماره ۱۱۵۲۸/۵۰۰ در تاریخ ۱۳۸۷/۵/۲۹ به
تصویب رسیده است، قرار دارد.






دانشگاه شاهرود
دانشکده فنی و مهندسی

صورت جلسه هیئت داوران رساله کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پروژه کارشناسی ارشد مربوط به آقای **فرداد کارشناس** به شماره دانشجویی ۸۵۷۵۱۵۰۰۶ در رشته مخابرات در روز ۸۸/۴/۹ در دانشکده فنی و مهندسی با حضور افراد ذیل تشکیل شد، نتیجه به قرار زیر است :

- پروژه نامبرده قابل قبول می باشد.
- پروژه نامبرده مردود می باشد.
- پروژه نامبرده به شرط انجام اصلاحات جزئی قابل قبول می باشد. نمره دانشجو متعاقباً اعلام می شود.

	امضاء	دانشگاه :	دکتر ملاح زاده	<input type="checkbox"/> نام استاد راهنمای اول
	امضاء	دانشگاه :	—	<input type="checkbox"/> نام استاد راهنمای دوم
	امضاء	دانشگاه :	—	<input type="checkbox"/> نام استاد مشاور اول
	امضاء	دانشگاه :	—	<input type="checkbox"/> نام استاد مشاور دوم
	امضاء	دانشگاه :	دکتر حسینی	<input type="checkbox"/> نام داور اول
	امضاء	دانشگاه :	دکتر ملاح زاده	<input type="checkbox"/> نام داور دوم
	امضاء	دانشگاه :	—	<input type="checkbox"/> نام داور سوم
	امضاء	دانشگاه :	—	<input type="checkbox"/> نام داور چهارم
	امضاء	دانشگاه :	دکتر حسینی	<input type="checkbox"/> نام نماینده معاونت پژوهشی

تقدیر و تشکر

از استاد راهنمای خود جناب آقای دکتر علیرضا ملاح زاده که همواره در طول دوران تحصیل دلسوزانه و بی هیچ شائبه‌ای در ارشاد و تشویق اینجانب اهتمام وافر داشته و همیشه گره‌گشای مشکلات علمی و عملی تحقیقات بنده بوده‌اند، کمال تشکر و امتنان را دارم. از داوران محترم آقایان دکتر کیوان فرورقی و دکتر غلامرضا داداش زاده که در جلسه دفاع حضور داشته و با راهنمایی‌های خود موجبات بهتر شدن این تحقیق را فراهم کرده‌اند، بسیار متشکرم.

چکیده

در این پایان نامه هدف طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن شیپوری TEM برای باند فرکانسی 2-18 GHz است، به طوری که در کل باند فرکانسی مشخصات امپدانسی و تشعشعی مطلوب داشته باشد. بدین معنی که VSWR آنتن در کل باند فرکانسی زیر 2 بوده و پترن تشعشعی تنها دارای یک لوب اصلی باشد. چرا که در مقالات دیده شده است که در آنتن های پهن باند مشابه پترن تشعشعی در بعضی از فرکانس ها دچار اعوجاج شده و لوب اصلی به دو گلبرگ با دامنه های برابر و به فرم متقارن حول محور اصلی آنتن شکسته می شود، لذا بایستی روشی جهت حذف این اعوجاج ارائه شود. با توجه به اینکه اعوجاج دیده شده در پترن تشعشعی ناشی از نحوه توزیع میدان روی دهانه خروجی آنتن است، بایستی به کمک شکل دهی دهانه خروجی آنتن، میدان روی دهانه به نحوی تغییر کند که اثر مخربی به روی میدان های دور نداشته باشد.

طراحی آنتن شیپوری TEM به دو قسمت، طراحی قسمت شیپوری و طراحی قسمت تغذیه تقسیم می گردد. در ابتدا قسمت شیپوری طراحی شده، سپس قسمت تغذیه مناسب به کمک موجبر دو تیغه ای بدون دیواره های کناری طراحی می گردد. در ادامه جهت حذف اعوجاج موجود در پترن تشعشعی آنتن، دو قسمت کمافی شکل از دو صفحه انتهایی آنتن حذف می گردد.

نتایج حاصل از شبیه سازی و ساخت نشان می دهد که این آنتن علاوه بر داشتن پترن تشعشعی مناسب در باند فرکانسی 2-14 GHz VSWR پایینی در این باند دارد.

فصل اول: مقدمه

۱.	تعریف پهن باند.....	۲
۲.	آنتن های شیپوری.....	۳
۲-۱.	آنتن های شیپوری معمولی.....	۳
۲-۲.	آنتن های شیپوری دو تیغه ای.....	۳
۲-۳.	آنتن های شیپوری چهار تیغه ای.....	۴
۲-۴.	آنتن های شیپوری TEM.....	۵
۲-۴-۱.	آنتن شیپوری TEM ارائه شده در سال ۱۹۸۲.....	۵
۲-۴-۲.	آنتن شیپوری TEM ارائه شده در سال ۲۰۰۵.....	۶
۲-۴-۳.	آنتن های شیپوری TEM ارائه شده در سال ۲۰۰۶.....	۸
۳.	موجبر صفحه موازی.....	۱۰
۳-۱.	مد TEM.....	۱۰
۳-۱-۱.	امپدانس مشخصه موجبر صفحه موازی برای مود TEM.....	۱۱
۳-۲.	مدهای TM.....	۱۲
۳-۳.	مدهای TE.....	۱۲
۴.	انواع نوار امپدانسی.....	۱۳
۵.	نحوه تست.....	۱۵
۵-۱.	ابزار های اندازه گیری.....	۱۵
۵-۱-۱.	فرستنده و گیرنده.....	۱۵
۵-۱-۲.	موقعیت دهنده.....	۱۶
۵-۱-۳.	پردازش داده.....	۱۶
۵-۲.	اندازه گیری پارامترهای مختلف آنتن.....	۱۷
۵-۲-۱.	اندازه گیری پترن تشعشعی.....	۱۷
۵-۲-۲.	اندازه گیری بهره.....	۱۷

فصل دوم: طراحی قسمت شیپوری آنتن

۱.	مقدمه.....	۱۸
۲.	طراحی قسمت شیپوری.....	۱۹
۳.	نمایه نمایی.....	۲۰
۴.	نمایه بیضوی.....	۲۲
۵.	نوار نمایی.....	۲۳
۶.	نوار چیبی شف.....	۳۰

فصل سوم: طراحی نهایی آنتن شیپوری TEM

۳۴	۱. مقدمه.....
۳۶	۲. موجبر دو تیغه ای بدون دیواره های کناری.....
۳۷	۳. طراحی قسمت تغذیه.....
۴۲	۴. طرح نهایی آنتن شیپوری TEM.....
۴۴	۵. نحوه ساخت.....
۴۹	۶. نتایج اندازه گیری.....

فصل چهارم: اصلاح آنتن شیپوری TEM

۵۲	۱. مقدمه.....
۵۳	۲. اصلاح آنتن شیپوری TEM.....
۵۳	۱-۲. اصلاح آنتن باند 1.8-19 GHz.....
۵۸	۲-۲. اصلاح آنتن باند 1.45-14.20 GHz.....
۶۳	۳. نتایج ساخت.....
۶۵	نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۶۷	پیوست الف.....
۶۹	مراجع.....

فصل اول

مقدمه

۱. تعریف پهن باند^۱

آنتن‌ها در بسیاری از کاربردها باید بطور موثری در یک محدوده وسیعی از فرکانس‌ها عمل نمایند. یک آنتن دارای پهنای باند فرکانسی وسیع را آنتن پهن باند می‌نامند. در ادامه مفهوم پهن باند را مشخصاً تعریف می‌کنیم. پهنای باند یک آنتن به دو فرم بیان می‌شود، در حالت اول فرض کنید که f_u و f_l به ترتیب فرکانس‌های بالا و پایین باند فرکانسی باشند که مشخصات تشعشعی و امپدانسی آنتن در این بازه فرکانسی مطلوب ارزیابی می‌شود، در ضمن فرکانس مرکزی یا فرکانس طراحی با f_c نشان داده می‌شود. در این حالت پهنای باند آنتن به صورت درصد عبارتست از:

$$BW = \frac{f_u - f_l}{f_c} \times 100 \quad (1-1)$$

در فرم دوم پهنای باند آنتن به صورت نسبت f_u به f_l تعریف می‌شود:

$$BW = \frac{f_u}{f_l} \quad (2-1)$$

پهنای باند آنتن‌های باند باریک همچون آنتن‌های میکرواستریپی^۲ معمولاً به صورت یک درصد توسط رابطه (۱-۱) و آنتن‌های پهن باند همچون آنتن‌های شیپوری دو تیغه‌ای^۳ به صورت یک نسبت توسط رابطه (۲-۱) بیان می‌شود. تعریف آنتن پهن باند تا حدودی اختیاری بوده و به آنتن خاص بستگی دارد. ولی می‌توان یک تعریف عملی را برگزید، بدین صورت که

^۱ Wide-Band

^۲ Microstrip Antenna

^۳ Double-Ridged Horn Antenna

اگر امپدانس و پترن تشعشی یک آنتن در محدوده یک اوکتاو، یعنی $f_u / f_l = 2$ یا بیشتر، بطور قابل ملاحظه ای تغییر نکند، آن را در گروه آنتن های پهن باند قرار می دهیم.

۲. آنتن های شیپوری^۴

آنتن های پهن باند و فرا پهن باند^۵ با بهره بالا جزء مهم ترین ابزار در کاربرد های ماکروویو، تست های EMC و ادوات اندازه گیری هستند [۱-۳]. دسته ای از آنتن ها که جهت این کاربرد ها مناسب باشند، آنتن های شیپوری هستند. استفاده از یک شیپور به عنوان آنتن به آغاز رادیو بر می گردد [۴]. آنتن شیپوری را می توان یک موجر باز شده تصور کرد. کار شیپور این است که یک جبهه موج یکنواخت در دهانه ای بزرگتر از دهانه موجر ایجاد کند تا راستاوری^۶ بیشتر شود. آنتن های شیپوری توانایی ایجاد پلاریزاسیون های مختلف یا ترکیبی از پلاریزاسیون ها را دارا هستند. ولی از طرفی آنتن های شیپوری معمولی پهنای باند کمی دارند.

۲-۱. آنتن های شیپوری معمولی

آنتن های شیپوری معمولی همان طوری که در شکل ۱-۱ نشان داده شده اند به دو نوع هرمی و مخروطی تقسیم می شوند. این آنتن ها به ترتیب توسط یک موجر مستطیلی و دایروی تحریک می شوند. برای کاهش بازتاب موج هدایت شده می توان ناحیه گذر یا شیپور بین دهانه موجر و دهانه فضای آزاد را به صورت نمایی باز کرد. ولی شیپورهای با بازشدگی خطی متداولترند [۵] چرا که شیپور های با بازشدگی خطی مرکز فاز ثابتی دارند ولی شیپور های با بازشدگی نمایی مرکز فاز ثابتی ندارند.

۲-۲. آنتن های شیپوری دو تیغه ای

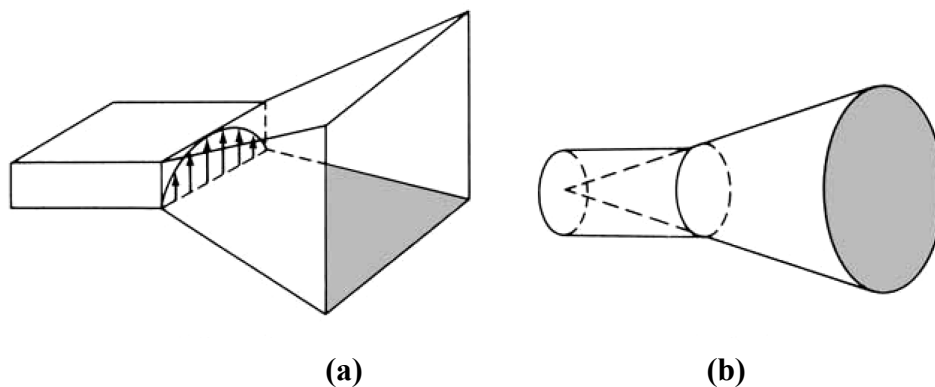
قرار دادن تیغه مرکزی بر موجر اثر بارگذاری دارد و پهنای باند مفید آن را با کاهش فرکانس قطع مود پایین زیاد می کند. به طوریکه پهنای باند موجر را تا ۱۰:۱ افزایش می دهد [۶]. با ادامه دادن ساختار دو تیغه ای موجر به شیپور هرمی به صورت نشان داده شده در شکل ۱-۲ می توان پهنای باند مفید آنتن شیپوری معمولی را چند برابر کرد. لازم به ذکر است که این آنتن نیز همانند آنتن های شیپوری معمولی توانایی ایجاد تنها یک پلاریزاسیون را دارد. هر چند که با قرار دادن قطبش دهنده^۷ در دهانه خارجی آنتن می توان دو پلاریزاسیون خطی عمود بر هم بدست آورد [۷].

⁴ Horn Antenna

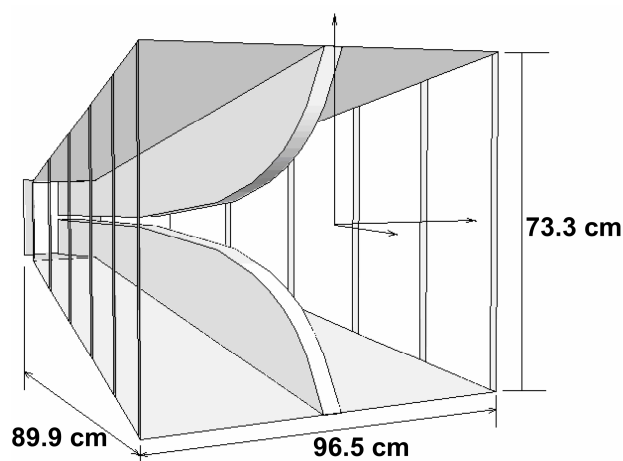
⁵ UWB

⁶ Directivity

⁷ Polarizer



شکل ۱-۱. آنتن های شیپوری معمولی (a) آنتن شیپوری هرمی (b) آنتن شیپوری مخروطی

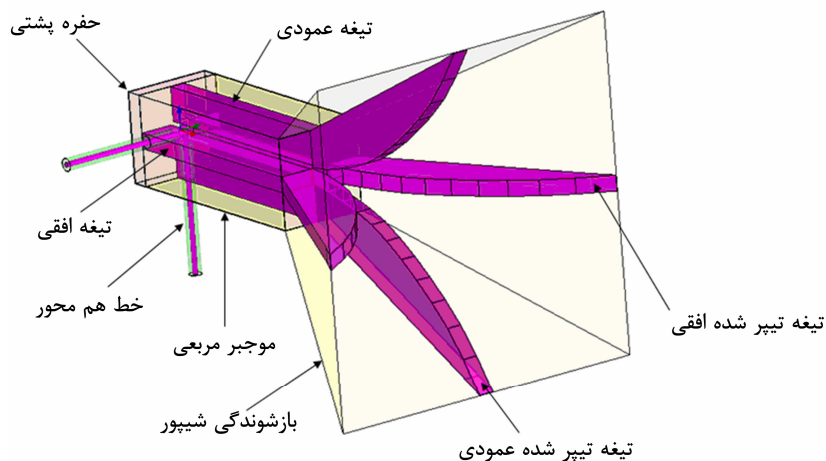


شکل ۱-۲. ساختار آنتن شیپوری دو تیغه ای ارائه شده در [۸]

۲-۳. آنتن های شیپوری چهار تیغه ای^۸

در تست های EMC، سیستم های راداری و ارتباطاتی خیلی مفید فایده و مطلوب است که در یک محدوده وسیعی از فرکانس ها از دو پلاریزاسیون مختلف استفاده نمود. یک روش ایجاد دو پلاریزاسیون عمود بر هم در یک موجبر قرار دادن چهار تیغه متقارن در یک موجبر مربعی است. با قرار دادن چهار تیغه در یک موجبر مربعی فرکانس قطع مود TE_{11} خیلی به فرکانس مود TE_{10} نزدیک می شود، این سبب افزایش پهنای باند بین دو مود TE_{10} و TE_{20L} می گردد [۹]. همانند آنتن شیپوری دو تیغه ای با ادامه دادن ساختار موجبر چهار تیغه ای به شیپور هرمی به صورت نشان داده شده در شکل ۱-۳ می توان آنتنی با پهنای باند وسیع و قابلیت ایجاد دو پلاریزاسیون مختلف تحت عنوان آنتن شیپوری چهار تیغه ای ایجاد نمود [۱۰].

⁸ Quad-Ridged Horn Antenna



شکل ۱-۳. ساختار آنتن شیپوری چهار تیغه ای

۲-۴. آنتن های شیپوری TEM

در نتیجه تلاشهای محققان که جهت افزایش راستاوری و یا بهره^۹، برای یک آنتن پهن باند و غیر پراکنده کننده^{۱۰} صورت گرفت، آنتن شیپوری TEM ارائه گردید. یک آنتن شیپوری TEM شامل یک جفت هادی مثلی به شکل V است، که توانایی ارسال و دریافت یک پالس زودگذر^{۱۱} را دارد. مد انتشاری آنتن شیپوری TEM در کل باند فرکانسی به صورت TEM است، از طرفی امپدانس مشخصه این آنتن بر حسب فرکانس ثابت بوده و با حذف اثرات پراش^{۱۲} ناشی از لبه، یک موج کروی با پلاریزاسیون خطی تابش می کند. طرح اصلی آنتن شیپوری TEM بر اساس آنتن دو مخروطی^{۱۳} با طول بی نهایت است.

سال های متمادی است که از آنتن شیپوری TEM جهت کاربردهای تابش پالس^{۱۴} از جمله سیستم های رادار نافذ زمین^{۱۵} (GPR) استفاده می شود. با توجه به اینکه مشخصات آنتن شیپوری TEM به طور کامل در حوزه زمانی مورد بررسی قرار گرفته است، لازم است که مشخصات این آنتن در حوزه فرکانسی نیز مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

۲-۴-۱. آنتن شیپوری TEM ارائه شده در سال ۱۹۸۲

یکی از اهداف اصلی در طراحی آنتن شیپوری TEM حصول مشخصات پهن باند است. جهت رسیدن به این هدف روش های مختلفی ارائه شده است. کاند^{۱۶} در سال ۱۹۸۲ با قرار دادن یکسری مقاومت در آنتن شیپوری TEM سعی در افزایش

⁹ Gain

¹⁰ Non-Dispersive Antenna

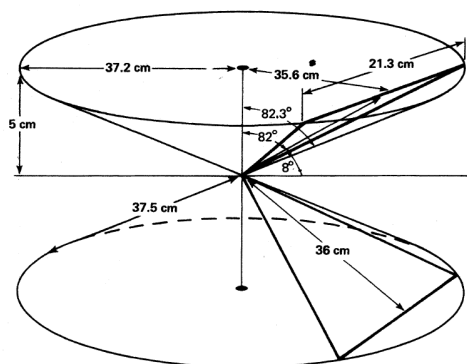
¹¹ Fast Transient Pulse

¹² Diffraction

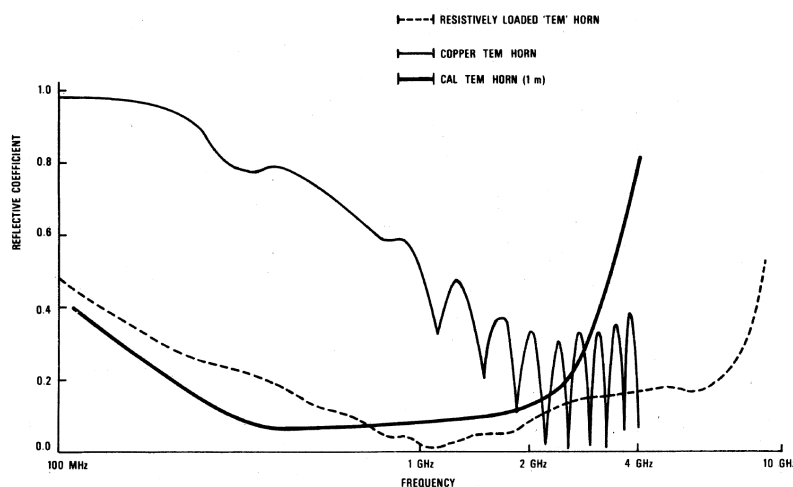
¹³ Biconical Antenna

¹⁴ Pulse Radiation

¹⁵ Ground Penetrating Radar



شکل ۴-۱. آنتن شیپوری TEM ارائه شده توسط کاندا



شکل ۵-۱. ضریب انعکاس آنتن شیپوری TEM ارائه شده توسط کاندا در مقایسه با دیگر آنتن ها

پهنای باند آنتن نمود [۱۱]. آنتن ارائه شده توسط کاندا را در شکل ۴-۱ ملاحظه می فرمائید. ضریب انعکاس این آنتن را نیز در شکل ۵-۱ ملاحظه می فرمائید. مشاهده می گردد که در مقایسه با دیگر آنتن های طراحی شده در آن زمان این آنتن پهنای باند بیشتری دارد. جهت کاهش اعوجاج و بازگشتی ها در انتهای آزاد آنتن آقای شالگر^{۱۷} در سال ۱۹۹۶ آنتنی با ورقی مقاومتری ارائه داد [۱۲]. ولی در این دو آنتن به دلیل استفاده از مواد مقاومتری بازده آنتن کاهش می یابد. لذا یک روش جایگزین بدون استفاده از مواد مقاومتری بایستی ارائه شود تا این مشکل برطرف گردد.

۲-۴-۲. آنتن شیپوری TEM ارائه شده در سال ۲۰۰۵

در سال ۲۰۰۵ آقای چانگ^{۱۸} یک آنتن شیپوری TEM پهن باند به کمک نوار^{۱۹} نمایی ارائه کرد [۱۳]. در این آنتن که برای باند فرکانسی 70-1600 MHz طراحی شده است، از یک بالون میکرواستریبی جهت تغذیه استفاده شده است. آنتن

¹⁶ Kanda

¹⁷ Shlager

¹⁸ Chung

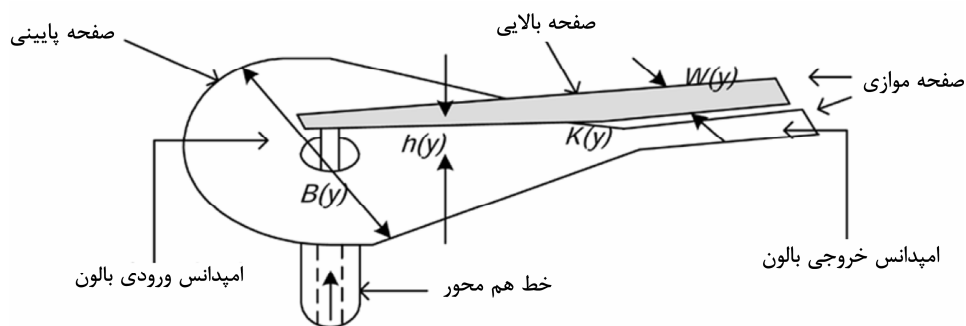
ساخته شده را در شکل ۶-۱ ملاحظه می کنید. طراحی این آنتن به دو قسمت، طراحی قسمت شیپوری و طراحی قسمت بالون تقسیم می شود. در ادامه به نحوه طراحی بالون خواهیم پرداخت.

یک بالون از نوع میکرواستریپی را در شکل ۷-۱ ملاحظه می فرمائید. پارامترهای طراحی بالون عبارتند از عرض صفحه بالایی، عرض صفحه پایینی، فاصله بین صفحات و امپدانس مشخصه بین صفحات. فاصله بین صفحات بالایی و زمین ثابت باقی می ماند. عرض صفحه بالایی به طور افزایشی و عرض صفحه پایینی به طور کاهششی تغییر می کند. لذا امپدانس مشخصه بالون از نوع میکرواستریپی به تدریج از خط هم محور به موجبر صفحه موازی تغییر می کند. مهمترین هدف در طراحی یک بالون تطبیق امپدانس بین امپدانس ورودی آنتن شیپوری TEM و امپدانس خروجی بالون است. امپدانس مشخصه در هر نقطه از بالون به صورت زیر بیان می شود:

$$K(y) = \frac{120\pi}{\left[\frac{w(y)}{h(y)} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w(y)}{h(y) + 1.444} \right) \right]} \quad \frac{w(y)}{h(y)} \geq 1 \quad (3-1)$$



شکل ۶-۱. آنتن شیپوری TEM ساخته شده توسط آقای چانگ



شکل ۷-۱. ساختار بالون از نوع میکرواستریپی

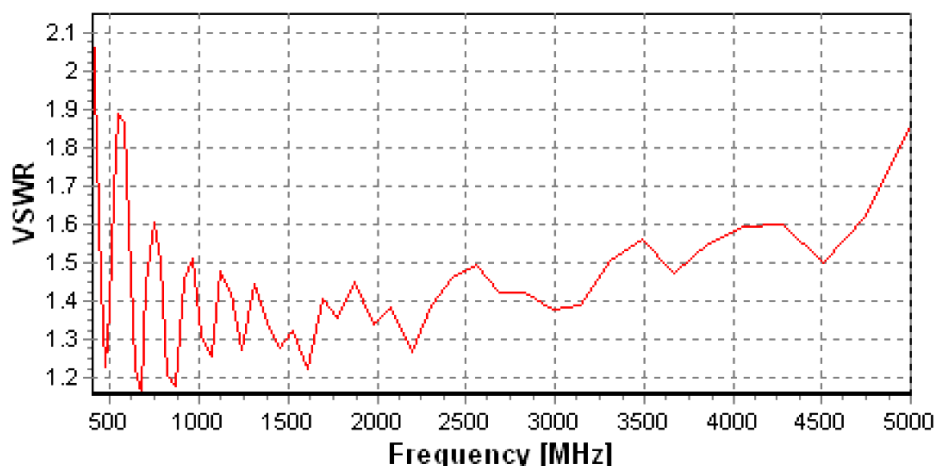
۲-۴-۳. آنتن های شیپوری TEM ارائه شده در سال ۲۰۰۶

در سال های اخیر کارهای بسیاری بروی آنتن شیپوری TEM صورت گرفته است، از جمله آنتنی که توسط خانم بسام در دانشگاه تهران در سال ۲۰۰۶ ارائه شد [۱۴]. در این آنتن سعی گردید تا به کمک نوار چبی شف ضریب انعکاس بهتر و پهنای باند بزرگتری به دست آید. ساختار آنتن ساخته شده در دانشگاه تهران را در شکل ۸-۱ ملاحظه می کنید. در ساختار این آنتن از تئوری تصویر استفاده شده است.

طول محوری آنتن 60 cm و ابعاد دهانه آنتن 50×50 cm است. آنتن توسط یک خط هم محور تغذیه شده است. VSWR آنتن را در شکل ۹-۱ برای نوار چبی شف ملاحظه می کنید. مشاهده می گردد که نوار چبی شف تطبیق بهتری به روی محدوده وسیعی از فرکانسها دارد، ولی در این مقاله پترن تشعشعی آنتن مورد بررسی قرار نمی گیرد.

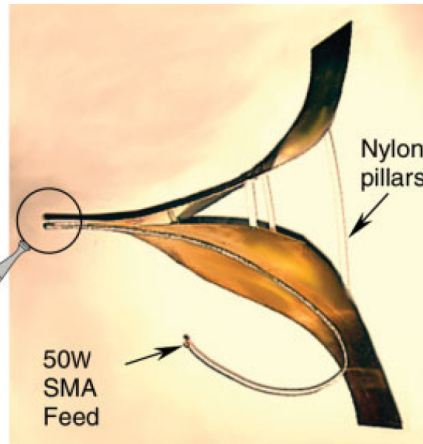


شکل ۸-۱. آنتن شیپوری TEM ساخته شده در دانشگاه تهران

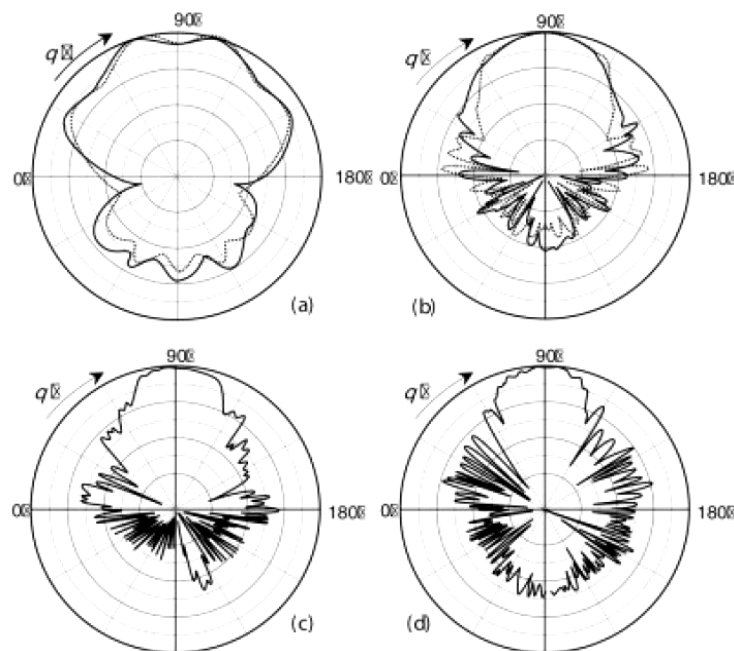


شکل ۹-۱. ضریب انعکاس آنتن شیپوری TEM طراحی شده به کمک نوار نمایی

آنتن دیگری که جهت افزایش پهنای باند به کمک نمایه بیضوی^{۲۰} توسط آقای مالهرب^{۲۱} در سال ۲۰۰۶ ارائه گردید را در شکل ۱۰-۱ ملاحظه می کنید [۱۵]. VSWR این آنتن در باند فرکانسی 500 MHz- 7.5 GHz زیر 2 قرار دارد. ولی همان طوری که در شکل ۱۱-۱ ملاحظه می کنید پترن تشعشی این آنتن در صفحه E-Plane دچار اعوجاج می گردد و عملاً کاربرد این آنتن را دچار مشکل می کند. اعوجاج پترن تشعشی در تمامی آنتن های شیپوری TEM پهن باند دیده می شود [۱۵-۱۶]. این اعوجاج ناشی از نحوه توزیع میدان الکتریکی بروی دهانه خروجی آنتن است.



شکل ۱۰-۱. آنتن شیپوری TEM طراحی شده به کمک نمایه بیضوی



شکل ۱۱-۱. پترن تشعشی آنتن شیپوری TEM طراحی شده به کمک نمایه بیضوی در صفحه E-Plane

²⁰ Profile

²¹ Malherbe

با توجه به عدم طراحی آنتن شیپوری TEM برای کار در باندهای فرکانسی S، C، X و Ku در این پایان نامه سعی در طراحی آنتنی با پهنای باند فرکانسی 2-18 GHz خواهیم نمود، به طوری که در کل باند فرکانسی پترن تشعشی مطلوبی داشته باشیم. طراحی آنتن شیپوری TEM به دو قسمت، طراحی قسمت شیپوری و طراحی قسمت تغذیه تقسیم می گردد. در فصل دوم به بررسی قسمت شیپوری آنتن پرداخته و در فصل سوم با طراحی قسمت تغذیه طراحی آنتن اولیه به اتمام می رسد. در این فصل نتایج اندازه گیری برای آنتن اولیه قرار داده شده است. در ادامه و در فصل چهارم روشی جهت حذف اعوجاج پترن ارائه می گردد و نتایج اندازه گیری آنتن جدید قرار داده می شود.

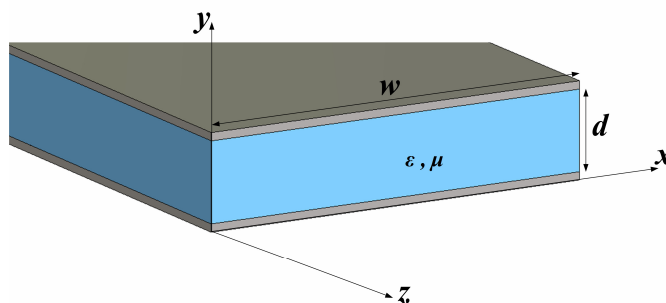
در ادامه این فصل با توجه به اینکه در ساختار آنتن شیپوری TEM از موجبر صفحات موازی استفاده شده است جهت یادآوری به بررسی این موجبر می پردازیم، در ادامه با توجه به کاربرد نوار امپدانسی مبحثی در این مورد خواهیم داشت و در انتها با توجه به ساخت آنتن، نحوه اندازه گیری پترن تشعشی و بهره آنتن را بیان خواهیم نمود.

۳. موجبر صفحه موازی [۱۷]

موجبرهای با صفحات موازی شاید ساده ترین نوع هادی ها هستند که مودهای TE، TM و مد TEM را تحت پوشش قرار می دهند، همان طوری که در شکل ۱-۱۲ ملاحظه می گردد این موجبر از دو صفحه مسطح تشکیل شده است. برای تحلیل این موجبر پهنای صفحات را در مقایسه با فاصله بین صفحات بسیار بزرگتر در نظر می گیریم، بنابراین میدان های انحرافی در لبه های صفحه و هر گونه تغییر در راستای محور x را می توان صرفنظر نمود. فرض است که ماده ای با ضریب نفوذ پذیری الکتریکی ϵ و ضریب نفوذ مغناطیسی μ فضای بین دو صفحه را کاملاً پوشانده است. در ادامه پاسخ های امواج TEM و TE، TM را مورد بحث قرار می دهیم.

۳-۱. مد TEM

پاسخ مد TEM با استفاده از حل معادله لاپلاس برای پتانسیل الکتریکی ساکن $\Phi(x, y)$ بین دو صفحه به صورت زیر به دست می آید:



شکل ۱-۱۲. ساختار موجبر صفحه موازی

$$\nabla_t^2 \Phi(x, y) = 0 \quad 0 \leq x \leq W, \quad 0 \leq y \leq d \quad (4-1)$$

اگر فرض نماییم که صفحه پایینی به زمین متصل بوده و پتانسیل آن صفر باشد و صفحه بالایی نیز دارای پتانسیل V_0 باشد شرایط مرزی برای $\Phi(x, y)$ به صورت زیر خواهد شد:

$$\Phi(x, 0) = 0, \quad \Phi(x, d) = V_0 \quad (5-1)$$

از آنجا که هیچ گونه تغییری در جهت x نداریم در نتیجه پاسخ عمومی $\Phi(x, y)$ برای معادله به صورت زیر می باشد:

$$\Phi(x, y) = A + By$$

ثابت های A و B با استفاده از شرایط مرزی که در رابطه ۵-۱ آمده اند، به دست می آیند و در نتیجه خواهیم داشت:

$$\Phi(x, y) = V_0 y / d \quad (6-1)$$

در نتیجه کل میدان الکتریکی به صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{E}(x, y, z) = -\hat{y} \frac{V_0}{d} e^{-jkz} \quad (7-1)$$

که در آن $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$ ثابت انتشار موج TEM می باشد. میدان مغناطیسی نیز به صورت زیر به دست می آید:

$$\bar{H}(x, y, z) = \frac{1}{\eta} \hat{z} \times \bar{E}(x, y, z) = \hat{x} \frac{V_0}{\eta d} e^{-jkz} \quad (8-1)$$

که در آن $\eta = \sqrt{\mu / \epsilon}$ امپدانس ذاتی محیط مابین دو صفحه موازی می باشد.

۳-۱-۱. امپدانس مشخصه موجبر صفحه موازی برای مود TEM

برای محاسبه امپدانس مشخصه موجبر صفحه موازی در مود TEM بایستی در ابتدا اختلاف ولتاژ صفحه بالایی نسبت به صفحه پایینی را محاسبه نمود:

$$V = -\int_0^d E_y dy = V_0 e^{-jkz} \quad (9-1)$$

جریان کلی بروی صفحه بالایی را می توان با استفاده از قانون آمپر یا چگالی جریان سطحی به صورت زیر محاسبه نمود:

$$I = \int_0^w \bar{J}_s \cdot \hat{z} dx = \int_0^w -(\hat{y} \times \bar{H}) \cdot \hat{z} dx = \int_0^w H_x dx = \frac{w V_0}{\eta d} e^{-jkz} \quad (10-1)$$

بنابراین امپدانس مشخصه به صورت زیر به دست می آید:

$$Z_0 = \frac{V}{I} = \eta \frac{d}{w} \quad (11-1)$$

همان طوری که ملاحظه می گردد امپدانس مشخصه موجبر صفحه موازی عددی ثابت بوده (با تغییر فرکانس تغییر نمی کند) و از طرفی فقط به پارامتر های ماده عایق و شکل هندسی صفحات هادی بستگی دارد.

۳-۲. مدهای TM

همان طوری که می دانیم امواج مغناطیسی عرضی (TM) با مشخصه $E_z \neq 0$ و $H_z = 0$ معرفی می گردند. لذا با حل معادله هلمهولتز عددی در مختصات قائم و لحاظ نمودن شرایط مرزی بروی صفحات $y=0$ و $y=d$ ، می توان تابع امواج اولیه^{۲۲} مولد مود های TM را به فرم زیر نوشت:

$$\psi_n^{TM} = \sin\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-\gamma_n z} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (12-1)$$

هر مقدار n مربوط به مد متفاوتی بوده و به صورت TM_n مشخص می گردد. هر مد ثابت انتشار خاص خود را دارد که به کمک معادله تفکیک به صورت زیر به دست می آید:

$$\gamma_n = j \sqrt{k^2 - \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2} \quad (13-1)$$

با توجه به رابطه فوق می توان فرکانس قطع مود TM_n را به صورت زیر خلاصه نمود:

$$f_c = \frac{n}{2d\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (14-1)$$

مولفه های میدان با استفاده از رابطه (۱۲-۱) قابل محاسبه بوده و به صورت زیر می باشند:

$$\begin{aligned} E_x &= 0 \\ E_y &= -\frac{n\pi\gamma_n}{\hat{y}d} \cos\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-\gamma_n z} \\ E_z &= \frac{1}{\hat{y}} \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2 \sin\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-\gamma_n z} \end{aligned} \quad (15-1)$$

۳-۳. مدهای TE

امواج الکتریکی عرضی (TE) با مشخصه $E_z = 0$ و $H_z \neq 0$ معرفی می گردند و تابع امواج اولیه مولد این مود ها به فرم زیر به دست می آید:

$$\psi_n^{TE} = \cos\left(\frac{n\pi y}{d}\right) e^{-\gamma_n z} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16-1)$$

ثابت انتشار و فرکانس قطع مود های TE_n به کمک معادله های (۱۳-۱) و (۱۴-۱) به دست می آیند. در ضمن مولفه های میدان به صورت زیر به دست می آیند:

²² Elementary Wave Functions