





دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

بررسی اثر تلفات بر عملکرد آرایه آنتن‌های بازتابنده

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات

محمد مهر جوفر

استاد راهنما

دکتر ابوالقاسم زید آبادی نژاد



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق -مخابرات آقای محمد مهر جوهر

تحت عنوان

بررسی اثر تلفات بر عملکرد آرایه آنتن‌های بازتابنده

در تاریخ ۹۰/۲/۱۹ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر امیر برجی

۲- استاد مشاور پایان نامه

دکتر سید محمود مدرس هاشمی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است. این پایان نامه با حمایت مادی و
معنوی مرکز تحقیقات مخابرات ایران به انجام
رسیده است.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هفت	فهرست مطالب.....
۱	چکیده.....
۲	فصل اول: مقدمه.....
۳	۱-۱ عملکرد آرایه آنتن‌های بازتابنده چاپی.....
۴	۲-۱ مکانیزم تغییر فاز.....
۴	۳-۱ مزایای آرایه بازتابنده‌ها.....
۵	۴-۱ مروری بر کارهای انجام شده و زمینه‌های پژوهشی.....
۶	۵-۱ ساختار پایان نامه.....
۸	فصل دوم: روش‌های تحلیلی و عددی برای یافتن فاز موج پراکنده شده از عناصر آرایه بازتابنده.....
۸	۱-۲ محاسبه‌ی تغییر فاز لازم در هر عنصر.....
۹	۲-۲ طراحی آرایه بازتابنده با صرف نظر کردن از تزویج متقابل بین عناصر آن.....
۱۰	۱-۲-۲ پچ‌های یکسان با طول‌های مختلف استاب‌های الحاقی.....
۱۳	۲-۲-۲ پچ‌های یکسان با چرخش‌های زاویه‌ای مختلف استاب‌ای الحاقی.....
۱۵	۳-۲ تحلیل و طراحی آرایه بازتابنده با لحاظ کردن تقریبی تزویج متقابل میان عناصر.....
۱۵	۱-۳-۲ بسط میدان‌های یک آرایه متناوب بی‌نهایت دو بعدی بر حسب مدهای فلوکه.....
	۲-۳-۲ امپدانس سطحی آرایه‌ای (به لحاظ الکتریکی) فشرده از پچ‌های مربعی بر روی یک دی الکتریک
۲۱	زمین شده.....
۲۴	۳-۳-۲ شبیه سازی آرایه بی‌نهایت توسط یک سلول واحد.....
۲۷	۴-۳-۲ روش‌های عددی در ساختارهای متناوب.....
۲۹	فصل سوم: تأثیر اجزای مختلف آرایه بازتابنده بر عملکرد آن.....
۳۰	۱-۳ عناصر.....

- ۳۰ ۱-۱-۳ پیچ مستطیلی با استاب الحاقی
- ۳۱ ۲-۱-۳ پیچ مستطیلی
- ۳۳ ۳-۱-۳ عنصر با شکل آسیاب بادی
- ۳۴ ۴-۱-۳ استفاده از دو نوع عنصر مختلف در طراحی آرایه بازتابنده
- ۳۶ ۲-۲-۳ زیر لایه
- ۳۶ ۱-۲-۳ ضریب نفوذ پذیری الکتریکی
- ۳۷ ۲-۲-۳ ضخامت دی الکتریک
- ۳۷ ۳-۲-۳ تعداد لایه‌های آرایه
- ۳۸ ۳-۳ فیدر
- ۴۰ ۱-۳-۳ بازدهی پنجره، روشنایی و سرریز
- ۴۲ ۲-۳-۳ تأثیر اجزاء فیدر بر بازدهی پنجره
- ۴۵ ۴-۳ صفحه زمین
- ۴۸ ۵-۳ تغییر فاز دهنده
- ۴۸ ۱-۵-۳ دیود ورکتور برای کنترل فاز
- ۵۰ ۲-۵-۳ MEMS برای کنترل فاز
- ۵۲ ۵-۳ شبکه آرایه
- ۵۳ فصل چهارم: تلفات در آرایه بازتابنده
- ۵۳ ۱-۴ تأیید شیوه‌ی شبیه‌سازی
- ۵۴ ۱-۱-۴ تلفات در یک لایه عایق تلفاتی زمین شده با فلز مس
- ۵۸ ۲-۱-۴ تلفات سلول با عنصر پیچ مربعی
- ۶۱ ۲-۴ مدار معادل فشرده برای مدل کردن پاسخ فرکانسی آرایه بازتابنده
- ۶۳ ۳-۴ تلفات سلول با عنصر پیچ ترکیبی
- ۶۳ ۱-۳-۴ تلفات به ازای مقادیر مختلف طول a

۶۳ ۲-۳-۴ تغییر تلفات با تغییر تاثرات تلفات
۶۵ ۳-۳-۴ تغییر فرکانس رزونانس و فاز بازتابشی با تغییر تاثرات تلفات
۶۶ ۴-۴ طراحی دو آرایه آنتن بازتابنده‌ی تلفاتی نمونه
۶۶ ۱-۴-۴ آرایه آنتن بازتابنده I
۷۰ ۲-۴-۴ آرایه آنتن بازتابنده II
۷۲ فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷۲ ۱-۵ نتیجه‌گیری
۷۳ ۲-۵ پیشنهادات
۷۴ مراجع

چکیده

آرایه آنتن‌های بازتابنده به دلیل ترکیب برخی از بهترین خصوصیات آنتن‌های رفلکتوری و آرایه‌ای با یکدیگر، سال‌هاست که مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. این آنتن‌ها به دلیل استفاده از تکنولوژی میکرواستریپ، آنتن‌هایی ارزان، کوچک و سبک هستند. در این پایان‌نامه نگاه نسبتاً جامعی به عملکرد آرایه آنتن‌های بازتابنده شده است. پس از توضیحاتی مقدماتی در ارتباط با عملکرد این آنتن‌ها روش‌های مختلف محاسبه‌ی فاز موج پراکنده شده از سلول آرایه تشریح شده‌اند. برای محاسبه نمودارهای اندازه و فاز پراکندگی از نرم افزار Ansoft HFSS استفاده شده است. در یافتن تمامی نمودارها فرض شده که عنصر درون یک آرایه متناوب بی‌نهایت از عناصری همانند خود قرار دارد لذا شبیه سازی آرایه به شبیه سازی یک سلول واحد آن کاهش یافته است. همچنین عملکرد اجزاء مختلف آرایه اعم از پچ‌ها، زیر لایه، فیدر، صفحه زمین، تغییر فاز دهنده و شبکه آرایه در عملکرد آن تشریح شده‌اند. یکی از مواردی که در مبحث آرایه بازتابنده، تاکنون کم‌تر از دیگر مباحث مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته مسئله تلفات در آن است. این مسئله از نقطه نظرهای مختلفی از جمله: تغییرات تلفات با تغییر فرکانس کار، تغییر تلفات با تغییر تانژانت دی الکتریک عایق، تغییر فرکانس رزونانس و در نتیجه فاز موج بازتابشی با تغییر تانژانت تلفات بررسی شده است. عنصری که این بررسی‌ها در مورد آن انجام شده یک پچ ترکیبی از جنس مس است که بر روی یک عایق تلفاتی زمین شده با مس قرار دارد. در نهایت با استفاده از نمودارهای فاز پراکندگی عنصر پچ مربعی-که با فرض‌های ایده‌آل بدست آمده‌اند- دو آرایه آنتن بازتابنده، طراحی و ساختار بدست آمده شبیه سازی شده است. علی‌رغم فاصله داشتن خصوصیات آرایه‌ی طراحی شده، با فرض‌های ایده‌آل، بیم اصلی آنتن‌ها به جهت مورد نظر هدایت شده است.

کلمات کلیدی: آرایه آنتن بازتابنده، گستره‌ی فاز، نمودار فاز پراکندگی، تلفات.

فصل اول

مقدمه

«آرایه آنتن‌های بازتابنده‌ی چاپی»^۱ آنتن‌هایی هستند که در آنها شیوه تغذیه «آنتن‌های بازتابنده»^۲ با اصول طراحی آنتن‌های آرایه‌ای و تکنولوژی میکرواستریپ با هم ترکیب می‌شوند. به عبارت واضح‌تر عناصر این آرایه آنتن‌ها عموماً آنتن میکرواستریپ چاپی بوده و تغذیه آنها به جای خطوط انتقال تقسیم کننده توان، توسط یک «آنتن شیپوری کوچک»^۳ انجام می‌شود و از همین رو آنتن‌هایی کوچک، سبک و ارزان هستند. تکنولوژی ساخت این آنتن‌ها فرکانس‌های مایکروویو و همچنین امواج میلی متری را در بر می‌گیرد. آرایه‌های بازتابنده «ساختارهایی شبه متناوب»^۴ هستند لذا در تحلیل آنها می‌توان از ابزارهای تحلیلی‌ای که برای تحلیل ساختارهای متناوب وجود دارد استفاده کرد. با این آنتن‌ها هم می‌توان پترن با «بیم مدادی»^۵ و هم «بیم شکل یافته»^۶ ساخت. همچنین می‌توان آنها را طوری طراحی کرد که بیم اصلی همواره در جهتی ثابت بوده و یا بخشی از فضا را اسکن کند [۱ تا ۳].

۱ - Printed Reflectarray Antennas

۲ - Reflector Antennas

۳ - Horn Antenna

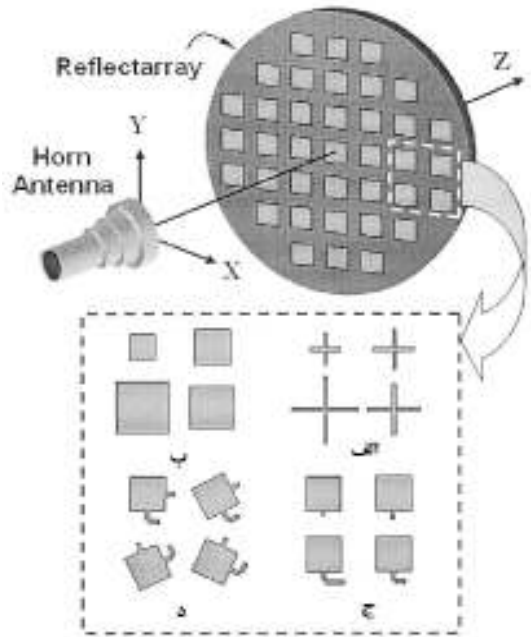
۴ - Quasi-Periodic Structure

۵ - Pencil Beam

۶ - Contoured Beam

۱-۱ عملکرد آرایه آنتن‌های بازتابنده چاپی:

یک آرایه آنتن بازتابنده چاپی نمونه در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود این آرایه آنتن متشکل است از یک «آرایه مسطح»^۱ از عناصر چاپی تشعشع کننده که توسط آنتن شیپوری تغذیه مورد تابش قرار می‌گیرند.



شکل ۱-۱ آرایه آنتن بازتابنده میکرواستریپ چاپی با عناصر تغییر فاز دهنده مختلف. الف) آنتن‌های دوقطبی‌های با اندازه متغیر، ب) آنتن‌های پیچ با اندازه متغیر، ج) آنتن‌های پیچ یکسان با استاب‌های الحاقی با طول‌های مختلف و د) آنتن‌های پیچ یکسان با استاب‌های الحاقی چرخیده در زوایای مختلف. [۴]

جهت تشریح عملکرد این آنتن فرض کنید که آنتن در حالت فرستندگی کار کرده و عناصر در میدان‌های راه دور آنتن شیپوری - که در مرکز یا با آفست قرار دارد- هستند. در این حالت میدان‌های الکترومغناطیسی‌ای که به هر عنصر آرایه بازتابنده تحت زاویه‌ی معینی می‌تابد را به طور موضعی می‌توان موج تختی در نظر گرفت که فاز آن متناسب با فاصله‌ی مرکز فاز آنتن شیپوری با عنصر است. برای تبدیل موج کروی تاییده شده از منبع شیپوری به یک بیم متمرکز، میدان باید با تغییر فاز مناسبی از هر عنصر بازتابنده شود. برای تولید یک بیم مدادی در جهت مطلوب، تغییر فاز هر عنصر مستقلاً به گونه‌ای تنظیم می‌شود که یک «توزیع فاز پیش‌رونده»^۲ از میدان‌های بازتابشی بر روی سطح آرایه ایجاد شود. [۱]

۱ - Planar Array

۲ - Progressive Phase Distribution

۲-۱ مکانیزم تغییر فاز:

تغییر فاز مناسب - بسته به این که بیم اصلی در جهت ثابتی است و یا بخشی از فضا را اسکن می کند - به دو صورت مختلف انجام می شود: در حالت اول - که در (شکل ۱-۱) نشان داده شده است - تغییر فاز با تنظیم یکی از پارامترهای هندسی هر عنصر انجام می شود. به طور مثال چنانچه عناصر، آنتن های پچ با اندازه مختلف باشند با تنظیم اندازه هر کدام می توان به تغییر فاز مناسب رسید. در حالت دوم همه عناصر به لحاظ هندسی می توانند یکسان باشند. برای تغییر فاز به هر عنصر یک تغییر فاز دهنده متصل می شود. آنتن توان تابشی از فیدر را دریافت کرده، به تغییر فاز دهنده می دهد. تغییر فاز دهنده موج را دچار تغییر فاز مناسب کرده به آنتن باز پس می فرستد و آنتن سیگنال را بازتشنع می کند.

۳-۱ مزایای آرایه بازتابنده ها:

آرایه بازتابنده با ابعاد بزرگ، همانند «آنتن بازتابنده ی سهموی»^۱ می تواند بازدهی بسیار خوبی (بیش از پنجاه درصد) داشته باشد چرا که نیازی به تقسیم کننده توان نداشته و لذا با «افت عبوری»^۲ بسیار کمی مواجه می شود. از دیگر سو بیم اصلی این آنتن - بسیار شبیه به یک آنتن آرایه فازی - می تواند تا زوایای بسیار بزرگی (بیش از پنجاه درجه) نسبت به جهت ورود ساید^۳ منحرف شود. برای اسکن الکترونیکی بیم در زوایای گسترده می توان تغییر فاز دهنده های کم تلفات را با عناصر ترکیب کرد. در این حالت - برخلاف آنتن های آرایه فازی متعارف - دیگر نیاز به شبکه های پیچیده ی شکل دهنده ی بیم با تلفات زیاد و ماژول های تقویت کننده ی گیرنده - فرستنده گران قیمت ندارد. یکی از مزایای قابل توجه آرایه بازتابنده چاپی تخت بودن سطح بازتابنده ی آن است. این خصوصیت زمانی که به یک آنتن فضایی بزرگ نیاز است بسیار مهم می شود. از دیگر خصوصیت این آنتن ها حجم و وزن اندک آنها است. ساخت یک آرایه بازتابنده با صدها و یا هزاران عنصر - که هر کدام در قالب یک آنتن میکرواستریپ چاپی است - را به سادگی و ارزانی با «فرآیند حک کردن شیمیایی»^۴ می توان ساخت. همچنین می توان چند فیدر در فاصله کانونی آنتن گذاشت و به قابلیت بیم چند گانه رسید. [۵]

۱ - Parabolic Reflector Antenna

۲ - Insertion Loss

۳ - Broadside

۴ - Chemical Etching Process

۱-۴ مروری بر کارهای انجام شده و زمینه‌های پژوهشی:

اگر چه اولین آرایه آنتن بازتابنده در سال ۱۹۶۳ با استفاده از عناصر موجبری معرفی گردید اما توجه واقعی به آرایه بازتابنده تنها در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ با پیشرفت آنتن‌های چاپی کوچک اتفاق افتاد [۱]. از این پس پژوهش‌ها و کارهای زیادی در زمینه آرایه بازتابنده انجام شد که در ادامه به برخی از جدیدترین آنها اشاره می‌شود.

عناصر در انواع و اقسام شکل‌ها طراحی و شبیه‌سازی گردیده که برخی از آنها در شکل (۱-۱) نمایش داده شده‌اند. همچنین نمودارهای فاز پراکندگی (نمودارهایی که فاز موج پراکنده شده از عنصر را بر حسب تغییرات پارامتر هندسی آن می‌دهند) عناصر صلیبی شکل در [۶ و ۷]، فرکتالی در [۸ و ۹]، حلقوی دایروی دو لایه در [۱۰] و حلقوی مربعی در [۱۱ و ۱۲] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. [۱۳] برای عنصر با تزویج شکافی یک مدل خط انتقالی ارائه کرده است. عنصر [۱۴] یک دو قطبی است که در دو طرف آن یک جفت دو قطبی پارازیتی قرار دارند. تأثیر حضور این جفت دو قطبی پارازیتی افزایش گستره‌ی فاز عنصر است.

[۱۵] با استفاده از یک «سطح انتخاب‌گر فرکانس» (FSS)^۱ به عنوان صفحه‌ی زمین آرایه بازتابنده، سطح مقطع راداری آنتن را در خارج از باند فرکانسی مورد نظر کاهش داده است. [۱۶] خصوصیات انتقالی یک FSS فرکتالی با ساختار دایره‌ای را مورد بررسی قرار داده است.

آرایه آنتن بازتابنده دارای یک ایراد مهم است و آن پهنای باند باریک آن است که عموماً بین ۳ تا ۵ درصد است. دو مؤلفه اساسی پهنای باند را کاهش می‌دهند. یکی بسته به نیاز جبران فاز برای تبدیل جبهه موج کروی تابیده شده از فیدر به یک جبهه موج صفحه‌ای توسط آرایه بازتابنده است و دیگری مرتبط با پهنای باند کم آنتن میکرواستریپ است. پهنای باند آرایه آنتن بازتابنده در [۱۷ و ۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین [۱۹ و ۲۰] اثر تلفات هادی و دی الکتریک در آرایه بازتابنده میکرواستریپ را بررسی کرده‌اند. تلفات دی الکتریک به تانژانت تلفات دی الکتریک و میدان الکتریکی در بخشی از زیر لایه که زیر پیچ قرار دارد بستگی داشته و تلفات هادی به رسانایی پیچ و جریان روی سطح بالایی آن بستگی دارد.

یکی از خصوصیات جالب آرایه بازتابنده امکان پویا^۲ کردن پترن آن با استفاده از عناصر «قابل پیکربندی مجدد»^۳ آرایه است. تغذیه فضایی عناصر نیاز به یک شبکه تغذیه پر حجم و تلفاتی - که مشخصه آرایه فازی‌های متعارف است - مرتفع می‌سازد. «آرایه بازتابنده تنظیم پذیر»^۴ برای پیکربندی بیم - به علت عدم نیاز عناصر به ماژول‌های فرستنده - گیرنده و انجام تغییر فاز درون عنصر - به لحاظ اقتصادی به صرفه است. لذا در این زمینه

۱ - Frequency Selective Surface

۲ - Dynamic

۳ - Reconfigurable

۴ - Tunable Reflectarray

پژوهش‌های زیادی انجام گرفته است. به عنوان مثال، [۲۱] دو ایده برای ساخت آنتن قابل پیکربندی مجدد داده است. یکی تغییر ابعاد شکاف موجود بر روی صفحه زمین پیچ میکرو استریپ است و دیگری تغییر ابعاد پیچ با وصل کردن آنها به حلقه‌های مربعی هم مرکز است. [۲۲] شامل یک جمع‌بندی از بسیاری از روش‌های طراحی و ساخت آنتن‌های بازتابنده قابل پیکربندی مجدد است. معمولاً در ساخت آنتن‌های تنظیم شونده از دیوهای و رکتور و MEMS^۱ استفاده می‌شود. [۲۳ و ۲۴] با استفاده از دیود و رکتور آنتن‌های آرایه بازتابنده‌ای با قابلیت هدایت بیم طراحی کرده‌اند. [۲۵] یک مدل مداری برای MEMS در یک آنتن بازتابنده - که عنصر آن دو شبه حلقه که با پنج جفت MEMS دو حالتی که نقش خازن‌های سری متغیر را ایفا می‌کنند - ارائه کرده است.

البته بدون استفاده از تغییر فاز دهنده نیز می‌توان بیم را اسکن کرد. [۲۶] با تغییر مکان فیدر در فضا توانسته این کار را انجام بدهد.

آرایه بازتابنده‌ها با شبکه‌های مختلفی از جمله مثلثی، مستطیلی، دایره‌ای و آسیابی شکل طراحی شده‌اند. به عنوان مثال [۲۷] سه آرایه بازتابنده با شبکه‌های مستطیلی، دایره‌ای و آسیابی شکل طراحی کرده و عملکرد تشعشعی آنها را با هم مقایسه کرده است.

۱-۵ ساختار پایان نامه:

در فصل دوم پایان نامه به روش‌های مختلف محاسبه‌ی فاز موج پراکنده شده از عنصر پرداخته شده است. در برخی از این روش‌ها - تحت شرایط خاصی - از اثر تزویج متقابل صرف نظر کرده و عنصر را به صورت مجزا تحلیل و طراحی می‌شود. در برخی دیگر مانند بسط میدان‌ها برحسب مدهای فلوکه^۲ و استفاده از «روش شبیه ساز موجبری»^۳، برای لحاظ کردن این اثر در طراحی عنصر فرض شده است که آرایه‌ی متناوب بی‌نهایتی از عناصر داریم.

در فصل سوم نقش هر یک از اجزاء آرایه بازتابنده در عملکرد آن به نحو تفصیلی بررسی می‌شود. از جمله این بررسی‌ها می‌توان به ارتباط میان تغییرات فاز ضریب بازتابش با تغییرات هندسه‌ی عناصر با شکل‌های مختلف، تأثیر ثابت دی الکتریک، ضخامت و تعداد لایه‌های «زیر لایه»^۴ در گستره‌ی فاز و پهنای باند عنصر، نقش مشخصات فیدر بر روی بازدهی پنجره^۵، روشنایی^۶ و سرریز^۷، استفاده از FSS به عنوان صفحه‌ی زمین سلول آرایه، اشاره به

۱ - Microelectromechanical systems

۲ - Floquet

۳ - Waveguide Simulator Approach

۴ - Substrate

۵ - Aperture Efficiency

۶ - Illumination Efficiency

۷ - Spillover Efficiency

برخی از مدار معادل‌های فشرده برای مدل کردن سلول‌های دارای تغییر فاز دهنده و در نهایت ارتباط میان فاصله عناصر در شبکه آرایه با «گریتینگ لوب»^۱ اشاره کرد.

فصل چهارم اختصاص به بررسی تلفات در سلول آرایه بازتابنده دارد. در ابتدای این فصل با شبیه سازی دو ساختار تلفاتی‌ای که پاسخ آنها معلوم است صحت روش شبیه سازی را تأیید کرده، سپس تلفات در سلول با عنصر پچ ترکیبی را بررسی می‌کنیم.

و در نهایت در فصل پنجم نتیجه‌گیری کرده و پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه می‌دهیم.

فصل دوم

روش‌های تحلیلی و عددی برای یافتن فاز موج پراکنده شده از عناصر آرایه بازتابنده

در این فصل ابتدا تغییر فازی که هر عنصر -برای تولید بیم مدادی- باید ایجاد کند محاسبه شده و سپس روش‌های مختلف تعیین ارتباط میان مشخصات آرایه و تغییر فاز تولیدی، شرح داده می‌شود. این روش‌ها-از نقطه نظر تزویج متقابل میان عناصر- به دو دسته کلی تقسیم می‌شود:

الف) صرف نظر کردن از تزویج متقابل میان عناصر: در این حالت هر عنصر به صورت مجزا تحلیل و طراحی می‌شود.

ب) لحاظ کردن اثر تزویج متقابل میان عناصر: در این حالت اثرات حضور سایر عناصر در کنار عنصر مورد بررسی نیز به طور تقریبی لحاظ می‌شود.

۱-۲ محاسبه‌ی تغییر فاز لازم در هر عنصر:

شکل (۱-۲) را در نظر بگیرید. از نظریه آرایه‌ها می‌دانیم که برای یک آرایه دو بعدی دارای N عنصر که در صفحه $x-y$ قرار دارد فاکتور آرایه به صورت رابطه‌ی (۱-۲) نوشته می‌شود:

$$AF = \sum_{i=0}^{N-1} |I_i| \exp\left(j\left(\alpha_i + k_0 \left[x'_i \sin \theta \cos \phi + y'_i \sin \theta \sin \phi \right]\right)\right) \quad (1-2)$$

که در آن $(x'_i, y'_i, 0)$ محل و $|I_i| e^{j\alpha_i}$ تحریک عنصر i ام آرایه و k_0 عدد موج در فضای آزاد است. لذا رابطه میان جهت بیم اصلی و فاز عناصر به صورت زیر است:

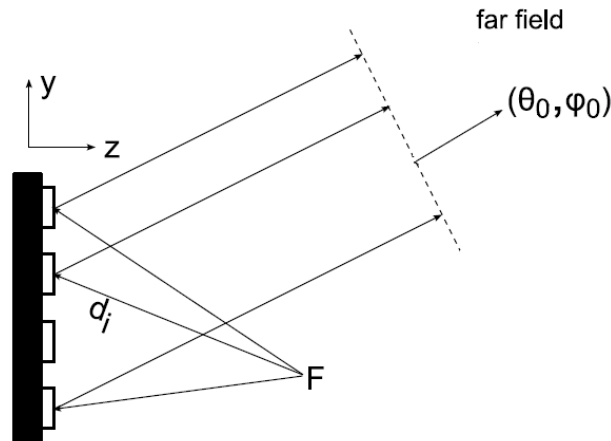
$$\alpha_i = -k_0 \left[x'_i \sin \theta_0 \cos \phi_0 + y'_i \sin \theta_0 \sin \phi_0 \right] \quad (2-2)$$

در حقیقت α_i فازی است که عنصر i ام باید داشته باشد تا بیم اصلی در جهت (θ_0, ϕ_0) باشد.

اگر فاصله عنصر i ام از مرکز فاز آنتن شیپوری را d_i بنامیم و تابعیت زمان را به صورت $e^{j\omega t}$ در نظر بگیریم در این صورت وقتی که موج به این عنصر برسد دچار تأخیر فاز $-k_0 d_i$ می شود لذا عنصر باید در این سیگنال دریافتی تغییر فازی ایجاد کند که در رابطه زیر صدق کند:

$$-k_0 d_i + \psi_i = \alpha_i \quad (3-2)$$

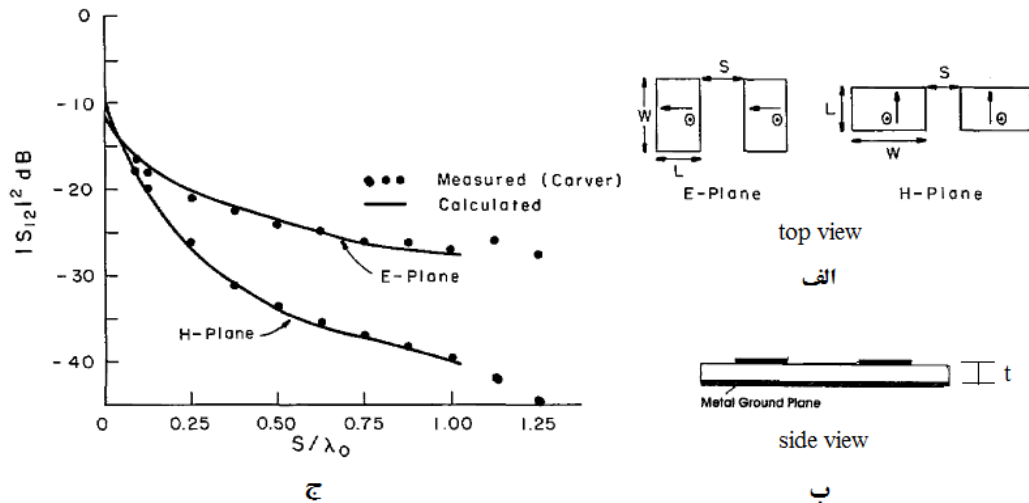
که در آن ψ_i تغییر فازی است که عنصر i ام باید ایجاد کند. بدین ترتیب تغییر فازی که هر عنصر باید تولید کند از دو رابطه اخیر قابل محاسبه خواهد بود.



شکل ۱-۲- نمای کناری یک آرایه بازتابنده که که بیم اصلی آن در جهت (θ_0, ϕ_0) است. [۲]

۲-۲ طراحی آرایه بازتابنده با صرف نظر کردن از تزویج متقابل بین عناصر آن:

در شکل (۲-۲ ج) تزویج متقابل میان دو آنتن میکرواستریپ نمونه نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود با افزایش فاصله میان عناصر تزویج متقابل میان آنها کاهش می یابد تا جایی که این تزویج به قدری ناچیز می شود که می توان هر کدام را به صورت مجزا در نظر گرفته و آن را تحلیل و طراحی کرد.



شکل ۲-۲ تزویج متقابل میان دو آنتن میکرواستریپ ($W = 10.57\text{cm}$, $L = 6.55\text{cm}$, $t = 0.158\text{cm}$, $\epsilon_r = 2.55$) در فرکانس 1410MHz که با کواکسیال تغذیه شده‌اند. الف) نمای بالایی، ب) نمای کناری و ج) تزویج متقابل اندازه گیری و محاسبه شده در هر دو صفحه تزویج E-plane و H-plane میان آنتن‌ها [۲۸].

اثبات شده که تزویج متقابل در آرایه آنتن میکرواستریپی که ضخامت زیر لایه، ثابت دی الکتریک و زاویه اسکن بیم آن خیلی بزرگ نبوده و همچنین فاصله میان لبه‌های پچ‌های همسایه در آن حداقل یک چهارم طول موج در دی الکتریک باشد، ناچیز است. لذا بعضی از نویسندگان تحلیل و طراحی خود را بدون لحاظ کردن تزویج متقابل انجام داده‌اند. اندازه گیری‌های انجام شده نشان می‌دهد که لحاظ نکردن تزویج متقابل در این حالت تحلیل و طراحی را دچار مشکل نمی‌کند. [۲۹ و ۳۰]

در ادامه به روابط موجود برای طراحی آرایه آنتن‌های میکرواستریپی که عناصر آنها پچ‌های یکسان با طول‌های مختلف استاب‌های الحاقی^۱ یا با چرخش‌های زاویه‌ای مختلف استاب‌های الحاقی^۲ است، می‌پردازیم.

۱-۲-۲ پچ‌های یکسان با طول‌های مختلف استاب‌های الحاقی:

برای طراحی آرایه آنتنی با این نوع عنصر از روابط معروف آنتن پچ میکرواستریپ مستطیلی استفاده می‌کنیم. ساختار مورد بررسی در شکل (۲-۳) نمایش داده شده است.

الف) طراحی پچ:

۱- فرکانس رزونانس پچ (f_{res})، ثابت دی الکتریک (ϵ_r) و ضخامت آن h را تعیین می‌کنیم.

۲- ابعاد پچ را محاسبه می‌کنیم:

۱ - Identical Patches with Attached Stubs of Different Lengths

۲ - Identical Patches with Attached Stubs of Different Rotation Angles

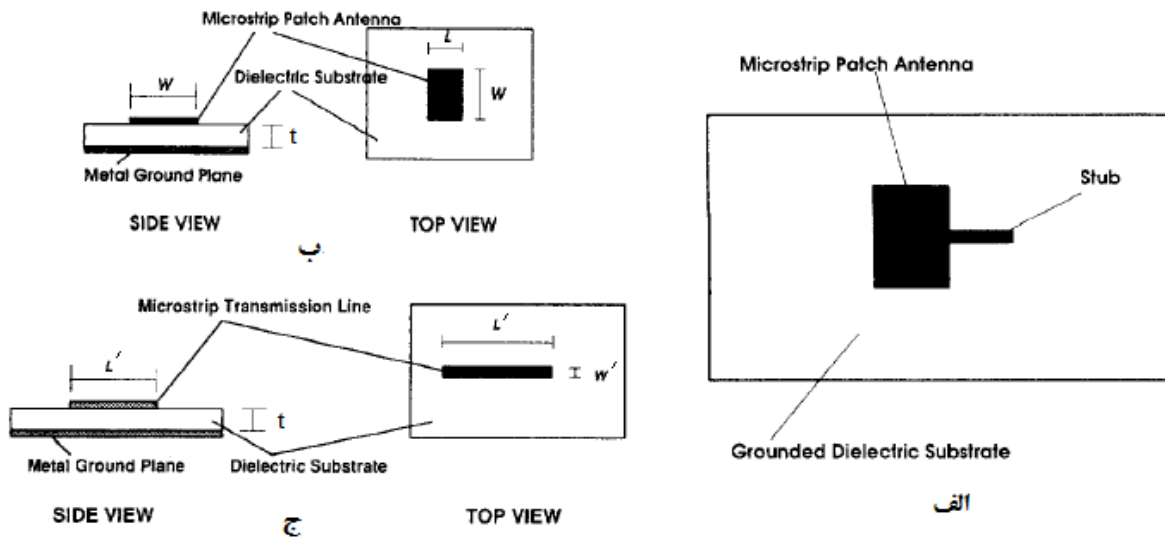
عرض عملی (W) برای داشتن توان تشعشعی خوب برابر است با [۳۱]:

$$W = \frac{c}{2f_{res}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (۴-۲)$$

که در آن c سرعت نور در فضای آزاد است.

رابطه طول رزونانس (L) و فرکانس رزونانس به صورت زیر است:

$$f_{res} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_e}(L + 2\Delta l)} \quad (۵-۲)$$



شکل ۲-۳ هندسه الف) یک عنصر با استاب الحاقی، ب) آنتن پچ میکرواستریپ و ج) استاب (خط تأخیر) الحاقی. [۲۹]

که در آن

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 12t/W)^{-1/2} \quad (۶-۲)$$

و

$$\Delta l = 0.412t \frac{\epsilon_e + 0.3}{\epsilon_e - 0.3} \frac{W/t + 0.264}{W/t + 0.8} \quad (۷-۲)$$

t ضخامت زیر لایه دی الکتریک است.

(ب) طراحی استاب‌ها:

برای این که حداکثر توان دریافتی توسط پیچ به استاب انتقال یابد باید میان پیچ و استاب تطبیق امپدانس وجود داشته باشد. امپدانس مشخصه استاب برابر است با [۲۹]:

$$Z_c = \frac{1}{c\epsilon_e A} \quad (۸-۲)$$

که در آن

$$A = \begin{cases} \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{8t}{W'} + \frac{W'}{4t}\right)} & \frac{W'}{t} \leq 1 \\ \frac{W'}{t} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W'}{t} + 1.444\right) & \frac{W'}{t} > 1 \end{cases} \quad (۹-۲)$$

و امپدانس تشعشی پیچ در فرکانس رزونانس برابر است با:

$$R_{in} = \frac{60\lambda_0}{W} \quad (۱۰-۲)$$

که در آن λ_0 طول موج در فضای آزاد است. بدین ترتیب پهنای استاب W' بدست می‌آید. با جای گذاری این مقدار در روابط (۶-۲) و (۷-۲) مقادیر متناظر برای استاب (ϵ_e' و $\Delta l'$) محاسبه می‌شود.

با فرض این که سر دوم استاب‌ها مدار باز است، طول الکتریکی هر استاب (برحسب رادیان) برابر خواهد شد با:

$$\phi = \frac{4\pi\sqrt{\epsilon_e'}(L' + \Delta l')}{\lambda_0} \quad (۱۱-۲)$$

لذا با تعیین ϕ ، طول استاب را می‌توان تعیین کرد.

[۲۹] با استفاده از همین روابط یک آرایه ۳×۴ طرحی کرده است. هدف طراحان این بوده که بیم اصلی آنتن در جهت $\theta_0 = 20^\circ, \phi_0 = 0^\circ$ باشد. همانگونه که در شکل (۴-۲) مشاهده می‌شود پترن‌های تشعشی اندازه گیری شده با محاسبات تئوری سازگاری دارند. اختلاف‌ها ناشی از محدود بودن صفحه زمین، محدود بودن اندازه آرایه، اثرات منابع و اتصالات و انسداد^۱ فیدر در سیستم اندازه گیری است.