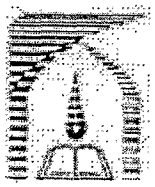
به نام خدا

۱۱۲۹۹۴ـ۲۰۰۱۷۱۷

۱۰۷۶



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی – بخش مهندسی برق

رساله دکتری

مهندسی برق - مخابرات

عنوان:

طراحی و تحلیل یک آنتن موجبر شکاف‌دار زاویه‌ای برای کاربرد در آرایه آنتن‌های دایروی

دانشجو: سیامک عبادی

استاد راهنما: دکتر کیوان فرورقی

بهار ۱۳۸۸

۱۳۸۸/۴/۱

اطلاعات مدارک علمی ایران
ثبت مدارک

۱۱۴۶۶۴

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای سیامک عبادی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان طراحی ،تحلیل وساخت یک موجبر شکاف دار تمام زاویه ای برای کاربرد در آرایه آنتن های دایروی در تاریخ ۱۳۸۸/۳/۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی برق – مخابرات پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر کیوان فرورقی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد حکاک	استاد	
استاد ناظر	دکتر زهرا اطلس باف	استادیار	
استاد ناظر	دکتر رضا فرجی دانا	استاد	
استاد ناظر	دکتر منوچهر کامیاب	دانشیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد حکاک	استاد	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه /رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی: سیامک عبادی

تاریخ و امضاء : ۹ / ۳ / ۱۳۸۸

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) تحصیلی دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت های علمی-پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به « دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهند.

ماده ۲ در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

"کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری آقای **سیامک عبادی** در رشته **مهندسی برق/مخابرات** است که در سال **۱۳۸۸** در دانشکده **فنی و مهندسی** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای **دکتر کیوان فرورقی** از آن دفاع شده است."

ماده ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک در صد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه هدیه کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴ در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابعنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تادیه کند.

ماده ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند که در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند، به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور ایفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجوه مذکور در ماده ۲ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶ اینجانب **سیامک عبادی** دانشجوی رشته **مهندسی برق/ مخابرات** مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سیامک عبادی

تاریخ و امضاء: ۱۳۸۸ / ۳ / ۹

قدردانی از مرکز تحقیقات مخابرات ایران

بدین وسیله اعلام می گردد که این رساله دکتری تحت حمایت مالی و معنوی مرکز تحقیقات مخابرات ایـران در دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. گردآورندگان این اثر مراتب قدردانی خود را از آن مرکز ابراز می دارند.

- **تشکر و قدردانی**

بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از کمک‌های علمی و معنوی اساتید، همکاران و دوستان محترم زیر اعلام می‌دارم:

- ✓ جناب آقای دکتر کیوان فرورقی، به سبب حمایت و راهنمایی‌های علمی و معنوی بی‌دریغ ایشان در مراحل مختلف این تحقیق.
- ✓ آقای دکتر فرجی‌دانا به سبب راهنمایی‌های سازنده در مراحل مختلف تعریف طرح و افزایش بار علمی بخش‌های مختلف تئوری آن
- ✓ آقای دکتر بنایی به سبب راهنمایی‌های ایشان در مراحل مختلف تعریف پروژه
- ✓ همکاران محترم شرکت مهندسی رستافن ارتباط به سبب کمک‌های فراوان در ساخت و اندازه‌گیری.

تقدیم به مادرم

که سال‌های با ارزش عمرش را به من هدیه کرد

و تقدیم به همسرم

که گام به گام همراه و پشتیبان من بوده و هست

چکیده

این رساله به معرفی و تحلیل ساختار تشعشع‌کننده جدیدی برای برطرف کردن برخی کاستی‌های موجود در آنتن‌های آرایه شکاف‌های موجبری صفحه‌ای با مرز دایروی می‌پردازد. در این طرح، موجبرهای شکاف‌دار مستطیلی رایج به عنوان عنصر تشعشع کننده در این نوع آنتن‌ها، با ساختاری با ماهیت دایروی تحت عنوان "موجبر شکاف‌دار زاویه‌ای"[1] جایگزین خواهد شد. در این ساختار، موجبر و شکاف هر دو در راستای زاویه امتداد دارند و تطابق کاملی با هندسه کلی یک آنتن دایروی دارند.

برای دست‌یابی به این هدف ابتدا یک موجبر زاویه‌ای به عنوان یک خط انتقال در راستای زاویه در مختصات استوانه‌ای معرفی می‌شود و عملکرد آن به عنوان یک خط انتقال بررسی می‌شود. سپس توابع گرین داخل این موجبر به دست آمده و معادلات انتگرالی مورد نیاز برای تحلیل یک موجبر شکاف‌دار زاویه‌ای و به دست آوردن توزیع میدان الکتریکی بر روی شکاف ارائه می‌شوند. معادلات انتگرالی فوق توسط روش ممان حل شده و توزیع میدان سینوسی بر روی شکاف به دست می‌آید. با توجه به توزیع میدان به دست آمده، شکاف فوق به مانند شکاف بر روی صفحه پهن موجبر مستطیلی به صورت یک ادمیتانس موازی بر روی خط انتقال زاویه‌ای مدل می‌شود.

پس از به دست آوردن مدل مداری، یک موجبر شکاف‌دار زاویه‌ای در باند X طراحی و شبیه‌سازی می‌شود و یک نمونه از آن نیز ساخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در هر دو حوزه امپدانسی و تشعشعی مطابقت خوبی با پیش‌بینی‌های تئوری داشته و صحت مدل‌مداری را نیز تائید می‌نماید. در پایان نیز یک آرایه چهار عنصری که از شکاف فوق تشکیل شده و قابلیت با ارزش تولید پلاریزاسیون‌های مختلف و تغییر پلاریزاسیون با استفاده از چهار تغییر دهنده فاز را دارد ارائه و بررسی می‌شود. با استفاده از ساختار معرفی شده می‌توان به مزایای مختلفی در این نوع آنتن‌ها دست یافت مانند: ایجاد سهولت در پیاده‌سازی سنتز دایروی و قابلیت استفاده مستقیم از روش‌های سنتز خطی در سنتز دایروی، قابلیت دست‌یابی به پلاریزاسیون دایروی، افزایش بهره به سبب کاهش فضاهای غیرقابل استفاده در سطح آنتن و کاهش خطای گسسته‌سازی[2] در پیاده‌سازی سنتز دایروی به سبب همخوانی بیشتر عنصر تشعشع‌کننده با هندسه آنتن. با توجه به اهمیت فراوان این نوع آنتن‌ها در کاربردهای نظامی و تجاری، موفقیت این طرح و تبدیل شدن آن به یک محصول تجاری حاوی ارزش علمی و اقتصادی قابل توجهی خواهد بود.

کلمات کلیدی: موجبر شکاف‌دار، آنتن‌های دایروی، پلاریزاسیون، روش ممان

---

[1] Annular waveguide slot antenna

[2] Discretizing Error

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه ۱
۱-۱- تعریف مساله و بیان هدف ۲
۱-۲- بررسی کاستی‌های موجود در موجبرهای شکاف‌دار مستطیلی ۴
۱-۳- تحقیقات انجام شده برای بهبود موجبرهای شکاف‌دار مستطیلی ۸
۱-۴- بررسی انگیزه‌های طرح جدید پیشنهادی و مقایسه آن با تحقیقات پیشین ۱۶
۱-۵- معرفی آنتن شکاف‌دار زاویه‌ای ۱۷
۱-۶- ساختار رساله ۱۹
فصل ۲ تحلیل موجبر شکاف‌دار زاویه‌ای ۲۰
۲-۱- مقدمه ۲۱
۲-۲- موجبر زاویه‌ای به عنوان خط انتقال ۲۱
۲-۳- توابع گرین در یک موجبر زاویه‌ای ۲۸
۲-۴- توابع گرین نیم‌فضای آزاد مورد نیاز ۳۱
۲-۵- تحلیل یک موجبر شکاف‌دار زاویه‌ای با روش ممان ۳۴
۲-۶- جمع‌بندی ۳۶
فصل ۳ طراحی، شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن شکاف‌دار زاویه‌ای ۳۷
۳-۱- روابط طراحی ۳۸
۳-۲- شبیه‌سازی ۳۹
۳-۳- ساخت و اندازه‌گیری ۴۳
۳-۴- جمع‌بندی ۴۴
فصل ۴ کاربرد آنتن شکاف‌دار زاویه‌ای: قابلیت تولید پلاریزاسیون دلخواه ۴۵
۴-۱- پلاریزاسیون خطی ۴۸
۴-۲- پلاریزاسیون دایروی ۵۰
۴-۳- مدل کردن توسط Array Factor ۵۳
۴-۴- جمع‌بندی ۵۵
فصل ۵ نتیجه‌گیری، پیشنهادات و فهرست مقالات ۵۶
۵-۱- نتیجه‌گیری ۵۷
۵-۲- پیشنهادات برای ادامه طرح ۵۷
۵-۳- فهرست مقالات و انتشارات ۵۹
ضمیمه ۱: مروری بر تئوری شکاف‌های تشعشعی با تغذیه موجبری مستطیلی ۶۰
ضمیمه ۲: فرم دقیق توابع گرین برای یک موجبر زاویه‌ای ۷۲
مراجع ۸۳
واژه‌نامه ۸۵

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) یک نمونه آنتن شکاف‌دار موجبری رایج ۲

شکل (۱-۲) نمای کلی AWSA پیشنهادی ۳

شکل (۱-۳) نمای آرایه صفحه‌ای تشکیل شده از AWSA پیش‌نهادی در این طرح ۴

شکل (۱-۴) نمایی از آنتن‌های موجبری شکاف‌دار رایج با مرز دایروی ۵

شکل (۱-۵) یک ربع از یک آنتن موجبری شکاف‌دار رایج ۶

شکل (۱-۶) نمای یک RLSA با قابلیت عملکرد مونوپالس [2] ۹

شکل (۱-۷) نمای یک RLSA با قابلیت عملکرد مونوپالس و تولید پلاریزاسیون‌های مختلف [3] ۹

شکل (۱-۸) چگونگی تولید مولفه‌های مختلف میدان الکتریکی مورد نیاز برای پلاریزاسیون‌های مختلف [4] ۱۰

شکل (۱-۹) یک نمونه RLSA با قابلیت انتشار موج TEM [4] ۱۰

شکل (۱-۱۰) یک نمونه RLSA با استفاده بهینه‌از فضای وسط آنتن [5] ۱۰

شکل (۱-۱۱) نماهای مختلف از RLSA [8] ۱۱

شکل (۱-۱۲) یک نوع آنتن RLSA با پلاریزاسیون خطی و عملکرد مونوپالس [8] ۱۱

شکل (۱-۱۳) نمای دیگری از یک RLSA با پلاریزاسیون خطی [6] ۱۲

شکل (۱-۱۴) نمای داخلی یکRLSA با عملکرد مونوپالس [6] ۱۲

شکل (۱-۱۵) نمای یک RLSA نصب شده بر سر سیکر [8] ۱۲

شکل (۱-۱۶) نمایی از یک RLSA با پلاریزاسیون دایروی [7] ۱۳

شکل (۱-۱۷) یک نوع RLSA [7] ۱۳

شکل (۱-۱۸) نمای گسترده RLSA با قابلیت انتشار موج TEM [7] ۱۳

شکل (۱-۱۹) یک نوع آنتن موجبری نصب شده بر روی بدنه هواپیما به همراه مدل مداری [10] ۱۴

شکل (۱-۲۰) نمای دیگری از یک آنتن موجبری قابل نصب بر روی بدنه هواپیما [10] ۱۴

شکل (۱-۲۱) نمای یک آنتن RLSA با شکاف‌های حلقه‌ای [11] ۱۵

شکل (۱-۲۲(یک نمونه از آنتن‌های RLSA طراحی شده توسط گروه Ando [13] ۱۵

شکل (۱-۲۳) نماهای مختلف از طرح پیشنهادی (AWSA) ۱۷

شکل (۱-۲۴) چگونگی کاربرد طرح پیشنهادی در بهینه‌سازی آنتن‌های موجبری شکاف‌دار رایج ۱۸

شکل (۱-۲۵) نمای بالای طرح AWSA پیشنهادی به همراه جزئیات مورد نیاز برای طراحی ۱۸

شکل (۲-۱) نمایش یک موجبر مستطیلی و مقایسه آن با یک موجبر زاویه‌ای ۲۱

شکل (۲-۲) حل معادله مشخصه در مد TM_z و به ازا n=0 در یک موجبر زاویه‌ای ۲۳

شکل (۲-۳) محدوده فرکانسی که موجبر زاویه‌ای به صورت تک مد به انتقال موج می‌پردازد (*b-a=0.9in=22.86mm*) ۲۳

شکل (۲-۴) مقایسه میدان‌های الکتریکی در حالت آرگومان بزرگ، خطوط پیوسته مقادیر واقعی و نقطه‌چین مقادیر تقریبی ۲۵

شکل (۲-۵) مقایسه تئوری با توزیع سینوسی، خطوط پیوسته مقادیر واقعی و نقطه‌چین مقادیر تقریبی را نشان می‌دهند..... ۲۶
شکل (۲-۶) اثر شعاع داخلی موجبر بر روی توزیع سینوسی..... ۲۶
شکل (۲-۷) چگونگی تشکیل تابع گرین فضای آزاد..... ۳۱
شکل (۲-۸) مولفه‌های مختلف میدان الکتریکی بر روی یک شکاف..... ۳۴
شکل (۲-۹) مولفه‌های مختلف میدان الکتریکی به صورت نرمالیزه شده بر روی یک شکاف..... ۳۵
شکل (۲-۱۰) مقایسه توزیع میدان روی شکاف بین شبیه‌سازی و تئوری..... ۳۶
شکل (۲-۱۱) مقایسه طول رزنانس به دست آمده در شبیه‌سازی و تئوری..... ۳۶
شکل (۳-۱) ساختار شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار HFSS..... ۴۰
شکل (۳-۲) ادمیتانس شبیه‌سازی شده شکاف..... ۴۱
شکل (۳-۳) ضرایب انعکاس شکاف..... ۴۲
شکل (۳-۴) نحوه تغییرات توان تشعشعی بر حسب فرکانس..... ۴۲
شکل (۳-۵) فرایند ساخت و نمای نهایی آنتن پیاده سازی شده..... ۴۳
شکل (۳-۶) اندازه‌گیری مولفه انعکاسی ورودی و مقایسه با شبیه‌سازی و تئوری..... ۴۳
شکل (۳-۷) پرتوهای تشعشعی اندازه‌گیری شده و مقایسه با شبیه‌سازی..... ۴۴
شکل (۴-۱) بخشی از ساختار آرایه صفحه‌ای به صورت ترکیبی از عناصر AWSA پیش‌نهادی..... ۴۶
شکل (۴-۲) نمای یک آرایه ۴ عنصری AWPL به همره چگونگی تغییرات میدان الکتریکی بر روی شکاف‌ها برای پلاریزاسیون خطی ۴۸
شکل (۴-۳) نمای آرایه ۴ عنصری شبیه‌سازی شده..... ۴۸
شکل (۴-۴) مولفه‌های میدان تشعشعی یک AWSA با یک شکاف..... ۴۹
شکل (۴-۵) تشکیل پلاریزاسیون خطی افقی..... ۴۹
شکل (۴-۶) تشکیل پلاریزاسیون خطی عمودی..... ۵۰
شکل (۴-۷) چگونگی تغییرات Axial Ratio برای پلاریزاسیون دایروی چپگرد..... ۵۱
شکل (۴-۸) چگونگی تغییرات polarization ratio برای پلاریزاسیون خطی چپگرد..... ۵۱
شکل (۴-۹) چگونگی تغییرات Axial Ratio برای پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد..... ۵۲
شکل (۴-۱۰) چگونگی تغییرات polarization Ratio برای پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد..... ۵۲
شکل (۴-۱۱) آرایه ۴ عنصری معادل در صفحه x-y..... ۵۳
شکل (۴-۱۲) آرایه آنتن‌های دو عنصری معادل..... ۵۴
شکل (۴-۱۳) مقایسه پرتو تشعشعی شبیه‌سازی و تئوری..... ۵۵
شکل (۶-۱) ساختار یک موجبر مستطیلی به همراه مختصات تعریف شده [1]..... ۶۰
شکل (۶-۲) توزیع میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و توزیع جریان بر روی یک موجبر مستطیلی با مد TE_{10} [1]..... ۶۱
شکل (۶-۳) نمای برخی شکاف‌های رایج بر روی دیواره‌های موجبر [1]..... ۶۲
شکل (۶-۴) یک شکاف با انحراف مکان از وسط بر روی دیواره پهن یک موجبر مستطیلی [1]..... ۶۶

شکل (۶-۵) یک عنصر موازی بر روی یک خط انتقال دو سیمه [1] ۶۷
شکل (۶-۶) چگونگی تغییرات طول رزنانس بر حسب انحراف از مرکز موجبر [1] ۷۰
شکل (۶-۷) چگونگی تغییرات G_r/G_0 بر حسب میزان انحراف از مرکز در حالت رزنانس [1] ۷۰
شکل (۶-۸) پرتو نرمالیزه میدان الکتریکی برای دی‌پل تغذیه شده از وسط نصف طول موج [1] ۷۱
شکل (۷-۱) نماهای مختلف یک موجبر زاویه‌ای ۷۳
شکل (۷-۲) جزئیات دیواره‌های تشکیل دهنده یک موجبر زاویه ای و بردارهای متناظر ۷۸

فهرست جداول

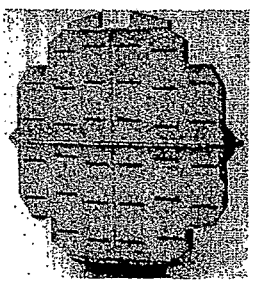
جدول (۱-۱) پارامترهای مورد نیاز برای طراحی AWSA با شکاف زاویه‌ای ۱۸
جدول (۲-۱) پارامترهای استفاده شده در موجبر زاویه‌ای ۲۲
جدول (۳-۱) پارامترهای شبیه‌سازی در HFSS ۴۰
جدول (۳-۲) پارامترهای استفاده شده در ساخت آنتن ۴۳
جدول (۳-۳) بهره تشعشعی شبیه‌سازی شده ۴۴
جدول (۴-۱) چگونگی تولید پلاریزاسیون‌های مختلف با استفاده از ضرایب شبکه تحریک ۴۷
جدول (۵-۱) تقسیم‌بندی انتشارات منتج از رساله دکتری ۵۹
جدول (۵-۲) لیست مقالات و انتشارات ۵۹

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- تعریف مساله و بیان هدف

آنتن‌های آرایه شکاف‌های موجبری با ساختار صفحه‌ای و با مرز دایروی بیش از نیم قرن سابقه حضور در کاربردهای مختلف نظامی و غیر نظامی دارند. مهم‌ترین کاربردهای چنین آنتن‌هایی در رادارهای جستجو و ردگیری زمینی، هواپیماهای جنگی و مسافربری، جستجوگرهای موشکی و ماهواره‌های فضایی است. ضمیمه ۱ مروری بر تئوری این نوع آنتن‌ها را ارائه می‌کند.



شکل (۱-۱) یک نمونه آنتن شکاف‌دار موجبری رایج

قدمت این نوع آنتن‌ها از یک رو باعث پیشرفت و تکامل بسیاری در پایه‌های تئوری این نوع ساختارهای تشعشع کننده شده است و مقالات و کتب متعددی در این زمینه منتشر شده است. از سوی دیگر، برخی *فرضیات و محدودیت‌ها* نیز به سبب پایبند بودن به آن اصول اولیه همچنان حفظ شده‌اند. استفاده از موجبرهای مستطیلی به همراه شکاف‌های مستطیلی از مهم ترین این موارد می‌باشند.

پایبندی به ترکیب عناصر با ساختار مستطیلی در پیاده‌سازی آنتن‌های صفحه‌ای با مرز دایروی، سبب شده است که دست‌یابی به برخی پارامترهای مطلوب از چنین آنتن‌هایی به راحتی انجام‌پذیر نباشند. به طور کلی می‌توان بیان کرد که نظر به ساختار دایروی در چنین آنتن‌هایی، استفاده از عناصر مستطیلی یک عدم هماهنگی ذاتی به همراه خواهد داشت. به عنوان برخی از کاستی‌های موجود می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

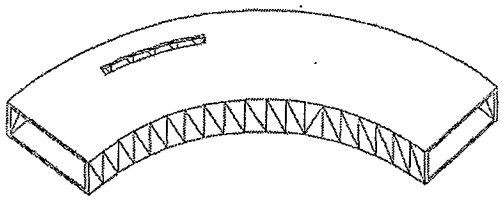
- عدم استفاده بهینه از فضای موجود در مرز دایروی با استفاده از موجبرهای مستطیلی. در این‌گونه ساختارها همواره بخشی از فضای مفید موجود در لبه‌ها و در نزدیک مرز بدون استفاده خواهد ماند.
- سنتز بهینه توزیع جریان برای آنتن‌های صفحه‌ای با مرز دایروی، سنتز دایروی است(مانند سنتز تیلور). دلیل این امر دست‌یابی به پرتو تشعشعی متقارن و همچنین بهره بیشتر است. اما پیاده‌سازی این سنتز بر روی ساختار مستطیلی نیاز به تقریب و گسسته کردن توزیع جریان به دست آمده در تئوری است.
- در بحث سنتز می‌توان به این نکته نیز اشاره نمود که استفاده از سنتز خطی بر روی آنتن‌های آرایه‌ای صفحه‌ای منجر به کاهش بهره خواهد شد. در واقع عدم وجود این قابلیت خود به عنوان یکی از محدودیت‌های این نوع آنتن‌ها

معرفی می‌گردد. هرچند که سنتزهای مخصوص آنتن‌های صفحه‌ای دایروی نیز وجود دارند، امـا ایـن سـنتزها دارای پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به سنتز خطی دارند.

- استفاده از شکاف‌های مستطیلی، منجر به پلاریزاسیون خطی می‌شود. در صورتی که بـه دسـت آوردن پلاریزاسـیون دایروی از نیازهای ضروری طراحان سیستم‌های نوین است.
- عدم هم‌خوانی عناصر استفاده شده در آنتن (موجبر و شکاف‌های مستطیلی) با هندسه کلی آنتن (آنتن صفحه‌ای بـا مرز دایروی)، منجر به بروز خطاهای جبران ناپذیری در پیاده‌سازی توزیع جریان دلخواه بر روی آرایه می‌شود.

نظر به بررسی‌های انجام شده، این مجموعه به معرفی طرحی نو به هدف رفع برخی نواقص فوق می‌پردازد. در ایـن طـرح یک ساختار با ماهیت انتشار موج در راستای φ (که در واقع زاویه استاندارد در مختصـات اسـتوانه‌ای اسـت) مـی‌پـردازد. بـه ساختارهایی که موج را در راستای فوق انتشار می‌دهند *زاویه‌ای*[1] گفته می‌شود. در این ساختار، موجبر و شکاف روی آن هـر دو در راستای زاویه امتداد یافته‌اند و به این سبب این ساختار را *تمام‌زاویه‌ای* می‌نامیم. همچنین با مقایسه این ساختار بـا سـاختار آنتن‌های RLSA[2] که در آن‌ها انتشار موج در راستای شعاع بوده است، نام AWSA[3] را برای این نوع آنتن‌ها انتخاب نموده‌ایم.

شکل (۱-۲) نمایی از این ساختار را نشان می‌دهد. مهم‌ترین ویژگی چنین ساختاری که انگیزه اصـلی روی‌آوردن بـه آن در این تحقیق است، تطابق زیاد آن با هندسه مورد نیاز در آنتن‌های صفحه‌ای با مرز دایروی است.



شکل (۱-۲) نمای کلی AWSA پیشنهادی

در واقع اکثر کاستی‌های مطرح شده در بخش قبل برای ساختارهای رایج در آنتن‌های شکافـدار صفحه‌ای با مرز دایـروی (که از عناصر مستطیلی استفاده می‌کنند)، ناشی از عدم تطابق هندسه کل آنتن بـا عناصـر تشـکیل دهنـده آن اسـت. در ایـن مجموعه با معرفی چنین ساختاری سعی خواهد شد که به تطابق بیشتری بین هندسه آنتن و عناصر آن دست پیدا کنیم. پـس از موفقیت در اثبات کارایی ساختار پیشنهادی، می‌توان به قابلیـت‌هـای زیـر در آنـتن‌هـای آرایـه‌ای صـفحه‌ای بـا موجبرهـای شکافـدار و با مرز دایروی دست یافت:

---

[1] Annular

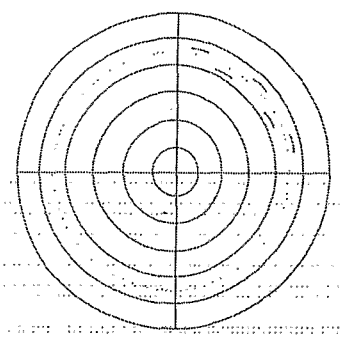
[2] Radial Line Slot Antenna

[3] Annular Waveguide Slot Antenna

- ایجاد سهولت در پیاده‌سازی سنتز دایروی و قابلیت استفاده از روش‌های سنتز خطی در سنتز دایروی
- قابلیت دست‌یابی به پلاریزاسیون دایروی
- افزایش بهره به سبب کاهش فضاهای غیرقابل استفاده در سطح آنتن
- کاهش خطای گسسته‌سازی[1] در پیاده‌سازی سنتز دایروی به سبب همخوانی عنصر تشعشع‌کننده با هندسه آنتن

شکل (۱-۳) نمای آرایه صفحه‌ای تشکیل شده از AWSA پیش‌نهادی را نشان می‌دهد. در واقع در صورت موفقیت این طرح، می‌توان از آن به سبب تشکیل چنین آرایه‌ای استفاده نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این آرایه، هم‌خوانی مورد نظر کاملا دیده می‌شود. همچنین استفاده بهینه از تمامی سطح دایروی موجود نیز قابل رویت است.

هدف اصلی این رساله، ارائه پایه‌های تئوری مورد نیاز برای طراحی و تحلیل یک موجبر زاویه‌ای با یک شکاف زاویه‌ای بر روی آن است. به دست‌آوردن مدل مداری مناسب برای این شکاف، و همچنین به دست آوردن پارامترهای مختلف امپدانسی و تشعشعی ساختار از اهداف این پروژه است. در واقع در این پروژه شرایط را برای پیاده‌سازی یک آنتن آرایه‌ای با تمام ویژگی‌های ذکر شده مهیا خواهیم نمود. به هدف احراز اطمینان از عملکرد صحیح ساختار و همچنین اثبات کارایی آن، یک نمونه آزمایشگاهی از این موجبر شکاف‌دار نیز پس از طراحی و تحلیل ساخته شده است.



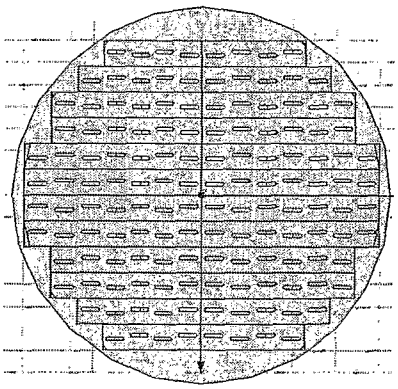
شکل (۱-۳) نمای آرایه صفحه‌ای تشکیل شده از AWSA پیش‌نهادی در این طرح

۱-۲- بررسی کاستی‌های موجود در موجبرهای شکاف‌دار مستطیلی

از آن‌جا که سطح مقطع اختصاص داده شده به آنتن در اکثر کاربردها یک دایره است، از طراحان آنتن انتظار می‌رود که ساختاری دایروی شکل برای آنتن ارائه نمایند. با توجه به گسترش فراوان موجبرهای مستطیلی و تسلط ایجاد شده بر تئوری حکم‌فرما بر آن‌ها، استفاده از موجبرهای مستطیلی در طراحی آنتن‌های با مرز دایروی بسیار رایج شده است. این عدم

[1] Discretizing Error

هماهنگی بین هندسه کل ساختار و عنصر تشعشع‌کننده، منجر به بروز برخی مشکلات در طراحی چنین آنتن‌هایی می‌شود. شکل (۱-۴) نمایی از یک آنتن شکاف‌دار موجبری را به همراه مرز دایروی اختصاص داده شده به آن نشان می‌دهد.



شکل (۱-۴) نمایی از آنتن‌های موجبری شکاف‌دار رایج با مرز دایروی

لازم به ذکر است که در طی سالیان مدید استفاده از این نوع آنتن‌ها، علی‌رغم وجود مشکلات فوق، این ساختارها همواره از موفق‌ترین آنتن‌های مورد استفاده بوده‌اند. اما مسلما دست‌یابی به بهبودهای بیشتر، می‌توان کمک زیادی به افزایش هرچه بیشتر این ساختارها بنماید. در ادامه به ارائه توضیحاتی در مورد برخی از این کاستی‌ها می‌پردازیم. استفاده از عنصر تشعشعی پیشنهادی در این طرح تحقیق می‌تواند تا حدی به رفع برخی از این نواقص کمک نماید.

به سبب هماهنگی ارائه مطالب، کاستی‌های موجود در این نوع آنتن‌ها را به ۳ دسته کلی تقسیم نموده و هر کدام را بررسی می‌نماییم.

۱. عدم استفاده بهینه از فضای موجود

۲. تولید پلاریزاسیون خطی

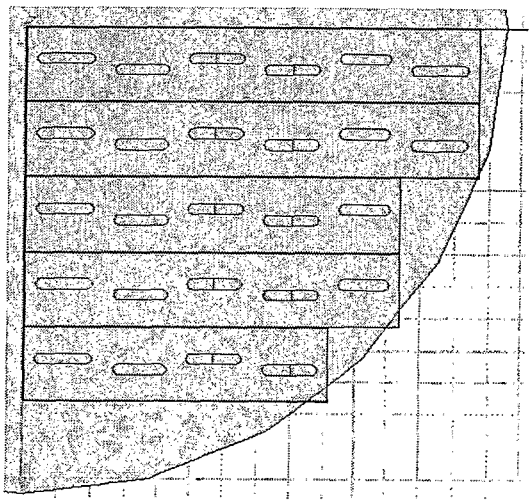
۳. خطای گسسته سازی در اعمال توزیع جریان هنگام سنتز آرایه

در ادامه به ارائه جزئیات مختصری از هر کدام از موارد فوق می‌پردازیم.

۱-۲-۱- عدم استفاده بهینه از فضای موجود

با توجه به فضای اختصاص داده شده به آنتن که یک سطح مقطع دایروی است، کنارهم گذاشتن تعدادی موجبر شکاف‌دار به نحوی که بتوانند کل سطح مورد نظر را اشغال کنند ممکن نیست. بنابراین همواره مقداری از فضای اختصاص داده شده به طرح غیرقابل استفاده خواهد ماند. این مشکل در فرکانس‌های پایین‌تر و با افزایش ابعاد موجبر افزایش می‌یابد و در فرکانس‌های بالاتری از اهمیت کمتری برخوردار است. اما آن‌چه مسلم است این نکته است که در صورت وجود راه‌کاری برای

استفاده کامل و بهینه از ابعاد موجود، عملکرد چنین آنتن‌هایی بهبود خواهد یافت. شکل (۱-۵) یک ربع از یک نمونه آنتن موجبری شکاف‌دار رایج را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۵) یک ربع از یک آنتن موجبری شکاف‌دار رایج

همان‌طور که در شکل واضح است، بخشی از فضای اختصاص داده شده به آنتن بدون استفاده مانده است. مهم‌ترین نتیجه این عدم استفاده بهینه از فضا، کاهش بهره آنتن نسبت به بهره بیشینه قابل حصول از کل سطح مقطع دایروی است. طبق محاسبات بهره آنتن فوق بیش از 6dB کمتر از بیشینه بهره قابل حصول از دایره محیطی آن است.

از انگیزه‌های اصلی طرح ساختار پیشنهاد شده در این تحقیق، تلاش برای رفع این مشکل است. با بررسی شکل (۱-۲) می‌توان امید داشت که در صورت اثبات کارایی این نوع عنصر تشعشع کننده (که هدف اصلی این تحقیق است) می‌توان به آرایه‌ای دست‌یافت که استفاده بهینه‌تری از فضا نموده باشد و به طور کل دارای هم‌خوانی کاملی با هندسه کل ساختار باشد.

۱-۲-۲- پلاریزاسیون خطی

می‌دانیم که در آنتن‌های موجبری شکاف‌دار رایج، شکاف‌ها خطی می‌باشند و میدان الکتریکی بر روی شکاف (که در واقع میدان بر روی روزنه تشعشع کننده به حساب می‌آید) همواره عمود بر شکاف است. از این پلاریزاسیون میدان تشعشعی حاصل نیز همواره خطی و در راستای میدان روی روزنه (شکاف) خواهد بود.

هر چند پلاریزاسیون خطی مزایای زیادی در سیستم‌های راداری دارد (که مهم‌ترین آن افزایش سطح‌مقطع راداری اهداف است) اما در بسیاری از شرایط نیز دست‌یابی به پلاریزاسیون دایروی حائز اهمیت خواهد بود. به طور مثال در مواقعی که محیط انتشار خاصیت چرخش پلاریزاسیون از خود نشان دهد (مانند قطرات باران) استفاده از پلاریزاسیون دایروی کمک زیادی به افزایش کارایی سیستم خواهد نمود.

راه‌کارهای مختلفی برای به دست آوردن پلاریزاسیون دایروی توسط شکاف‌های رایج ارائه شده است که تقریبا در تمام آن‌ها استفاده از ترکیبی از دو شکاف مستطیلی راه‌کار اصلی بوده است. شکاف ارائه شده در این پروژه دارای میدان الکتریکی خطی در جهت r بر روی شکاف است. بدین ترتیب ما همواره دو مولفه خطی متعامد از میدان الکتریکی خواهیم داشت که در شبیه‌سازی‌ها نشان داده خواهد شد. بنابراین با ترکیب مناسب تعدادی از این موجبرهای ALSA و اعمال فازهای مناسب (به طور مثال کنار هم قرار دادن ۴ عدد از این عناصر که تشکیل یک حلقه با ضخامت a خواهد داد) نشان خواهیم داد که می‌توان به پلاریزاسیون دایروی دست یافت.

۱-۲-۳- خطای گسسته‌سازی در هنگام اعمال توزیع جریان

از مهم‌ترین مباحث در پیاده‌سازی آنتن‌های شکاف‌دار موجبری صفحه‌ای با مرز دایروی، به دست آوردن و پیاده‌سازی توزیع جریان مناسب است. از دیدگاه تئوری، روش‌های مختلفی برای سنتز یک پرتو خاص با ویژگی‌های مختلف وجود دارد. در اینجا به این مقوله وارد نمی‌شویم و فرض می‌کنیم یک روزنه پیوسته به صورت یک دایره داریم و توزیع جریان مورد نیاز بر روی آن را به دست آورده‌ایم.

آنتن‌های شکاف‌دار موجبری از بهترین انواع آنتن‌هایی هستند که قابلیت پیاده‌سازی توزیع جریان‌های مختلف را دارند. از آن‌جا که در این‌جا با یک آرایه مواجه هستیم، و شکاف‌های مختلفی در دست داریم، با طراحی مناسب ساختار می‌توانیم به اعمال توزیع جریان بر روی روزنه موجود بپردازیم. در صورتی که در خیلی از ساختارهای دیگر تشعشعی، پیاده‌سازی هر توزیع جریانی به راحتی ممکن نخواهد بود.

اما مشکلی که در این بین رخ می‌دهد، تبدیل یک توزیع جریان پیوسته به یک توزیع گسسته برای اعمال بر روی شکاف‌ها (که ماهیت گسسته دارند) است. این امر تولید خطایی می‌نماید که به خطای گسسته‌سازی مشهور است. وجود این خطا در این نوع آنتن‌ها (و در هر فرایند گسسته‌سازی) اجتناب‌ناپذیر است و در هر حالتی وجود خواهد داشت.

اما نکته‌ای که در این بخش حائز اهمیت است، تشدید میزان این خطا به سبب استفاده از عناصر تشعشع‌کننده مستطیلی در پیاده‌سازی توزیع‌جریان دایروی است. این مشکل را می‌توان به این نحو بررسی کرد که در حالت ایده‌ال وقتی به پیاده‌سازی یک توزیع جریان دایروی در یک شعاع ثابت می‌پردازیم، انتظار این است که در نقاطی به جز شکاف‌ها مقدار جریان برابر با متوسط جریان بین دو شکاف مجاور در یک شعاع ثابت باشد. به بیان دیگر انتظار این است که روند تغییرات جریان دایروی، که خروجی فرایند سنتز است، به طور پیوسته و در راستاهای R و φ در مختصات استوانه‌ای باشد. اما در موجبرهای مستطیلی رایج، این تغییرات به هر حال در امتداد موجبر خواهد بود. نتیجه این عدم هماهنگی این خواهد بود که تقارن دایروی مورد نیاز در اعمال توزیع جریان، به سبب ساختار مستطیلی عناصر تشعشع‌کننده تا حدی مختل خواهد شد.