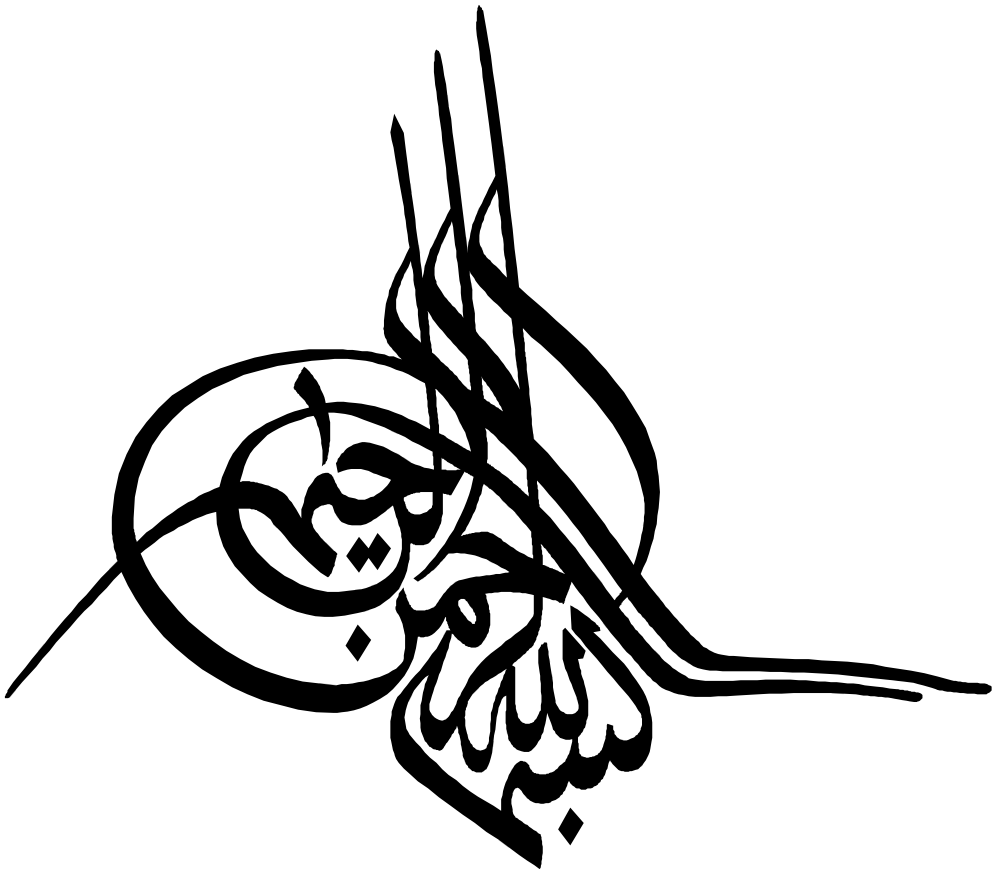


دانشگاه صنعتی «نوشیروانی» بابل

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی برق- مخابرات

موضوع:

طراحی آنتن های موجبری منطبق بر مدارات مجتمع

استاد راهنما:

دکتر بیژن ذاکری

استاد مشاور:

دکتر عطاءالله ابراهیم‌زاده

نام دانشجو:

رضا ابراهیمی

بهمن ۱۳۹۲

چکیده

در این پایان نامه آنتن های موجبری شکافدار منطبق بر مدارات مجتمع (SIW Antenna) و همچنین کاربرد اصلی آن به عنوان یک آنتن آرایه ای را مورد بررسی قرار گرفت. آنتن موجبری شکافدار استاندارد بر اساس روش جدید (Classic-Optimized) طراحی می گردد. این روش نه تنها اثرات تزویج از شکاف های همسایه را مورد بررسی قرار می دهد بلکه مودهای مرتبه بالاتری که از برخورد موج ورودی به شکاف ها حاصل می شود را نیز در نظر می گیرد. همچنین پیش تر دو روش طراحی با الگوریتم کلاسیک الیوت و روش طراحی با الگوریتم بهینه سازی معرفی گردید. روش طراحی (Classic-Optimized) دارای پهنای باند بالاتر و سطح گلبرگ فرعی پایین تر می باشد. موجبرهای استاندارد قابلیت تبدیل به آنتن SIW را دارند؛ بدین نحو که بتوان به جای دیواره عمودی موجبر از چاله های رسانا (Metallic via hole) استفاده شود. اندازه و مکان حفره های رسانا به گونه ای محاسبه می شوند که میدان های الکترومغناطیسی داخل موجبر کمترین تلفات نشتی را داشته باشد و ثابت انتشار و امپدانس مشخصه آنتن SIW و آنتن موجبری معادل آن کاملا یکسان باشد. توانایی شبیه سازی آنتن موجبری با برد مدار چاپی (PCB) این امکان را می دهد. پیاده سازی موجبر بر روی برد این امکان را به ما می دهد که بتوانیم دیگر مدارهای مسطح را به همراه آنتن بر روی یک زیرلایه قرار دهیم که این خود نیاز به طراحی مدار تطبیق پیچیده را برطرف می کند. آنتن SIW مورد بررسی در باند X و فرکانس مرکزی ۱۰ گیگا هرتز کار می کند و با خط مایکروستریپ ۵۰ اهمی تغذیه می شود و با یک حالت گذار به بدنه اصلی آنتن وصل می شود. آنتن مورد نظر دارای ۱۰ شکاف می باشد و دارای سطح گلبرگ فرعی بسیار پایین است. همچنین پهنای باند آن ۱,۵ گیگا هرتز می باشد.

واژه‌های کلیدی:

آنتن موجبری، شکاف، چاله های رسانا، پترن تشعشعی، آنتن های SIW، موج ساکن، موج متحرک

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : آنتن‌های موجبری شکافدار

۱-۱ آنتن ها و پارامترهای بنیادی ۱۰

۱-۲ آنتن های موجبری مستطیلی شکافدار منطبق بر مدارات مجتمع ۲۵

۱-۲-۱ شکاف ها ۲۶

۱-۲-۲ انواع شکاف ها و ویژگی های معادل مداری در آنتن های SIW ۲۷

۱ -۳ تاریخچه ۲۸

۱-۳-۱ طراحی آنتن آرایه ای با شکاف های طولی روی دیواره افقی موجبر مستطیلی ۲۹

۱-۳-۲ چاله های رسانا در آنتن های SIW ۳۰

۱-۴ چالشها و انگیزه ها ۳۴

۱-۵ اهداف و مسئله ها ۳۵

۱-۶ سازمان پایان نامه ۳۶

فصل دوم: تحلیل و طراحی آنتن های موجبری شکافدار منطبق بر مدارات مجتمع

۲-۱ نگاهی به طراحی ۳۸

۲-۲ شکاف های تغذیه شده با موجبر ۳۸

۲-۳ معادلات طراحی آنتن های SIW ۴۱

۲-۳-۱ دو معادله بنیادی آنتن های SIW ۴۱

۲-۳-۲ معادله خطای تطبیق ورودی ۴۷

۲-۳-۳ معادله خطای پترن تشعشعی ۴۸

۲-۳-۴ معادله خطای توان تلف شده در بار تطبیق یافته ۴۹

۲-۳-۵ معادله خطا برای دو معادله اساسی آنتن های SIW ۴۹

۲-۴ روش طراحی آنتن های موجبری موج متحرک با روش Optimized-Classic ۴۹

۲-۴-۱ الگوریتم روش Optimized-Classic برای طراحی شکاف های آنتن SIW ۵۱

۲-۵ تبدیل آنتن های موجبری به آنتن های SIW ۵۲

فصل سوم: نتایج شبیه سازی

۳-۱ مقدمه ۵۹

۳-۲ توصیف شکاف طولی مجزا بر روی دیواره پهن موجبر ۵۹

۳-۳ تبدیل آنتن موجبری به آنتن SIW ۶۲

۳-۴ آنتن SIW طراحی شده با روش Optimized-Classic ۶۳

۳-۴-۱ پارامتر S_{11} و S_{21} آنتن ارائه شده ۶۵

۳-۴-۲ جاروب فرکانسی آنتن ارائه شده ۶۶
۳-۵ مقایسه روش Optimized-Classic با روش بهینه سازی ۶۸
۳-۵-۱ مقایسه پهنای باند فرکانسی ۶۹
۳-۵-۲ مقایسه پترن تشعشعی ۷۰
۳-۶ مقایسه روش Optimized-Classic با روش کلاسیک آر.اس.الیوت. ۷۱
۳-۶-۱ مقایسه پهنای باند فرکانسی ۷۱
۳-۶-۲ مقایسه پترن تشعشعی ۷۳
۳-۷ نتیجه گیری و پیشنهاد برای کارهای آینده ۷۴
۳-۷-۱ نتیجه‌گیری ۷۴
۳-۷-۲ پیشنهاد برای کارهای آینده ۷۴
منابع ۷۶

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: آنتن به عنوان یک وسیله خط انتقال ۱۰
شکل ۱-۲: معادل تونن خط انتقال آنتن در حالت فرستندگی ۱۱
شکل ۱-۳: دستگاه مختصات برای تحلیل آنتن ۱۴
شکل ۱-۴: پترن برای یک آنتن شیپوری هرمی ۱۵
شکل ۱-۵: پترن آنتن همه جهتی ۱۵
شکل ۱-۶: چرخش یک موج الکترومغناطیسی صفحه ای و پلاریزاسیون بیضوی آن در z=0 ..... ۲۱
شکل ۱-۷: آنتن و مدار معادل آن..... ۲۵
شکل ۱-۸: آنتن موجبری منطبق بر مدارات مجتمع..... ۲۵
شکل ۱-۹: شکاف مستطیلی ۲۶
شکل ۱-۱۰: شکاف طولی و مدار معادل آن ۲۷
شکل ۱-۱۱: شکاف زاویه دار و مدار معادل آن ۲۷
شکل ۱-۱۲: آنتن موجبری شکافدار ۳۰
شکل ۱-۱۳: نمای سه بعدی از چاله های رسانا در آنتن SIW ۳۱
شکل ۱-۱۴: نمای دو بعدی از موقعیت چاله های رسانا نسبت به یکدیگر در آنتن SIW ۳۲
شکل ۱-۱۵: نمای بالا و پشت آنتن SIW ۳۳
شکل ۱-۱۶: آنتن ارائه شده در [۱۳] ۳۴
شکل ۲-۱: شکاف طولی روی دیواره پهن موجبر ۳۸
شکل ۲-۲: جریان های لحظه ای مد TE_{10} موجبر مستطیلی ۳۹
شکل ۲-۳: نمایش فاصله های بین شکاف ها R_1, R_2, R_3 ..... ۴۵
شکل ۲-۴: آنتن SIW موج متحرک و مدار معادل آن ۴۸
شکل ۲-۵: تبدیل آنتن های موجبری به آنتن SIW معادل ۵۲
شکل ۲-۶: نمایی از چاله های رسانا در SIW ۵۳
شکل ۲-۷: مد TE_{10} در درون SIW ۵۴
شکل ۲-۸: برخورد امواج الکترومغناطیسی با دو چاله رسانای متوالی ۵۵
شکل ۳-۱: منحنی طول رزونانس شکاف نرمالیزه شده با طول موج ۶۱
شکل ۳-۲: منحنی رسانایی شکاف نرمالیزه شده با G_0 در حالت رزونانس ۶۱
شکل ۳-۳: منحنی h1(y) شکاف ۶۲
شکل ۳-۴: منحنی h2(y) شکاف ۶۲
شکل ۳-۵: آنتن SIW موج متحرک و مدار معادل آن ۶۴
شکل ۳-۶: منحنی اندازه S_{11} آنتن ۶۵

شکل ۳-۷: منحنی اندازه S_{21} آنتن ۶۵
شکل ۳-۸: پترن تشعشعی آنتن SIW ارائه شده ۶۸
شکل ۳-۹: مقایسه پهنای باند فرکانسی آنتن پیشنهادی و آنتن [۴۱] ۷۰
شکل ۳-۱۰: مقایسه پترن تشعشعی آنتن پیشنهادی وآنتن [۴۱] ۷۱
شکل ۳-۱۱: مقایسه منحنی اندازه S_{11} آنتن ارائه شده و آنتن [۴۲] ۷۲
شکل ۳-۱۲: منحنی اندازه ی S_{21} آنتن ارائه شده و آنتن [۴۲] ۷۲
شکل ۳-۱۳: مقایسه پترن تشعشعی آنتن پیشنهادی وآنتن [۴۲] ۷۳

فهرست جدول ها

عنوان صفحه

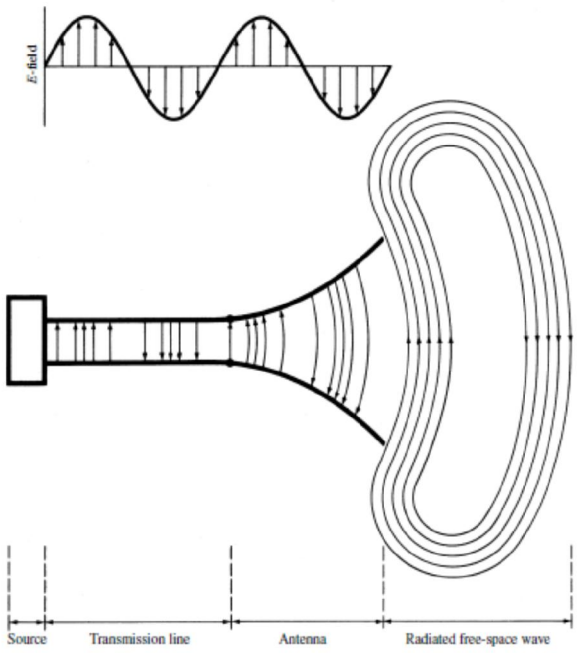
جدول۱-۱: مقایسه دو نوع شکاف بر روی آنتن SIW ۲۸
جدول۳-۱: مشخصات آنتن پیشنهادی پایان نامه..... .....۶۴
جدول۳-۲: مشخصات آنتن مطرح شده در [۴۱] ۶۹

فصل اول

آنتن‌های موجبری شکافدار

۱-۱ آنتن‌ها و پارامترهای بنیادی

آنتن یک قطعه فلزی معمولی (مانند یک میله یا یک سیم) برای تشعشع یا دریافت امواج رادیویی است. فرهنگ تعاریف اصطلاحات استاندارد IEEE [۱] برای آنتن ها، آنتن را وسیله‌ای برای تشعشع یا دریافت امواج رادیویی تعریف می‌کند. همچنان که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، آنتن یک ساختار انتقالی بین فضای آزاد و یک وسیله‌ی هدایتی است. وسیله هدایتی یا خط انتقال ممکن است یک خط هم محور [۲] یا لوله توخالی (موجبر [۳]) باشد که برای انتقال انرژی الکترومغناطیسی از منبع فرستنده به آنتن یا از آنتن به گیرنده استفاده می‌شود. در حالت اول، ما یک آنتن فرستنده و در حالت دوم، یک آنتن گیرنده داریم.

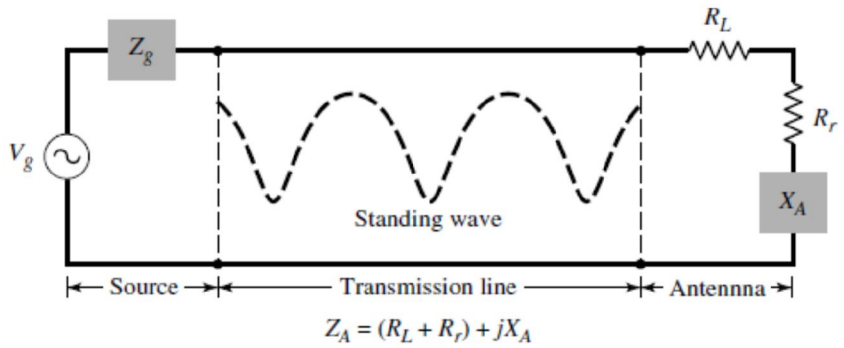


شکل ۱-۱ آنتن به عنوان یک وسیله انتقال [۱]

یک معادل تونن برای حالت فرستندگی سیستم آنتن شکل ۱-۱، در شکل ۱-۲ نشان داده شده است که منبع با یک مولد ایده‌ال، خط انتقال به وسیله یک خط با امپدانس مشخصه Z_c و آنتن توسط یک بار Z_A که به خط انتقال متصل می شود، نمایش داده شده اند. مقاومت بار R_L برای نمایش تلفات دی الکتریکی و هدایتی مربوط به ساختار

[۱] IEEE Std 145-1983
[۲] Coaxial Line
[۳] Waveguide

آنتن است، در صورتی که مقاومت R_r به عنوان مقاومت تشعشعی، به کار رفته و معرف تشعشع آنتن است. راکتانس X_A برای نمایش بخش موهومی امپدانس مربوط به تشعشع آنتن به کار می رود. تحت شرایط ایده آل، انرژی تولید شده منبع باید کاملاً به مقاومت تشعشعی R_r که نماینده تشعشع آنتن است، انتقال یابد. در هر صورت، در سیستمهای عملی، تلفات دی الکتریکی و هدایتی در خط انتقال و آنتن وجود دارند، هم چنان که در فصل مشترک آنتن و خط انتقال تلفات بازتابش (عدم تطبیق) وجود دارد. با در نظر گرفتن امپدانس داخلی منبع و با چشم پوشی از تلفات خط و بازتابش (عدم تطبیق)، بیشترین توان، تحت شرایط تطبیق مزدوج به آنتن می رسد.



شکل ۱-۲ معادل تونن خط آنتن در حال فرستندگی [۱]

امواج بازتاب یافته که در محل اتصال خط انتقال و آنتن به وجود می آید، با امواج متحرک[۴] از منبع به آنتن، امواج ساکن[۵] را در داخل خط انتقال تولید می کنند که مانند یک قطعه تشدید شده، معرف متراکم شدن و ذخیره شدن انرژی است. یک پترن معمولی از موج ساکن در شکل۱-۲ به صورت خط چین نشان داده شده است. اگر سیستم آنتن به طور مناسبی طراحی نشده باشد، خط انتقال به جای هدایت موج و انتقال انرژی، مانند یک عنصر ذخیره کننده انرژی عمل می کند. اگر شدت میدان های ماکزیمم موج ساکن به قدر کافی بزرگ باشد، باعث جرقه در داخل خط انتقال می شود.

تلفات ناشی از خط و آنتن و نیز امواج ساکن نامطلوب هستند. تلفات خط با انتخاب یک خط کم اتلاف، کاهش می یابد و تلفات آنتن را می توان با کاهش مقاومت تلفات که در شکل ۱-۲ با R_L نشان داده شده است، کاهش

[۴] Traveling Wave
[۵] Standing Wave

داد. امواج ساکن و هم چنین میزان انرژی ذخیره شونده در خط انتقال، توسط تطبیق امپدانس آنتن (بار) با امپدانس مشخصه خط، کاهش می یابد. یک مدار معادل، مشابه مدار معادل شکل ۱-۲، برای نمایش سیستم آنتن در حالت گیرندگی استفاده می شود که در این حالت، گیرنده جایگزین منبع می شود. همه بخشهای خط انتقال به همان صورت باقی می ماند. مقاومت تشعشعی R_r در حالت گیرندگی، انتقال انرژی از فضای آزاد به آنتن را نشان می دهد.

معمولاً برای دریافت یا ارسال انرژی در سیستمهای پیشرفته بی سیم، یک آنتن باید بتواند انرژی تشعشعی را در برخی جهات متمرکز و در جهات دیگر حذف کند. آنتن می تواند براساس نیازهای متفاوت، اشکال مختلفی داشته باشد. یک آنتن ممکن است یک تکه سیم رسانا، یک روزنه در موجبر، یک پچ[۶] (تکه صفحه فلزی)، مجموعه‌ای از عنصرها (آرایه)، یک بازتابنده[۷]، یک لنز[۸] و غیره باشد.

برای سیستم‌های مخابراتی بی سیم، آنتن یکی از مهمترین اجزا است. یک طراحی خوب آنتن می تواند بسیاری از نیازمندی‌های سیستم را برآورده کند و عملکرد سیستم را بهبود ببخشد. یک مثال معمولی، تلویزیون می باشد. با استفاده از یک آنتن با کارایی بالا می توان دریافت خوبی از پخش برنامه‌های تلویزیونی داشت. نقش آنتن در سیستم‌های مخابراتی مانند نقش چشمها و عینکها برای انسان است. گستره فعالیت آنتنها بسیار وسیع و پویا است و در طی ۶۰ سال گذشته، فناوری آنتن، سهم غیرقابل انکاری در انقلاب ارتباطات داشته است.

بسیاری از پیشرفتهای مهم که در طی این مدت اتفاق افتاده است، در حال حاضر استفاده عمومی دارند. هر چند امروزه با بسیاری از پی آمدها و چالشها مواجه هستیم، به ویژه از زمانی که کارآیی های سیستم بیشتر مورد توجه واقع شده است. بسیاری از پیشرفتهای فناوری آنتن که از دهه ۱۹۷۰ تا اوایل دهه ۱۹۹۰ تکمیل شده است، هم چنین کارهای در دست اقدام و نشانه‌هایی از یافته‌های آینده در قالب یک نشریه ویژه از مقالات منتشر یافته IEEE (Vol.80, No.1, January 1992) جمع آوری شده است.

---

[۶] Patch

[۷] Reflector

[۸] Lens

برای توصیف عملکرد یک آنتن، تعریف پارامترهای مختلف آن ضروری است. بعضی از این پارامترها به هم وابسته اند و برای شرح کامل عملکرد آنتن، نیاز به تعریف همه آنها نداریم .در این بخش، پارامترهای آنتن تعریف خواهند شد. اغلب تعاریفی که در گیومه قرار گرفته اند، از فرهنگ تعاریف استاندارد اصطلاحات IEEE برای آنتن‌ها (IEEE Std 145-1983) اقتباس شده است که نسخه جدید IEEE Std 145-1973 می باشد.

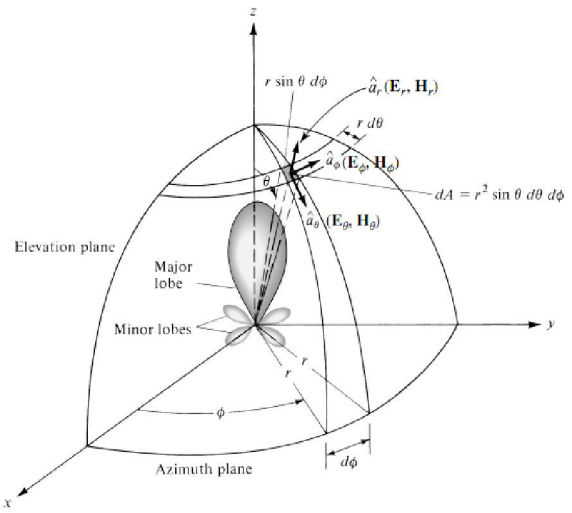
۱-۱-۱ پترن تشعشعی

پترن تشعشعی آنتن یا پترن آنتن، به این صورت تعریف می شود: "یک تابع ریاضی یا یک نمایش گرافیکی از خواص تشعشعی آنتن به صورت تابعی از مختصات فضایی. در اغلب موارد، پترن تشعشعی در ناحیه میدان دور[۹] تعریف می شود و به صورت تابعی از مختصات جهتی نمایش داده می شود. خواص تشعشعی شامل چگالی شار توان، شدت تشعشعی، شدت میدان، سمتگرایی[۱۰]، فاز و پلاریزاسیون می شوند". مهمترین خاصیت تشعشعی، توزیع فضایی دو بعدی یا سه بعدی انرژی تشعشع شده به عنوان تابعی از موقعیت ناظر، در طول یک مسیر یا سطح با شعاع ثابت است. یک دستگاه مختصات مفید و مناسب در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. یک ترسیم میدان الکتریکی (مغناطیسی) دریافت شده در یک شعاع ثابت، پترن دامنه میدان نامیده می شود. هم چنین یک نمودار از تغییر فضایی چگالی توان در امتداد شعاع ثابت، یک پترن توان دامنه نامیده می شود.

اغلب، پترن‌های میدان و توان به مقدار ماکزیمم خود نرمالیزه می شوند که در این صورت پترن‌های میدان و توان نرمالیزه شده نامیده می شوند. هم چنین، معمولاً پترن توان روی یک مقیاس لگاریتمی یا بر حسب دسی بل (dB) رسم می شود. معمولاً این مقیاس یک مقیاس مطلوب و قابل قبول است، چون یک مقیاس لگاریتمی می تواند بخشهایی از الگو را که مقادیر بسیار کوچک دارند با جزئیات بیشتری برجسته نماید که بعداً برای گلبرگهای فرعی به آن اشاره خواهد شد.

[۹] Far-field

[۱۰] Directivity



شکل ۱-۳ دستگاه مختصات برای تحلیل آنتن [۱]

برای یک آنتن:

الف-پترن میدان (در مقیاس خطی) معمولاً یک نمودار از اندازه میدان الکتریکی یا مغناطیسی را به عنوان تابعی از مکان زاویه‌ای نمایش می دهد.

ب-پترن توان (در مقیاس خطی) معمولاً یک نمودار از مربع دامنه میدان الکتریکی یا مغناطیسی را به عنوان تابعی از مکان زاویه‌ای نمایش می دهد.

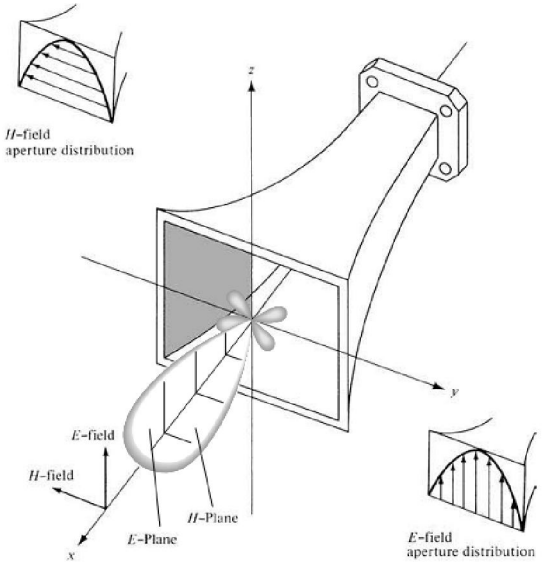
پ-پترن توان (بر حسب dB) اندازه میدان الکتریکی یا مغناطیسی را بر حسب دسی بل به عنوان تابعی از مکان زاویه‌ای نمایش می دهد.

۱-۱-۲ پترن‌های ایزوتروپیک[۱۱]، جهتی[۱۲] و همه جهتی[۱۳]

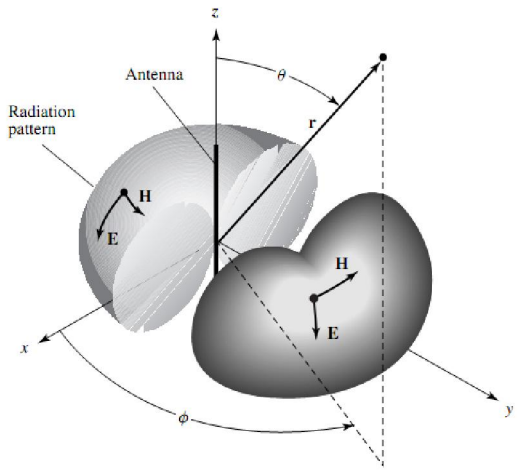
تشعشع کننده ایزوتروپیک" یک آنتن فرضی بدون تلفات می‌باشد که در همه جهت‌ها تشعشع یکسانی دارد". گرچه این امر ایده ال و از نظر فیزیکی غیرقابل تحقق می باشد، اما اغلب به عنوان مرجعی در بیان خواص جهتی آنتن‌ها به کار می رود. آنتن جهتی" آنتنی است که خاصیت تشعشعی یا گیرندگی امواج الکترومغناطیسی آن در بعضی جهت‌ها بیشتر از سایر جهت‌ها می باشد. این عبارت بیشتر در مورد آنتن‌هایی به کار برده می شود که سمتگرایی ماکزیمم آن، به طور قابل توجهی بزرگتر از سمتگرایی یک آنتن نیم موج باشد". مثالهایی از آنتن‌های با پترن‌های تشعشعی جهتی و همه جهتی در شکل ۱-۴ و ۱-۵ نشان داده شده است. همان طور که دیده می

[۱۱] Isotropic Pattern
[۱۲] Directional Pattern
[۱۳] Omnidirectional Pattern

شود پترن شکل ۱-۵ در صفحه افقی[$f(\varphi), \theta=\pi/2$] غیر جهتی است و در صفحه غیرعمودی [$g(\theta), \varphi=$ ثابت] جهتی است. این نوع الگو، پترن همه جهتی نامیده می شود و برای آنتنی تعریف می شود که در یک صفحه معلوم، پترن غیرجهتی دارد (در این مورد صفحه افقی) و در هر صفحه عمود بر آن (در این مورد صفحه عمودی) پترن جهتی دارد.



شکل ۱-۴ پترن آنتن شیپوری هرمی [۱]



شکل ۱-۵ پترن آنتن همه جهتی [۱]

۱-۱-۳ چگالی توان تشعشعی

امواج الکترومغناطیسی برای انتقال اطلاعات از طریق محیطهای بی سیم یا ساختارهای هدایت کننده از یک نقطه به نقطه دیگر، استفاده می شوند. بنابراین، طبیعی است که فرض کنیم در میدان های الکترومغناطیسی توان و انرژی وجود دارد. کمیتی که برای توصیف توان مربوط به امواج الکترومغناطیسی به کار گرفته می شود، بردار پویین‌تینگ لحظه‌ای است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H} \qquad (۱-۱)$$

که در آن:

$\mathcal{W}\ (W/m^2)$: بردار پویین‌تینگ لحظه‌ای، $\mathcal{E}\ (V/m)$: شدت میدان الکتریکی لحظه‌ای، $\mathcal{H}(A/m)$: شدت میدان مغناطیسی لحظه‌ای می باشد. قابل توجه است که میدان ها و کمیت های لحظه‌ای با حروفی نمایش داده می شوند که نوشتار آنها با نوشتار کمیت های همتای مختلط آنها، تفاوت دارد. از آن جا که بردار پویین‌تینگ یک چگالی توان است، کل توان عبور کننده از سطح بسته با انتگرال گیری از مؤلفه عمودی بردار پویین‌تینگ روی سطح به دست می آید.

$$\mathcal{P} = \oiint_S \mathcal{W}.ds = \oiint_S \mathcal{W}.\hat{n}\,da \qquad (۲-۱)$$

که در آن: $\mathcal{P}(W)$: توان کل لحظه‌ای، $\hat{n}$: بردار واحد عمود بر سطح و $da(m^2)$:مساحت بسیار کوچک سطح بسته است. اغلب در کاربردهای متغیر با زمان، مطلوب است که میانگین چگالی توان را که از انتگرال گیری بردار پویین‌تینگ لحظه‌ای روی یک تناوب و تقسیم آن بر یک تناوب به دست می آید، محاسبه کنیم. در مورد تغییرات هماهنگ زمانی به شکل $e^{j\,\omega t}$، میدان های مختلط E و H به صورت زیر با میدان های لحظه‌ای خود ارتباط دارند:

$$\mathcal{E}(x,y,z;t) = Re[E(x,y,z)e^{j\,\omega t}] \qquad (۳-۱)$$

$$\mathcal{H}(x,y,z;t) = Re[H(x,y,z)e^{j\,\omega t}] \qquad (۴-۱)$$

با استفاده از روابط (۱-۳) و (۱-۴) و با توجه به این که $Re\left[Ee^{j\,\omega t}\right] = \frac{1}{2}[Ee^{j\,\omega t} + E^*e^{-j\,\omega t}]$ ، رابطه (۱-۱) به صورت زیر نوشته می شود.

$$\mathcal{W} = \mathcal{E} \times \mathcal{H} = \frac{1}{2} Re[E \times H^*] + \frac{1}{2} Re\left[E \times H e^{j\,2\omega t}\right] \qquad (۵-۱)$$

اولین عبارت از رابطه (۱-۵) تابع زمان نیست و تغییرات زمانی عبارت دوم، دو برابر فرکانس داده شده است. میانگین زمانی بردار پویین‌تینگ (چگالی توان میانگین) می تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$W_{av}(x,y,z) = [\mathcal{W}(x,y,z;t)]_{av} = \frac{1}{2} Re[E \times H^*] \qquad (۶-۱)$$

ضریب ۰/۵ در روابط (۱-۵) و (۱-۶) به این دلیل به کار می رود که میدان های E و H مقادیر ماکزیمم را نشان می دهند و برای مقادیر موثر، باید این ضرایب حذف شوند.

۱-۱-٤ شدت تشعشع

شدت تشعشع در یک جهت مشخص، به صورت " توان تشعشع شده از آنتن در هر واحد زاویه فضایی" تعریف می شود. شدت تشعشع یک پارامتر میدان دور است و به سادگی از ضرب چگالی تشعشع در مربع فاصله به دست می آید. برای شکل ریاضی آن می توان نوشت:

$$U = r^2\, w_{rad} \qquad (۷-۱)$$

که در آن: U: شدت تشعشع (وات بر واحد زاویه فضایی)، w_{rad}: چگالی تشعشع (وات بر متر مربع)، هم چنین، توان تشعشعی با میدان الکتریکی ناحیه دور یک آنتن، به صورت زیر رابطه دارد.

$$U(\theta,\phi) = \frac{r^2}{2\eta}|E(r,\theta,\phi)|^2 \simeq \frac{r^2}{2\eta}\left[|E_\theta(r,\theta,\phi)|^2 + \left|E_\phi(r,\theta,\phi)\right|^2\right]$$
$$\simeq \frac{1}{2\eta}\left[\left|E_\theta^\circ(\theta,\phi)\right|^2 + \left|E_\phi^\circ(\theta,\phi)\right|^2\right]$$

(۱-۷-الف)

که در آن $E(r,\theta,\varphi)$، شدت میدان الکتریکی ناحیه دور آنتن است و برابر است با $E^\circ(\theta,\phi)\frac{e^{-jkr}}{r}$، هم چنین E_θ و E_ϕ ، مؤلفه‌های میدان الکتریکی ناحیه دور آنتن و η امپدانس ذاتی محیط است. اگر مؤلفه میدان الکتریکی شعاعی (E_r) وجود داشته باشد، فرض می شود در ناحیه دور، کوچک است. بنابراین پترن توان، یک اندازه از شدت تشعشع است. توان کل با انتگرال گیری از شدت تشعشع (۱-۷) روی زاویه فضایی کل 4π به دست می آید. بنابراین:

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U\, d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U\ \sin\theta\, d\theta\, d\phi \qquad (۸-۱)$$

که $d\Omega$ ، عنصر زاویه فضایی است و برابر است با $\sin\theta\, d\theta\, d\varphi$.

۱-۱-۵ سمتگرایی

در نسخه ۱۹۸۳ فرهنگ تعاریف استاندارد اصطلاحات IEEE برای آنتن‌ها، تعریف سمتگرایی تغییر زیادی در مقایسه با نسخه ۱۹۷۳ کرده است. اصطلاح سمتگرایی در نسخه ۱۹۸۳ جایگزین کلمه بهره جهتی[۱۴] در نسخه ۱۹۷۳ شده است. در نسخه جدید، اصطلاح بهره جهتی حذف شده است. به عقیده مؤلفان استانداردهای جدید ۱۹۸۳، " این تغییر استاندارد را در مسیری قرار می دهد که مورد استفاده مشترک میان مهندسان آنتن قرار می گیرد و هم چنین در مسیر سایر استانداردهای بین المللی، مخصوصاً استانداردهای کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)[۱۵] قرار می دهد". بنابراین سمتگرایی آنتن این گونه تعریف می شود: "نسبت شدت تشعشع در یک جهت معلوم، به میانگین شدت تشعشع در کل جهات. شدت تشعشع میانگین برابر است با کل توان تشعشع شده توسط آنتن تقسیم بر 4π. اگر جهت تعیین نشده باشد، جهت ماکزیمم شدت تشعشع منظور می شود". به زبان ساده تر سمتگرایی یک آنتن غیر ایزوتروپیک معادل است با نسبت شدت تشعشع آن در جهت موردنظر به شدت تشعشع یک منبع ایزوتروپیک . شکل ریاضی سمتگرایی را می توان به صورت زیر نوشت.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \qquad (۹-۱)$$

اگر جهت خاصی تعیین نشده باشد، جهت شدت تشعشع ماکزیمم منظور می شود (ستمگرایی ماکزیمم) که به صورت زیر بیان می شود.

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{|max}}{U_0} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \qquad (۹-۱\text{-الف})$$

[۱۴] Directive Gain

[۱۵] International Electrotechnical Commision

که در آن D: سمتگرایی (بدون بعد)، D_0: سمتگرایی ماکزیمم (بدون بعد)، U: شدت تشعشع (واحد زاویه فضایی/وات)، U_{max}: شدت تشعشع ماکزیمم (واحد زاویه فضایی/وات)، U_0: شدت تشعشع منبع ایزوتروپیک (واحد زاویه فضایی/وات و P_{rad}: توان تشعشعی کل (وات) است.

از رابطه (۱-۹) و (۱-۹-الف) به وضوح دیده می شود که در مورد یک منبع ایزوتروپیک، چون U و U_{max} و U_0 با هم برابرند، سمتگرایی برابر با یک است. در مورد آنتن‌هایی که مؤلفه‌های پلاریزاسیون متعامد دارند، سمتگرایی جزئی[۱۶] آنتن برای یک پلاریزاسیون معلوم در یک جهت معلوم تعریف می شود: " آن بخش از شدت تشعشع مربوط به پلاریزاسیون مشخص، تقسیم بر شدت تشعشع کل که روی همه جهت‌ها میانگین‌گیری شده است. با این تعریف برای سمتگرایی جزئی یک جهت معلوم، سمتگرایی کل، مجموع سمتگرایی های جزئی برای هر جفت پلاریزاسیون متعامد است. یک دستگاه مختصات کروی، سمتگرایی ماکزیمم کل D_0 برای مؤلفه‌های متعامد θ و ϕ یک آنتن می توان بدین صورت نوشت.

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \qquad (۱۰-۱)$$

در حالی که سمتگرایی های جزئی D_θ و D_ϕ به صورت زیر بیان می شوند.

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \qquad (۱۰-۱\text{-الف})$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \qquad (۱۰-۱\text{-ب})$$

۱-۱-۷ پهنای باند

پهنای باند یک آنتن تعریف می شود: " محدوده فرکانسی که در آن، عملکرد آنتن نسبت به برخی مشخصه‌ها، از استاندارد خاصی پیروی می کند". در واقع پهنای باند به محدوده فرکانسی در دو طرف فرکانس مرکزی (معمولاً فرکانس تشدید برای یک دو قطبی) گفته می شود که در آن محدوده، مشخصه‌های آنتن (از قبیل امپدانس ورودی، پترن، پهنای بیم، پلاریزاسیون، تراز گلبرگ کناری، بهره، جهت پرتو و راندمان تشعشعی) در حدود مقدار قابل

[۱۶] Partial Directivity

قبول آنها در فرکانس مرکزی هستند. برای آنتن‌های باند پهن، پهنای باند، معمولاً به صورت نسبت فرکانس کاری قابل قبول بالا، به فرکانس قابل قبول پایین، بیان می شود. برای مثال منظور از پهنای باند ۱۰:۱ این است که فرکانس بالا، ده برابر بزرگتر از فرکانس پایین است. برای آنتن‌های باند باریک، مثل آنتن‌های موجبری پهنای باند به صورت درصدی از اختلاف فرکانس بالا و فرکانس پایین روی فرکانس مرکزی پهنای باند، تعریف می شود.

برای مثال پهنای باند ۵٪ حاکی از این است که اختلاف فرکانس کاری قابل قبول بالا و فرکانس قابل قبول پایین، پنج درصد فرکانس مرکزی است.

چون مشخصه‌های یک آنتن (امپدانس ورودی، پترن تشعشعی، بهره، پلاریزاسیون و غیره) لزوماً به یک شیوه مشابه، تغییر نمی کنند و یا حتی، به شدت تحت تأثیر فرکانس هستند، مشخصه‌های منحصر به فردی از پهنای باند وجود ندارد. مشخصه‌ها در هر مورد، مطابق نیازمندی‌های ویژه‌ای، تنظیم می گردد. معمولاً یک تفاوت بین تغییرات پترن تشعشعی و امپدانس ورودی وجود دارد. برای اهمیت دادن به این تفاوت، پهنای باند پترن تشعشعی و پهنای باند امپدانس استفاده می شود. بهره، تراز گلبرگ کناری، پهنای بیم، پلاریزاسیون و جهت بیم، به پهنای باند پترن تشعشعی مربوط می شوند، در حالی که امپدانس ورودی و راندمان تشعشعی به پهنای باند امپدانس، مرتبط هستند.

در حالت کلی پهنای باند آنتن محدوده‌ای از بازه فرکانسی آنتن است که پارامتر VSWR آن کمتر از ۲ باشد و یا پارامتر ضریب بازگشت ($|S_{11}|$) آن کمتر از ۱۰dB- باشد. اما در این پایان نامه، ما پهنای باند امپدانسی را با استاندارد ضریب بازگشت کمتر از ۱۰ dB- و ضریب انتقال کمتر از ۳ dB- برمی‌گزینیم.

۱-۱-۸ پلاریزاسیون

پلاریزاسیون یک آنتن در یک جهت معلوم، عبارت است از: " پلاریزاسیون موج ارسال شده (تشعشع شده) آنتن". توجه کنید وقتی، جهت مشخص نشده باشد، پلاریزاسیون همان پلاریزاسیون در جهت بهره ماکزیمم خواهد بود. در عمل پلاریزاسیون انرژی تشعشع شده با تغییر جهت تشعشع نسبت به مرکز آنتن تغییر می کند به طوری که بخشهای مختلف پترن تشعشعی، پلاریزاسیون های متفاوتی خواهند داشت. پلاریزاسیون انرژی تشعشع شده