



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

تحلیل و شبیه سازی زاویه روبش کور آنتن آرایه فازی و حذف آن با استفاده از ساختار های EBG

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات

فرید شکوهی

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد

دکتر امیر برجی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج
مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق
موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه
صنعتی اصفهان است. این پایان‌نامه با حمایت
مادی و معنوی مرکز تحقیقات مخابرات ایران به
انجام رسیده است.

چکیده

در چند دهه اخیر آنتن های آرایه فازی با قابلیت تغییر جهت پرتو کاربرد های گسترده ای داشته اند. یکی از مسائل مهم در طراحی آنتن های آرایه فازی، وجود زاویه های کور در محدوده اسکن آرایه است که حداکثر زاویه اسکن آرایه را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. در زاویه کور، ضریب انعکاس آرایه نزدیک به یک شده و تمامی توان ورودی آرایه، به طبقات قبلی فرستنده (در آنتن فرستنده) باز می گردد که در این صورت امکان آسیب دیدن جدی برای طبقات قبلی وجود خواهد داشت. در آنتن گیرنده نیز به طور مشابه در این زاویه توانی در گیرنده دریافت نمی شود. این پدیده برای آنتن های آرایه فازی با عناصر مختلف به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل بروز این پدیده را می توان تزویج بین مد های تشعشع کننده آرایه با مد های منتشر شونده در ساختار های هدایت کننده موج در آرایه (همچون پوشش عایقی آرایه با عناصر موجبری و لایه عایق آرایه های مسطح) در یک زاویه خاص دانست. در این زاویه تمام توان ورودی آرایه در داخل ساختار هدایت کننده موج منتشر می شود.

در این پایان نامه به بررسی تفصیلی دلایل بروز این پدیده در آرایه آنتن با عناصر پچ میکرواستریپی و روش های تعیین زاویه کور آرایه خواهیم پرداخت. در ادامه با معرفی ساختار های متناوب دارای باند ممنوعه، به بررسی ویژگی های آن ها خواهیم پرداخت و کاربرد آنها در بر طرف کردن کوری آرایه را معرفی خواهیم نمود.

کلمات کلیدی: ۱- آنتن آرایه فازی. ۲- کور شدن آرایه فازی. ۳- ساختار های متناوب دارای باند ممنوعه.

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه
۲	۲-۱ مقدمه
۵	۲-۱ ساختار پایان نامه
	فصل دوم: پدیده کور شدن آنتن آرایهای و روش های تشخیص آن
۶	۱-۲ مقدمه
۷	۱-۲-۱ نمایش فلوکه برای جریان ها و میدان های آرایه متناوب نامحدود از عناصر جریان
۸	۲-۲-۲ بررسی انتشار امواج سطحی در لایه عایق ساختار های مسطح
۹	۲-۲-۳ بررسی دلایل کور شدن آرایه های مدار چاپی
۹	۳-۲ بررسی زاویه روبش کور آرایه بر اساس نمودار گلبرگ های گرتینگ آرایه
۱۱	۴-۲ مد های هدایت شونده در نمودار گلبرگ های گرتینگ
۱۶	۵-۲ بررسی زاویه کور شدن آرایه به کمک آنالیز فلوکه یک ساختار متناوب پایه
۱۷	۱-۵-۲ محاسبه میدان های الکتریکی و مغناطیسی در یک ساختار نامحدود به کمک پتانسیل های برداری
۱۷	۲-۵-۲ محاسبه بسط فلوکه جریان و مؤلفه های جریان تحریک کننده مد های TE و TM
۱۸	۳-۵-۲ محاسبه امیدانس فلوکه جریان های متناوب بر روی زیر لایه عایق زمین شده
۲۱	۴-۵-۲ محاسبه نماد تشعشی آرایه نامحدود عنصر های جریان در روی لایه عایق زمین شده

۶-۲ تعیین زوایای کور آرایه به کمک محاسبه ثابت انتشار امواج سطحی ۲۳

فصل سوم: محاسبه ضریب انعکاس آرایه آنتن میکرواستریپی نامحدود به کمک روش ممان در حوزه طیف

۱-۳ مقدمه ۲۵

۲-۳ فرمول بندی مسئله ۲۶

۱-۲-۳ معادله انتگرالی برای یک آنتن پچ میکرواستریپی بر روی یک عایق دو لایه ای ۲۷

۲-۲-۳ محاسبه میدان تحریک برای روش ممان ۲۹

۳-۳ انتخاب توابع پایه و توابع تست مناسب ۳۱

۴-۳ تابع گرین متناوب و محاسبه درایه های ماتریس امیدانس ۳۲

۴-۳ روش ایوالد برای بهبود همگرایی سری تابع گرین ۳۴

۱-۴-۳ محاسبه درایه های تکین ماتریس امیدانس در حوزه مکان ۳۷

۵-۳ محاسبه بردار ولتاژ ۳۸

۱-۵-۳ نکات مهم در تسریع محاسبات روش ممان ۳۹

۶-۳ تحلیل یک ساختار نمونه به کمک روش ممان و بدست آوردن نمودار انعکاس آرایه ۴۱

فصل چهارم: حذف کور شدن آنتن آرایه فازی به کمک ساختارهای متناوب دارای باند ممنوعه

۱-۴ مقدمه ۴۳

۲-۴ روش های تحلیل ساختارهای متناوب دارای باند ممنوعه ۴۴

۱-۲-۴ تحلیل ساختارهای متناوب دارای باند ممنوعه با روش عنصر فشرده ۴۵

۲-۲-۴ بررسی خواص ساختارهای متناوب به کمک مدل خط انتقال متناوب ۴۹

۱-۲-۲-۴ نمودار پاشندگی در دو بعد ۵۲

۳-۴ تحلیل ساختارهای متناوب دارای باند ممنوعه به کمک روش ممان ۵۴

۱-۳-۴ محاسبه نمودار انعکاس از سطح یک ساختار EBG ۵۴

۲-۳-۴ محاسبه میدان تابش روش ممان ۵۴

۳-۳-۴ محاسبه نمودار پاشندگی ساختار باند ممنوعه به کمک روش ممان ۵۷

۱-۳-۳-۴ محاسبه صفرهای دترمینان ماتریس ضرایب روش ممان ۵۸

۴-۴ محاسبه نمودار پاشندگی و انعکاس برای چند ساختار متناوب ۵۹

۱-۴-۴ پچ میکرواستریپی بر روی لایه عایق زمین شده ۵۹

۲-۴-۴ ساختار قارچ مانند ۶۱

- ۶۵ ۵-۴ طراحی ساختار EBG و حذف کور شدن آرایه به کمک آن
- ۶۵ ۱-۵-۴ طراحی ساختار EBG
- ۶۷ ۲-۵-۴ آرایه نامحدود با تغذیه شکافی
- ۶۹ ۳-۵-۴ ترکیب EBG طراحی شده با آرایه نامحدود

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۷۱ ۱-۵ نتیجه گیری
- ۷۲ ۲-۵ پیشنهادات

پیوست اول: محاسبه تابع گرین ساختار چند لایه

- ۷۳ ۱-۱ مقدمه
- ۷۴ ۲-۱ فرمول بندی میدان
- ۷۶ ۳-۱ فرمول بندی پتانسیل
- ۷۸ ۴-۱ محاسبه تابع گرین ساختار دو لایه

پیوست دوم: محاسبه انتگرال کانولوشن توابع پایه و تست و انتگرال های تحلیلی روش ممان

- ۸۰ ۱-۲ محاسبه انتگرال کانولوشن
- ۸۲ ۲-۲ بدست آوردن عبارتهای تحلیلی ماتریس امپدانس

پیوست سوم: تقریب تابع گرین در حوزه مکان و عدد موج به کمک استفاده از توابع نمایی مختلط

- ۸۴ ۱-۳ مقدمه
- ۸۵ ۲-۳ تقریب توابع مختلط به کمک توابع نمایی مختلط
- ۸۸ ۱-۳-۳ رهیافت اول برای تقریب سه مرحله ای تابع گرین
- ۸۹ ۲-۳-۳ رهیافت دوم برای تقریب سه مرحله ای تابع گرین
- ۹۰ ۳-۳-۳ رهیافت سوم برای تقریب سه مرحله ای تابع گرین
- ۹۲ **مراجع:**

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

در چند دهه اخیر آنتن های آرایه فازی با قابلیت تغییر جهت پرتو کاربرد های گسترده ای داشته اند. یکی از مسائلی که همواره در این آنتن ها مورد توجه بوده است، پدیده کورشدن آرایه می باشد. به طور خلاصه می توان گفت که با روبش^۱ آرایه در یک زاویه روبش خاص به نام زاویه کور، ضریب انعکاس آرایه نزدیک به یک شده و تمام توان ورودی آرایه از ورودی آرایه منعکس شده و به طبقات قبلی بر می گردد. در آرایه های موجبری که در آن ها از پوشش های عایقی برای حفاظت آرایه استفاده می شود. و یا پوشش رادوم^۲ آنتن های آرایه ای، به دلیل وجود لایه عایق بر روی آنتن و یا هر ساختار پشتیبانی کننده امواج کند^۳، امکان هدایت امواج سطحی در لایه عایق وجود خواهد داشت. در این صورت ممکن است در یک زاویه روبش خاص تمام توان ورودی آرایه در داخل لایه عایق هدایت شده و توانی از آنتن تشعشع نگردد.

این پدیده برای نخستین بار در دهه های ۵۰ و ۶۰ میلادی در آنتن های آرایه ای با عناصر موجبری مشاهده شد [۸-۱]. در ابتدا این پدیده به تزویج امواج سطحی با عناصر آرایه نسبت داده می شد [۱۷، ۳-۲]. در اندازه گیری ها مشاهده شده که در یک زاویه روبش خاص آرایه تمامی توان ورودی به تغذیه آرایه برگشته و کورشدن آرایه رخ می دهد. نکته قابل توجه این است که زاویه کور در فواصل نزدیک به تابش عمود رخ داده و نمی توان آن را به حضور گلبرگ های گریٹینگ در نماد تشعشعی آرایه نسبت داد. همچنین مشاهده می گردد که در صورت افزایش تعداد عناصر در آرایه نمودار ضریب انعکاس آرایه بر حسب زاویه روبش در نزدیکی زاویه کور، تیز تر و مقدار آن

¹ Scanning

² Radom

³ Slow wave

در زاویه کور به یک (انعکاس کامل) نزدیک تر می‌شود. در [۱] پیشنهاد شد که با فاصله گذاری کمتر عناصر آرایه می‌توان زاویه کور را به زاویه ای خارج از محدوده روبش مورد نظر انتقال داد. در [۵، ۱۱] به کمک تحلیل مودال یک آرایه با شبکه مثلثی از عناصر موجبری، با محاسبه توزیع بین عناصر آرایه و با در نظر گرفتن مد های مرتبه بالاتر بروز زاویه روبش کور آرایه نشان داده شده است. [۷] نیز به کمک سری مد های گریپینگ به بررسی اثر امواج سطحی در یک آرایه از عناصر موجبری پرداخته است. از تحلیل های مودال یک آرایه نامحدود، می‌توان این نتیجه را گرفت که وجود لایه عایق باعث ایجاد توزیع بین مد های تحریک شونده توسط لایه عایق و مد های مرتبه بالاتر عناصر آرایه شده و زاویه کور ایجاد می‌شود. در [۹، ۱۲، ۱۶] با معرفی شبیه‌ساز موجبری برای یک آرایه نامحدود از عناصر با لایه عایق، پدیده کور شدن آرایه نشان داده شده و به کمک اطلاعات بدست آمده یک نمایش هندسی برای بررسی زاویه کور ارائه شده است.

در [۱۴] به بررسی اثر امواج سطحی در بروز زاویه کور پرداخته شده است. در این مقاله دو مسئله مهم در مورد اثر لایه عایق و امواج سطحی منتشر شونده در آن به این صورت مطرح شده است که اولاً امواج سطحی منتشر شونده در لایه عایق ناشی از مد های تشعشی آنتن اصلی نبوده و ناشی از حضور لایه عایق در آنتن است. ثانیاً انتشار امواج سطحی ناشی از تحریک مد هایی است که تنها در لایه عایق قابلیت انتشار دارند و در هوا منتشر نمی‌شوند (در تشعشع آنتن نقشی ندارند). در [۱۰، ۱۵] برای اولین بار به وجود میدان های ناشی در آرایه نامحدود شامل لایه عایق و اثر آن در ایجاد زاویه کور آرایه و مشخصات آن پرداخته شده و نشان داده شده است که امواج مختلط ناشی آرایه در زاویه ای نزدیک به زاویه کور، تشعشع می‌کنند. آرایه واقعی امکان تحریک امواج سطحی خالص را نداشته و امواج تحریک شده به صورت امواج مختلط بوده و شامل امواج ناشی نیز می‌گردند. امواج سطحی فقط در زاویه کور باعث ایجاد توزیع شده و تغییر نمودار ضریب انعکاس بر حسب زاویه در اطراف این زاویه وابسته به مد های ناشی تحریک شده است. علاوه بر این تحریک مد ناشی باعث پهن شدن نمودار ضریب انعکاس بر حسب زاویه در اطراف زاویه کور می‌شود. علاوه بر این در یک آرایه با عناصر موجبری در زاویه کور آرایه، توزیع بین مد های مرتبه بالاتر موجبر با مد های پشتیبانی شونده توسط لایه عایق باعث تغییر توزیع میدان دهانه موجبر گشته و این تغییر باعث کوری آرایه می‌شود. در این حالت اثر مد های تحریک شده توسط لایه عایق و مد های موجبر باعث صفر شدن ادمیتانس دیده شده از دهانه موجبر شده و در این حالت دو مد موجبر با هم ۹۰ درجه اختلاف فاز پیدا می‌کنند [۱۸، ۱۳].

پدیده کور شدن آرایه در آنتن های پچ میکرواستریپی نیز رخ می‌دهد [۲۰، ۳۱، ۳۲]. در این آنتن ها به دلیل وجود لایه عایق به عنوان زیر لایه آرایه امکان هدایت و انتشار امواج سطحی به داخل لایه عایق به دلیل تحریک مد های هدایت شده، وجود دارد. این پدیده برای آرایه های پچ میکرواستریپی در [۲۰] مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از روش ممان در حوزه طیف یک آرایه از دو قطبی های چابی را بر روی یک لایه عایق تحلیل نموده و رخ دادن این پدیده را در زوایای خاص نشان داده است. همچنین با شرح دلایل رخ دادن این پدیده در آنتن های پچ میکرواستریپی، به کمک استفاده از نمودار گلبرگ های گریپینگ، روشی هندسی برای پیش بینی و محاسبه زاویه کور بیان شده است. در [۲۱] به کمک محاسبه ایدانانس دیده شده از تغذیه آرایه در زوایای روبش مختلف وجود این

پدیده نشان داده شده و به کمک استفاده از یک مدل مداری برای آرایه بدست آمده از تحلیل روش ممان در محل تغذیه، این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. در [۲۲] به کمک محاسبه ثابت انتشار امواج سطحی با استفاده از معادله پاشندگی لایه عایق، شرایطی برای دور کردن زاویه کور از حداکثر زاویه روبش مورد نظر ارائه شده است. در [۲۴] به کمک اندازه گیری ضریب انعکاس هر عنصر آرایه و در نظر گرفتن اثرات تزویج بین عناصر، روشی برای پیش بینی زاویه کور برای آرایه با عناصر موجبری ارائه شده است

در دهه اخیر با گسترش ساختارهای الکترومغناطیسی دارای باند ممنوعه (EBG)^۱ روش هایی برای برطرف کردن کور شدن آرایه به کمک این ساختارها ارائه شده است [۳۰-۲۵]. در [۲۵] به کمک استفاده از یک ساختار دارای باند ممنوعه، و تحلیل آرایه به کمک روش ممان، از کور شدن آرایه جلوگیری شده است. در [۲۶] با استفاده از استوانه های عایق و به کار بردن پچ میکرواستریپی بر روی آنها به عنوان آنتن مانع انتشار امواج سطحی و بازگشت توان ورودی به آرایه شده و نشان داده شده است که ساختار ارائه شده همانند یک ساختار دارای باند ممنوعه عمل کرده و گذشته از حذف کور شدن آرایه، پهنای باند آرایه را نیز افزایش می دهد. در [۲۷] به کمک شبیه سازی عددی، با استفاده از ساختارهای دارای باند ممنوعه کور شدن آرایه برطرف شده و از پچ های زمین شده (به کمک اتصال کوتاه به زمین)^۲ پیرامون هر عنصر آرایه برای جلوگیری از انتشار امواج سطحی و رفع کور شدن آرایه استفاده شده است. در [۲۸] نشان داده شده است که می توان با ایجاد نقصان^۳ در صفحه زمین آرایه (که به صورت یک مدار تشدید سری مدل می شود)، مانع از انتشار امواج سطحی شده و کور شدن آرایه را برطرف نمود. با تنظیم پارامترهای نقصان نیز می توان به طراحی بهینه برای محل و پهنای باند ممنوعه و تنظیم فرکانس کار آرایه رسید. هر چند استفاده از نقصان در صفحه زمین آرایه به لحاظ ساخت، ساده تر از استفاده از ساختارهای دارای باند ممنوعه است اما این نقصان باعث تشعشع آرایه در زیر صفحه زمین آرایه شده و بهره را کاهش می دهد. در [۲۹] بعد از معرفی ساختارهای دارای باند ممنوعه و فرمول بندی روش ممان در حوزه عدد موج، با بدست آوردن نمودار پاشندگی یک ساختار نمونه به بررسی رفع پدیده کور شدن آرایه به کمک این ساختار پرداخته و نتایج حاصله را با استفاده از شبیه ساز موجبری مورد بررسی قرار داده است. این پدیده در آرایه های با عناصر شکاف به تدریج بازشونده^۴ که در آرایه های پهن باند به کار می روند در [۳۴-۳۷] بررسی شده و روش هایی برای حذف این پدیده ارائه شده است. در [۳۰، ۲۳] نشان داده شده است که در صورتی که عناصر آرایه به صورت تصادفی چیده شده باشند، کوری آرایه برطرف شده و یا به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. در [۳۱] این پدیده برای صفحات روبش مختلف در یک آرایه با عناصر پچ میکرواستریپی بررسی شده و با بررسی زاویه کور و ویژگی های آرایه در این زاویه، راهنمایی هایی برای افزایش حداکثر زاویه روبش ارائه شده است. در [۳۲] با تحلیل یک آرایه نامحدود از عناصر پچ میکرواستریپی بر روی بستر عایق ناهمسانگرد، بروز این پدیده در آرایه با بدست آوردن نمودار ضریب انعکاس بر حسب زاویه نشان داده شده است. در این مقاله نشان داده شده است که در صورتی که از عایق فریتی برای آرایه استفاده کنیم، نحوه بایاس فریت

¹ Electromagnetic Band Gap structures

² via

³ Defect

⁴ Tapered Slot Antenna

با میدان DC بر خواص روبش آرایه و حضور زاویه کور در صفحات مختلف روبش، اثر گذار خواهد بود و در مواردی زاویه کور آرایه را تغییر داده و یا حذف می نماید. در [۳۳] نشان داده شده است که در صورت کاربرد عناصر پارازیتی^۱ در آرایه با عناصر پیچ میکرواستریپی می توان اندازه ضریب انعکاس آرایه را در زاویه کور به میزان قابل توجهی کاهش داد. در [۳۹،۳۸] نشان داده شده است که در صورت استفاده از دیود ورکتور در کنار تغذیه آرایه پیچ میکرواستریپی می توان با تنظیم بایاس دیود، زاویه کور را جابجا و حتی حذف نمود. در این حالت استفاده از دیود ورکتور در کنار تغذیه عنصر آرایه باعث افزایش بهره نیز می گردد.

۲-۱ ساختار پایان نامه

در ابتدا در فصل دوم به معرفی تحلیل فلوکه برای ساختارهای متناوب دو بعدی پرداخته و با معرفی پدیده کور شدن آرایه و شرح دلایل آن، به کمک تحلیل فلوکه بروز زاویه کور برای آرایه نامحدود از عناصر جریان داده شده است. در این فصل اثر زاویه کور را بر نمودار بهره فعال آرایه مشاهده کرده و نحوه بدست آوردن این زاویه برای عناصر یک آرایه نامحدود از پیچ میکرواستریپ به کمک یک روش هندسی ارائه شده است. با استفاده از روش ارائه شده می توان زاویه کور را با دقت قابل توجهی پیش بینی نمود.

در فصل سوم به معرفی روش ممان در حوزه عدد موج پرداخته و نحوه بدست آوردن جریانهای یک آرایه از پیچ میکرواستریپ را به کمک این روش بررسی خواهیم کرد. با محاسبه ضریب انعکاس آرایه به کمک این روش کور شدن آرایه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن با نتایج بدست آمده از روش تحلیل فلوکه مقایسه شده است.

در فصل چهارم نیز با معرفی ساختارهای متناوب دارای باند ممنوعه، به معرفی روشهای تحلیل این ساختارها و برخی از کاربردهای آنها خواهیم پرداخت. با استفاده از روش ممان به بررسی پارامترهای این ساختارها از جمله نمودار پاشندگی و نمودار انعکاس بر حسب فرکانس خواهیم پرداخت. با استفاده از این ساختارها در یک آرایه نامحدود، نشان خواهیم داد که در صورت به کار بردن این ساختارها، امواج سطحی قابلیت انتشار نداشته و در نتیجه زاویه کوری آرایه برطرف می شود. نتیجه گیری و پیشنهادات نیز در فصل پنجم ارائه شده است.

¹ Parasitic Element

فصل دوم

پدیده کور شدن آنتن آرایه‌ای و روش‌های تشخیص آن

۲-۱ مقدمه

کور شدن آنتن آرایه‌ای در آنتن آرایه فازی مسئله ایست که برای آرایه‌ها با عنصرهای موجبری و مدار چاپی به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰-۳۵]. حضور یک لایه عایق به عنوان پوشش آرایه موجبری و یا رادوم^۱ آنتن یا یک لایه عایق در آرایه‌های مدار چاپی، دلیل عمده ایجاد این پدیده می‌باشد [۲۰]. وجود چنین لایه‌ای به اشکال مختلف باعث ایجاد امواج کند^۲ در ساختار شده که می‌تواند دلیل اصلی پیدایش کور شدن آرایه باشد هر چند که این پدیده به امواج تند^۳ و یا امواج نشتی^۴ نیز نسبت داده می‌شود [۱۰]. به طور کلی و با در نظر گرفتن دلایل ذکر شده برای وقوع این پدیده، می‌توان علت اصلی این پدیده را ایجاد تشدید بین آرایه فازی و این امواج که توسط لایه عایق پشتیبانی می‌شوند دانست. لازم به ذکر است که بررسی آرایه فازی در قالب مد‌های فلوکه ساختار متناوب آرایه، ما را به روشنی به این نتیجه می‌رساند. در این فصل در ابتدا با معرفی سری فلوکه جریان‌ها و میدان‌های یک ساختار متناوب نامحدود و امواج سطحی منتشر شونده در این ساختار، به بررسی کلی این پدیده و علل آن پرداخته و روشی هندسی برای تعیین زاویه روبش کور آرایه ارائه خواهیم نمود. در ادامه به کمک تحلیل میدان‌های یک عنصر جریان در محیط آرایه، رخ دادن این پدیده را بررسی کرده و به کمک روش ارائه شده زاویه روبش کور را محاسبه خواهیم نمود.

¹ Radom

² Slow wave

³ Fast wave

⁴ Leaky wave

۲-۱-۲ نمایش فلوکه برای جریان‌ها و میدان‌های آرایه متناوب نامحدود از عناصر جریان

تبدیل فوری یک تابع متناوب به صورت طیف گسسته‌ای از فرکانس‌ها می‌باشد که پوش آن، تبدیل فوری پیوسته تناوب اصلی تابع است. در یک تابع مختلط متناوب، دامنه و فاز تابع با یک تناوب یکسان تکرار می‌شوند. در صورتی که یک تابع متناوب را به صورت زیر در نظر بگیریم، رابطه زیر را می‌توان بین یک تابع متناوب و سری فوری آن و نمایش تابع به کمک سری فوری، مشاهده نمود.

$$g(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(x-na) \rightarrow \tilde{g}(k_x) = \frac{2\pi}{a} \tilde{f}(k_x) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(k_x - \frac{2n\pi}{a}\right) \quad (1-2)$$

$$g(x) = \frac{2\pi}{a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{f}\left(\frac{2n\pi}{a}\right) \exp\left(-j\frac{2n\pi x}{a}\right)$$

در صورتی که تناوب دامنه و فاز، متفاوت باشد می‌توان از نمایشی مشابه نمایش سری فوری، برای تابع استفاده کرد. در مورد یک آرایه از عناصر جریان خطی یا صفحه‌ای نامحدود، می‌توان این مسئله را به عنوان تفاوت فاز بین عناصر آرایه دانست که در واقع در یک آرایه واقعی، وظیفه جهت دهی پرتو آرایه را بر عهده دارد. تابع زیر را می‌توان به عنوان چنین تابعی در نظر گرفت.

$$h(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(x-na) \exp(-jn\varphi) \quad (2-2)$$

تفاوت تابع فوق با تابع $g(x)$ در این است که در تابع $h(x)$ فاز تابع در هر تناوب به میزان ثابتی تغییر می‌کند.

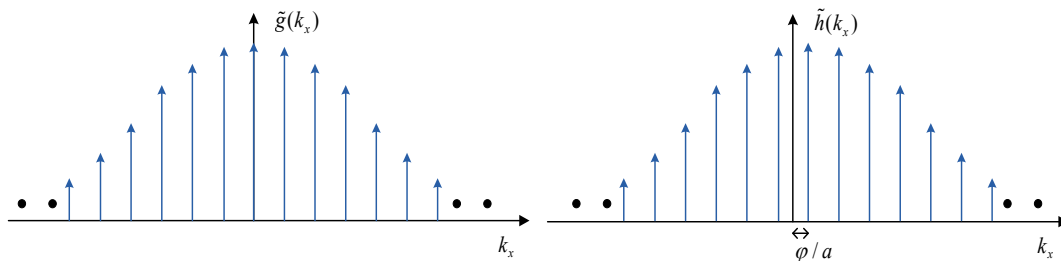
$$h(x+a) = \exp(-j\varphi)h(x) \quad (3-2)$$

در صورتی که تبدیل فوری تابع فوق را محاسبه نماییم، خواهیم داشت.

$$\tilde{h}(k_x) = \frac{2\pi}{a} \tilde{f}(k_x) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(k_x - \frac{2n\pi}{a} - \frac{\varphi}{a}\right) \quad (4-2)$$

$$h(x) = \frac{2\pi}{a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{f}\left(\frac{2n\pi + \varphi}{a}\right) \exp\left(-\frac{j(2n\pi + \varphi)x}{a}\right)$$

همان‌طور که در عبارت فوق دیده می‌شود، نمایش فوق برای تابع $h(x)$ همانند نمایش سری فوری است. با این تفاوت که طیف تابع، متناسب با تغییر فاز اعمال شده به میزان φ/a جابجا شده است. در شکل زیر این مسئله نشان داده شده است.



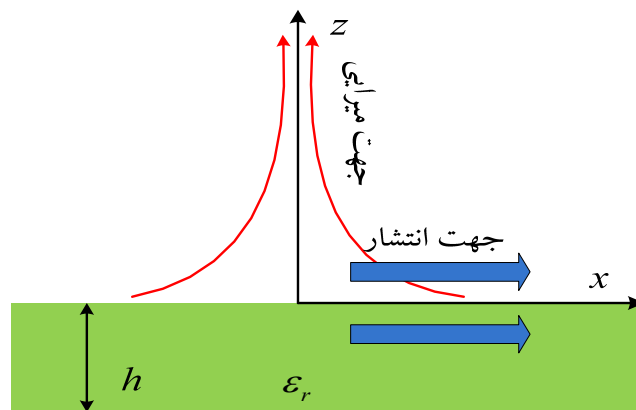
شکل (۲-۱): نمودار طیف فوری یک تابع دلخواه و طیف جابجا شده به میزان یک جابجایی فاز ثابت

به نمایش (۲-۴) برای تابع h ، نمایش سری فلوکه تابع h می‌گویند [۴۱-۴۰]. هر جمله سری (۲-۴) برای تابع $h(x)$ ، یک مد فلوکه نامیده می‌شود. در صورتی که در یک آرایه نامحدود یکنواخت از عناصر جریان، تحریک

عناصر یکسان بوده و فاز هر عنصر با عنصر مجاور اختلاف ثابتی داشته باشد، می توان از این نمایش به عنوان نمایش جریان کل ساختار بهره جست. در این صورت جریان آرایه را می توان یک سری نامحدود دانست که فاز هر جمله از آن، فاز اعمالی به یک عنصر جریان به همراه فاز ناشی از فاصله گذاری بین عناصر بوده و دامنه آن نیز متناسب با مقدار تبدیل فوریه توزیع جریان عناصر (که برای عناصر مختلف آرایه یکسان فرض می شود)، در محل همان عنصر (در حوزه مکان یا عدد موج) می باشد (همانند رابطه ۲-۱۱). در صورت در نظر گرفتن چنین جریانی برای ساختار، شکل کلی میدان ها نیز به صورت یک سری فلوکه نامحدود خواهد بود. لازم به ذکر است که برخلاف مد های منتشر شونده در یک ساختار هدایت کننده موج، (همانند یک موجبر مستطیلی) یک مد خاص فلوکه به تنهایی شرایط مرزی را برآورده نکرده و مجموعه تمام مد های فلوکه در کنار یکدیگر شرایط مرزی را برآورده می کنند.

۲-۲-۲ بررسی انتشار امواج سطحی در لایه عایق ساختار های مسطح

ساختارهای مسطح شامل یک یا چند لایه عایق، قابلیت هدایت موج را در مرز بین لایه ها دارند. در این ساختارها، در مرز بین لایه ها یک موج سطحی در جهت گسترش لایه، منتشر می شود این موج در راستای عمود بر سطح به صورت نمایی میرا می گردد. دلیل ایجاد این امواج در مرز لایه ها را می توان تفاوت ثابت گذردهی نسبی لایه های دو طرف مرز دانست. در واقع لزوم برآورده شدن شرط مرزی در مرز دولایه، انتشار این امواج را تضمین می نماید.



شکل (۲-۲): انتشار امواج سطحی در مرز بین عایق و هوا. موج در جهت Z میرا شده و در جهت ρ در طول لایه منتشر می شود. مطالعه این امواج و اثر آنها در آنتن های میکرواستریپ به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۴۹-۴۲]. به طور کلی می توان گفت که وجود این امواج در یک آرایه از آنتن های میکرو استریپ، علاوه بر افزایش تزویج عناصر و کاهش بهره آرایه، اثرات نامطلوبی بر نماد تشعشی آرایه دارد [۴۶-۴۹]. در مقالات متعدد روش هایی برای کاهش و یا حذف انتشار این امواج در آنتن های میکرواستریپ ارائه شده است. انتشار این امواج در آنتن های آرایه ای مسطح، باعث رخ دادن پدیده کوری آرایه فازی می گردد. در بخش های بعد شرایط رخ دادن کوری آرایه را با توجه به انتشار این امواج در لایه عایق بررسی خواهند شد.

۲-۳ بررسی دلایل کور شدن آرایه های مدار چاپی

در واقع علت این پدیده را می توان به این صورت بیان کرد که هر گاه ثابت انتشار موج تحریک شده توسط آنتن آرایه فازی (که بردار انتشار مربوطه می تواند بسته به اختلاف فاز عناصر، جهت دلخواهی داشته باشد) با ثابت انتشار موج پشتیبانی شده توسط ساختار یکی شود، این پدیده رخ می دهد [۲۰]. در صورت رخ دادن چنین حالتی مدهای هدایت شونده در داخل لایه عایق به شدت تحریک شده و تمام توان ورودی آنتن آرایه فازی به داخل لایه عایق هدایت و منتشر شده و هیچ توانی از آنتن تشعشع نمی شود. برای تعیین ثابت انتشار امواج سطحی منتشر شده در لایه عایق، باید اثرات بارگذاری عناصر آرایه آنتن نیز در نظر گرفته شود. هر چند که در اکثر موارد بررسی جداگانه لایه عایق، نتایج قابل قبولی را در مورد ثابت های انتشار امواج سطحی با مدهای مختلف بدست می دهد. به طور کلی می توان دلایل ایجاد کور شدن آرایه را به صورت زیر دسته بندی کرد: [۲۰]

- ۱- ثابت انتشار مد تحریک شده توسط آنتن آرایه فازی با ثابت انتشار مد پشتیبانی شده توسط لایه های عایق برابر شود. ابعاد شبکه آرایه فازی نیز باید به گونه ای باشد که اتفاق فوق، برای ثابت انتشار وابسته به شبکه و تغییر فاز عناصر در جهت های X و Y، در صفحه حقیقی رخ دهد.
- ۲- امواج سطحی اشاره شده در شرط اول با مقادیر صفر ثابت های انتشار در جهت های عرضی (k_x و k_y)، خنثی نشوند

باید توجه نمود که با در نظر گرفتن نحوه تزویج تغذیه آرایه با ساختار هدایت کننده موج، در زاویه ای که این پدیده رخ می دهد می توان حالات افزایش نامحدود ولتاژ، صفر شدن ولتاژ تغذیه (اتصال کوتاه) و ایجاد ۹۰ درجه اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان را برای عدم تشعشع توان ورودی آرایه در نظر گرفت که به ترتیب به امپدانس ورودی بی نهایت، صفر و کاملاً راکتیو برای آرایه خواهیم رسید. در حالت آخر امپدانس ورودی آرایه یک بخش حقیقی کوچک و بخش موهومی بسیار بزرگ خواهد داشت و در واقع تمام انرژی ورودی به داخل لایه هدایت می شود.

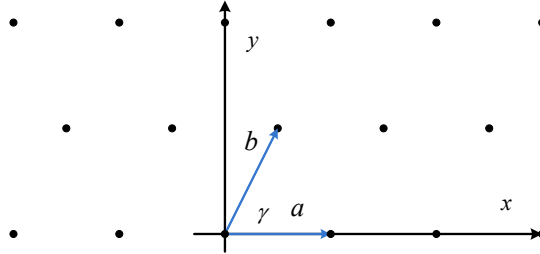
برای درک این پدیده و روش پیش بینی زاویه کور می توان از نمودارهای مربوط به ثابت های انتشار و نمودار گلبیرگ های گریتنینگ^۱ آرایه استفاده کرد که در زیر به آن اشاره می شود [۴۱، ۲۰]. از این نمودار می توان مشاهده نمود که در هر صفحه انتشار (برای یک زاویه سمت خاص ϕ ثابت) حد اقل یک زاویه کور خواهیم داشت که در آن اندازه ضریب انعکاس آرایه یک خواهد بود. باید توجه کرد که نموداری که برای تشریح این پدیده ارائه شده است، اثرات بارگذاری عناصر آرایه آنتن روی لایه (همانند پچ میکرواستریپ) را در نظر نمی گیرد و برای پیش بینی دقیق زاویه روبش کور آنتن آرایه ای باید از روش های تمام موج عددی استفاده کرد.

۲-۳ بررسی زاویه روبش کور آرایه بر اساس نمودار گلبیرگ های گریتنینگ آرایه

به طور کلی می توان گفت که فاز هر عنصر آرایه به دو عامل فاز اعمالی به آرایه و فاز ناشی از شبکه آرایه بستگی دارد. بخش اول فاز، تعیین کننده زاویه روبش آرایه بوده و جهت دهی بیم اصلی را بر عهده دارد و بخش دوم

¹ Grating lobes

وابسته به پارامترهای شبکه آرایه است. با در نظر گرفتن یک شبکه متناوب نامحدود و تبدیل فوریه مکانی میدان‌ها و جریان‌ها می‌توان گفت که ساختار آرایه در حوزه فرکانس، فرکانس‌های فضایی گسسته‌ای خواهد داشت که وابسته به شبکه آرایه می‌باشند.



شکل (۲-۳): پارامترهای شبکه آرایه نامحدود

پارامترهای یک شبکه آرایه با توجه به شکل (۲-۱) به صورت زیر قابل بیان می‌باشند:

$$x_{mn} = ma + \frac{nb}{\tan \gamma}, \quad y_{mn} = nb \quad (۵-۲)$$

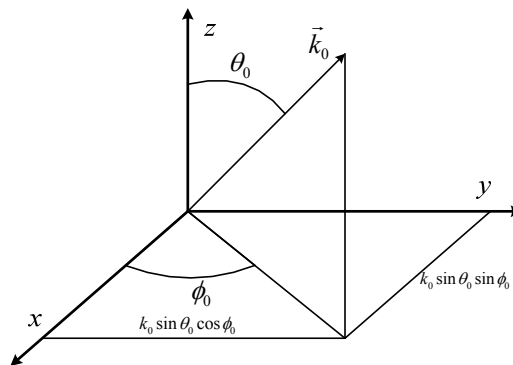
که در آن زاویه γ مربوط به شبکه غیر مستطیلی بوده و در صورتی که شبکه مستطیلی باشد این زاویه ۹۰ است. با در نظر گرفتن یک آرایه دو بعدی می‌توان در حالت کلی فرکانس‌های فضایی (و یا ثابت انتشار برای مد دلخواه) را با در نظر گرفتن تناوب شبکه و محل عنصر در آن به صورت زیر نوشت:

$$k_{xmn} = k_{x0} + \frac{2m\pi}{a} \quad k_{ymn} = k_{y0} + \frac{2m\pi}{a \tan \gamma} + \frac{2n\pi}{b} \quad (۶-۲)$$

که در آن k_{x0} و k_{y0} مؤلفه‌های عدد موج در جهت X و Y هستند که با در نظر گرفتن جهت بیم اصلی به صورت θ_0 و ϕ_0 به صورت زیر می‌باشند.

$$k_{x0} = k_0 \sin \theta_0 \cos \phi_0 \quad (۷-۲)$$

$$k_{y0} = k_0 \sin \theta_0 \sin \phi_0$$



شکل (۲-۴): بردار عدد موج و مقدار آن در راستای محورهای مختصات

برای وجود موج منتشر شونده در فضا باید اندازه بردار انتشار هر مد خاص در صفحه آرایه (k_x و k_y) کوچکتر از ثابت انتشار موج یا k_0 باشد. (به تعبیر دیگر بردار انتشار در ناحیه مرئی واقع شده باشد)

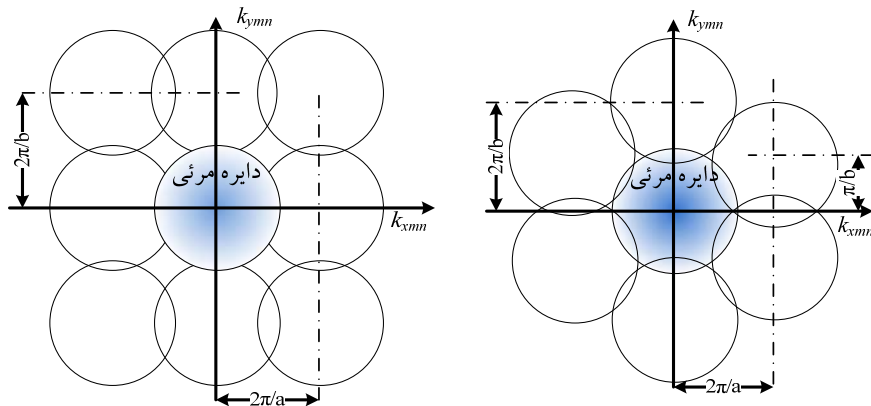
$$k_{xmn}^2 + k_{ymn}^2 \leq k_0^2 \quad (۸-۲)$$

در صورتی که ثابت انتشار هر مد خاص (m,n) در شرط فوق صدق نکند قابلیت انتشار نداشته و به صورت یک موج میرای محو شونده^۱ در جهت Z می باشد.

حال با قرار دادن روابط (۲-۲) در (۵-۲) و در نظر گرفتن شبکه مستطیلی ($\gamma=90$) خواهیم داشت:

$$\left(k_{xmn} - \frac{2m\pi}{a}\right)^2 + \left(k_{ymn} - \frac{2n\pi}{b}\right)^2 = k_0^2 \sin^2 \theta_0 \quad (9-2)$$

رابطه بالا را می توان مکان هندسی دواير با مرکزیت شبکه فرکانس های گسسته در صفحه k_x و k_y دانست. برای مد $(0,0)$ مرکز این دایره مبدا مختصات خواهد بود و شعاع آن نیز $k_0 \sin \theta$ می باشد. در صفحه k_x و k_y ، دایره مد غالب مربوط به صفحه مرئی بوده و در صورتی که دواير سایر مد ها با این دایره فصل مشترک داشته باشند، تشعشع کرده و به صورت گلبرگ های گریتنینگ، در نمودار پرتو آرایه ظاهر خواهند شد.



شکل (۵-۲): نمودار دواير مد های فلو که آرایه با شبکه مستطیلی (سمت چپ) و شبکه مثلثی (سمت راست) در صفحه k_x و k_y در شکل (۵-۲) نمودار دواير گلبرگ های گریتنینگ برای شبکه مستطیلی و مثلثی نشان داده شده است. با در نظر گرفتن این شکل می توان نتیجه گرفت که با فاصله گذاری مناسب بین عناصر شبکه آرایه می توان از ایجاد گلبرگ های گریتنینگ در آرایه جلوگیری کرد [۴۱].

۲-۴ مد های هدایت شونده در نمودار گلبرگ های گریتنینگ

همان طور که در بخش قبل اشاره شد در صورت ایجاد تزویج بین مد های هدایت شونده در لایه عایق و مد های فلوکه، پدیده کوری آرایه رخ می دهد. در این بخش به کمک دواير مد های فلوکه ساختار، شرایط ایجاد این تزویج مد ها را بررسی می کنیم. میدان امواج هدایت شونده در ساختار را می توان به صورت زیر در نظر گرفت [۴۱].

$$\vec{E}_{su} = A \exp(-j\beta_{su}^x x - j\beta_{su}^y y) \vec{f}_{su}(z) \quad (10-2)$$

ثابت های انتشار عرضی موج در طول عایق β_{su}^x و β_{su}^y بوده و رابطه زیر بین آنها و ثابت انتشار شعاعی امواج سطحی برقرار است.

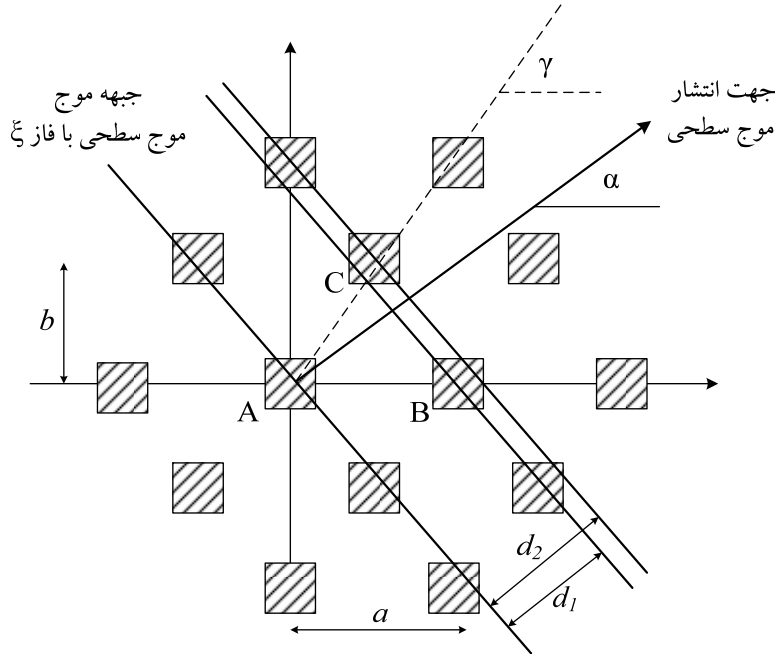
$$\beta_{su} = \sqrt{\beta_{su}^{x^2} + \beta_{su}^{y^2}} \quad (11-2)$$

صفحات فاز ثابت این امواج نیز به صورت صفحه زیر به موازات محور Z تعریف می شوند.

¹ Evanescent wave

$$x\beta_{sx}^x + y\beta_{su}^y = C \quad (12-2)$$

که در آن C ثابت دلخواه می باشد. برای بررسی شرایط ایجاد تزویج بین مد های هدایت شونده و مد های فلوکه نمودار زیر را در نظر می گیریم که در آن یک شبکه آرایه مثلثی با زاویه γ بین عناصر نشان داده شده است.



شکل (۲-۶): انتشار امواج سطحی در صفحه آرایه نامحدود با شبکه مثلثی. فاز جبهه موج امواج سطحی در مبدا مختصات ξ می باشد. فرض کنید که در زمان $t=0$ جبهه موج منتشر شده در جهت α از مبدا عبور کند. همچنین اختلاف فاز بین عنصر A و جبهه موج در نقطه A نیز ξ باشد. همچنین می دانیم که در تزویج همدوس^۱ عناصر آرایه، اختلاف فاز بین دو عنصر آرایه در طول جبهه موج منتشر شده در آرایه، مضرب صحیحی از $2\pi q$ می باشد که q یک عدد صحیح است. فرض کنید که فاز عنصر A در نقطه A صفر بوده و فاز جبهه موج امواج سطحی در این نقطه ξ باشد. براین اساس فاز جبهه موج در نقطه B برابر $\xi - \beta_{su}d_1 - 2\pi q$ می باشد که در آن d_1 فاصله عمودی بین دو جبهه موج در دو نقطه A و B بوده و q نیز یک عدد صحیح است. ψ_1 نیز فاز اعمالی به عنصر B برای جهت گیری پرتو آرایه در جهت (θ_0, ϕ_0) باشد. در این صورت خواهیم داشت.

$$\xi = \xi - \beta_{su}d_1 - 2p\pi + \psi_1 \quad (13-2)$$

به طور مشابه با عبور صفحه موج از عنصر C رابطه زیر را بین فاز جبهه موج و فاز عنصر C خواهیم داشت.

$$\xi = \xi - \beta_{su}d_2 - 2q\pi + \psi_2 \quad (14-2)$$

که در آن ψ_2 فاز عنصر C ، q یک عدد صحیح و d_2 فاصله عمودی بین جبهه های موج در نقاط A و C است. از شکل روابط زیر را برای d_1 و d_2 داریم.

$$\tan \gamma = \frac{2b}{a}, \quad d_1 = a \cos \alpha, \quad d_2 = b \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{\sin \gamma} \quad (15-2)$$

¹ Coherent Coupling

برای جهت دلخواه روبش موج (θ_0, φ_0) روابط زیر را بری ψ_1 و ψ_2 داریم.

$$\psi_1 = ak_{x0} \quad \psi_2 = \frac{bk_{x0}}{\tan \gamma} + bk_{y0} \quad (16-2)$$

که در آن k_{x0} و k_{y0} همانند رابطه (۷-۲) تعریف می شوند. در صورتی که با استفاده از روابط (۱۳-۲) الی (۱۶-۲) زاویه α را از عبارات حذف کنیم در نهایت می توان به رابطه زیر رسید.

$$\left(k_{x0} - \frac{2p\pi}{a}\right)^2 + \left(k_{y0} - \frac{2(q-p)\pi}{b}\right)^2 = \beta_{su}^2 \quad (17-2)$$

در صورتی که به کمک روابط (۷-۲) k_{x0} و k_{y0} را جایگزین کنیم، خواهیم داشت

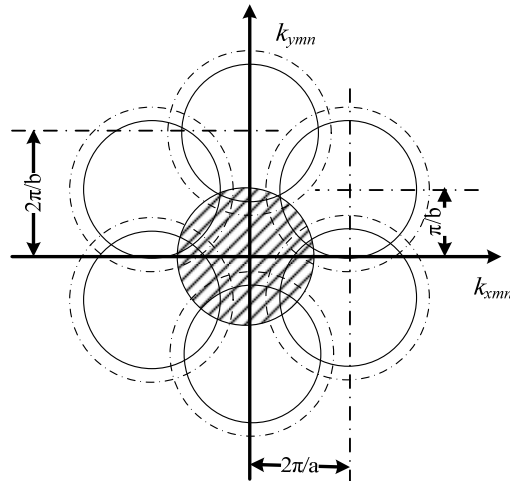
$$\left(k_{xmn} - \frac{2(p+m)\pi}{a}\right)^2 + \left(k_{ymn} - \frac{2\{(q+n)-(p+m)\}\pi}{b}\right)^2 = \beta_{su}^2 \quad (18-2)$$

که در آن p, q, m و n اعداد صحیح بوده و (m, n) مربوط به مد فلو که خاص می باشند. عبارت بالا را به صورت زیر نیز می توان بیان نمود.

$$\left(k_{xmn} - \frac{2m'\pi}{a}\right)^2 + \left(k_{ymn} - \frac{2(n'-m')\pi}{b}\right)^2 = \beta_{su}^2 \quad (19-2)$$

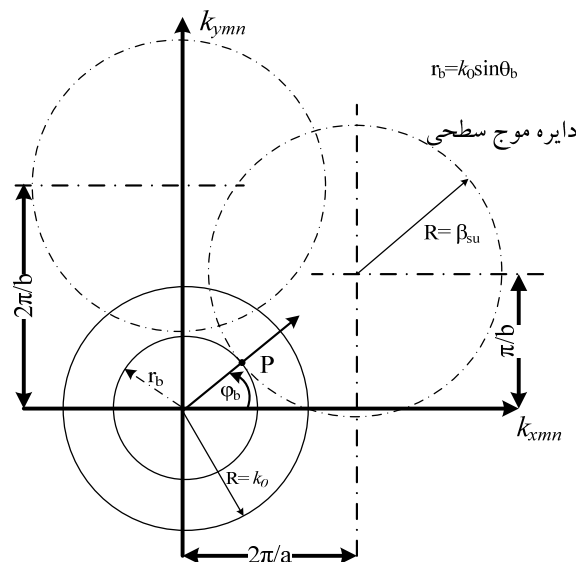
که در آن m' و n' نیز اعداد صحیح می باشند. در صورتی که در یک زاویه روبش خاص رابطه (۱۹-۲) برقرار شود، ترویج شدیدی بین توان ورودی آرایه و مد هدایت شده خاص ایجاد شده و با برانگیخته شدن امواج سطحی، تمام توان ورودی در داخل لایه منتشر می شود. در هر صفحه زاویه سمت ثابت $\varphi = cte$ برای هر زاویه θ ای که تصویر بردار عدد موج در صفحه k_x و k_y مانند شکل (۵-۲) با دایره موج سطحی تلاقی داشته باشد، پدیده کور شدن آرایه رخ می دهد.

رابطه (۱۹-۲) معرف مجموعه ای از دوایر است که مرکز آنها همانند مرکز دوایر مد های فلو که بوده و شعاع آنها ثابت انتشار امواج سطحی در یک فرکانس خاص می باشد. در شکل (۷-۲) دوایر فوق (به صورت نقطه چین) به همراه دوایر مد های فلو که رسم شده اند. به طور معمول ثابت انتشار امواج سطحی از ثابت انتشار فضای آزاد (k_0) بزرگتر می باشد. در حالیکه برخی از ساختارها توانایی انتشار امواج سطحی با ثابت انتشار کوچکتر از ثابت انتشار فضای آزاد را نیز دارا می باشند. لازم به ذکر است که ثابت انتشار امواج سطحی در هر فرکانس، از حل معادله پاشندگی ساختار بدست می آیند.



شکل (۷-۲): دایره‌های مدهای امواج هدایت شونده و مدهای فلو که آرایه، دایره‌های امواج سطحی به صورت نقطه چین نشان داده شده‌اند.

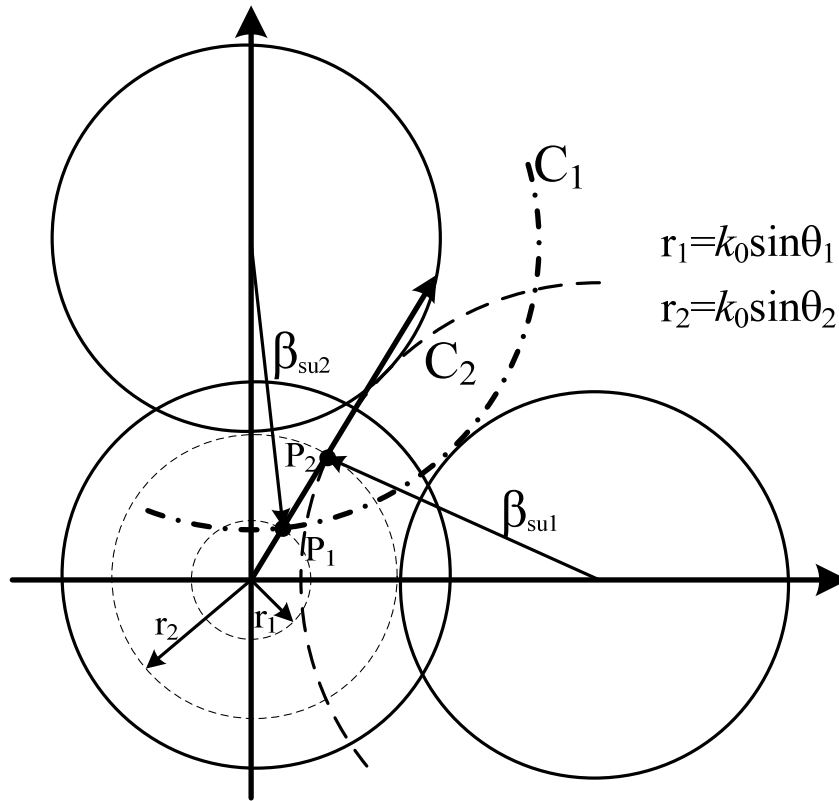
از شکل (۷-۲) می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای شبکه آرایه نه تنها بر روی شرایط ایجاد گلبرگ‌های گریته‌نگ در آرایه موثر است، بلکه در ایجاد زوایای کور و تعیین مکان آنها در صفحه مرئی نیز نقش بسزایی دارد. زیرا پارامترهای شبکه، دایره‌های مربوط به ثابت‌های انتشار امواج سطحی را نیز تعیین می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با انتخاب مناسب پارامترهای شبکه نیز می‌توان تا حدودی محل زاویه روبش کور را کنترل کرد. در واقع هر چه شبکه آرایه فشرده‌تر بوده و فاصله عناصر کمتر باشد، شبکه آرایه در فضای عدد موج بازتر بوده و امکان تلاقی دایره‌های امواج سطحی با دایره مرئی کمتر خواهد بود. هر چند در این حالت توزیع بین عناصر آرایه بیشتر بوده و این مسئله مشکلات دیگری را برای آرایه به همراه خواهد داشت. در بخش‌های بعدی به طور دقیق‌تر این مسئله را بررسی خواهیم نمود.



شکل (۸-۲): زاویه کور آرایه در ارتباط با دایره‌های مدهای غالب آرایه و دایره‌های امواج صفحه‌ای

شکل (۸-۲) شرایط ایجاد زاویه کور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵-۲) مشاهده می‌شود در صفحه k_x و k_y برای $\theta = \theta_b$ و $\varphi = \varphi_b$ در نقطه P بردار عدد موج با دایره مدهای سطحی خاص تلاقی داشته و

بنابراین در این جهت خاص، زاویه کور خواهیم داشت. البته همان طور که در شکل (۲-۹) نشان داده شده است، با بزرگ تر شدن زاویه روبش، شعاع دایره مرئی ($k_0 \sin \theta_0$) بزرگتر شده و ممکن است در برخی از صفحات φ ثابت، چند زاویه روبش کور داشته باشیم.



شکل (۲-۹): وقوع چند زاویه روبش کور با تغییر زاویه روبش آرایه.

در شکل (۲-۶) در زاویه روبش θ_1 و در نقطه P_1 به دلیل تلاقی دایره مرئی با دایره C_1 یک زاویه کور مشاهده می‌شود و در زاویه روبش θ_2 و در نقطه P_2 به دلیل تلاقی دایره مرئی با دایره C_2 یک زاویه کور دیگر مشاهده می‌گردد.

هر چند روش بالا برای تعیین زاویه روبش کور آنتن آرایه ای دید فیزیکی خوبی به ما در مورد نحوه ایجاد زاویه کور و ارتباط آن با پارامترهای آرایه و لایه عایق ساختار می‌دهد ولی از دقت کافی برای پیش بینی زاویه کور در آرایه‌های واقعی برخوردار نبوده و در عمل همان طور که قبلاً اشاره شد باید از روش‌های دقیق‌تر عددی بهره گرفت. البته برای آرایه آنتن‌های میکرواستریپ، روابط مربوط به امواج صفحه‌ای پشتیبانی شده توسط ساختار که از قطب‌های تابع گرین ساختار بدست می‌آیند [۲۰]، دقت قابل قبولی را برای کاربرد‌های عملی ارائه می‌کنند.

در بخش‌های قبل به بررسی کلی پدیده کور شدن آرایه بر اساس تزویج میدان‌های منتشر شونده و هدایت کننده ساختار پرداختیم. در بخش بعدی به کمک بسط میدان‌ها بر حسب مدهای فلوکه و محاسبه امپدانس فلوکه آرایه، پدیده کور شدن آرایه را مشاهده خواهیم کرد و خواهیم دید که این پدیده چگونه به ساختار هدایت کننده (عایق با صفحه زمین) مربوط می‌گردد.