بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شاهد

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات-گرایش میدان

عنوان پایان‌نامه

طراحی و ساخت رتمن‌لنز پهن‌باند

استاد راهنما

دکتر علیرضا ملاح‌زاده

نگارش

محمدصادق دهّانزاده

زمستان ۱۳۹۱

دانشگاه شاهد

دانشکده فنی و مهندسی

صورت جلسه هیئت داوران پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پروژه کارشناسی ارشد مربوط به آقای/خانم **محمدصادق دهانزاده** به شماره دانشجویی**۸۹۷۵۱۸۰۰۱**در رشته **مخابرات** با عنوان "**طراحی و ساخت رتمن لنز پهن باند**" به ارزش **۶ واحد** در روز **۹۱/۱۱/۳** در دانشکده فنی و مهندسی با حضور افراد ذیل تشکیل شد، نتیجه به قرار زیر است :

☐ پروژه نامبرده با نمره ۱۷٫۵ قابل قبول می‌باشد.

☐ پروژه نامبرده مردود می‌باشد.

☐ پروژه نامبرده به شرط انجام اصلاحات جزیی قابل قبول می‌باشد. نمرهٔ دانشجو متعاقباً اعلام می‌شود.

☑ نام استاد راهنمای اول	علیرضا ابوالورد	دانشگاه :		امضاء
☐ نام استاد راهنمای دوم		دانشگاه :		امضاء
☐ نام استاد مشاور اول		دانشگاه :		امضاء
☐ نام استاد مشاور دوم		دانشگاه :		امضاء
☑ نام داور اول	غلامرضا کرمزاده	دانشگاه :	شاهد	امضاء
☑ نام داور دوم	حمیدرضا فنی	دانشگاه :	شاهد	امضاء
☐ نام داور سوم		دانشگاه :		امضاء
☐ نام داور چهارم		دانشگاه :		امضاء
☑ نام نماینده معاونت پژوهشی	محسن جلالی			امضاء

سهم استاد (به درصد):

سهم استاد (به درصد):

سهم استاد (به درصد):

سهم استاد (به درصد):

تذکر:تعیین سهم اساتید در صورت وجود بیش از یک استاد راهنما و مشاور ضروری است.

	اظهار نامه دانشجو	شماره: تاریخ:

اینجانب محمدصادق دهقانزاده دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مخابرات گرایش میدان دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شاهد، گواهی می دهم که پایان نامه تدوین شده حاضر با عنوان " طراحی و ساخت رتمن‌لنز پهن‌باند" به راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکترعلیرضا ملاح‌زاده، توسط شخص اینجانب انجام و صحت و اصالت مطالب تدوین شده در آن، مورد تأیید است و چنان‌چه هرزمان، دانشگاه کسب اطلاع کند که گزارش پایان نامه حاضر صحت و اصالت لازم را نداشته، دانشگاه حق دارد مدرک تحصیلی اینجانب را مسترد و ابطال نماید. همچنین اعلام می دارد در صورت بهره گیری از منابع مختلف شامل گزارش های تحقیقاتی، رساله، پایان نامه، کتاب، مقالات تخصصی و غیره، به منبع مورد استفاده و پدید آورنده آن به طور دقیق ارجاع داده شده و نیز مطالب مندرج در پایان نامه حاضر تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب و یا سایر افراد به هیچ‌کجا ارائه نشده است و نهایتاً این‌که، کلیه حقوق مادی ناشی از گزارش پایان نامه حاضر، متعلق به دانشگاه شاهد می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو:

امضاء دانشجو:

تاریخ:

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

با تشکر فراوان از راهنمایی‌های استاد گرامی ، جناب آقای دکتر ملاح‌زاده و همچنین دکتر پیرهادی، مهندس علیپور و تمامی بزرگوارانی که اینجانب را از راهنمایی‌های بی‌دریغ خود بهره-مند نمودند.

چکیده

آرایه فازی به منظور هدایت بیم در راستایی خاص نیازمند شبکه تغذیه ویژه‌ای می‌باشد. رتمن‌لنز به عنوان یکی از این ساختارهای تغذیه با قابلیت تحریک چند بیم در زوایای متفاوت در یک‌زمان، استفاده گسترده‌ای پیدا کرده‌است. در این پژوهش مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پهنای باند این شبکه در ساختار مایکرواستریپ، که شبکه تطبیق امپدانس، رفتار انتشاری موج در بخش صفحات موازی و خطای فاز خطوط انتقال می‌باشند، بررسی شده و سعی شده است تا این عوامل در جهت افزایش پهنای باند بهینه شوند. در این راستا به شناخت رفتار امپدانسی بخش صفحات موازی و عوامل همگرایی آن با خط مایکرواستریپ پرداخته شده است. براین اساس تغییر پهنای خط در محل اتصال به صفحات موازی و تغییر ثابت دی-الکتریک به ترتیب بیشترین نقش را در این همگرایی دارند. همچنین مشخصات شبکه تطبیق امپدانس مناسب به منظور کاهش خطای فاز ناشی از انتشار موج در بخش صفحات موازی با بررسی عوامل مختلف بدست آمدند. براساس نتایج بدست آمده، کاهش پهنای خط در محل اتصال به صفحات موازی و کاهش ارتفاع فیبر می‌تواند به کاهش خطای فاز منجر شود. همچنین با بررسی تیپرینگ‌های نمایی، یکنواخت و کلوفنشتاین مشخص گردید تیپرینگ نمایی بیشترین خطای فاز را ایجاد می‌کند. نکته دیگر اینکه در صورتی که طول خط تیپر شده نسبت به پهنای خط در محل اتصال به صفحات موازی خیلی بیشتر باشد، نوع تیپرینگ تأثیر زیادی در توان بازگشتی ندارد. همچنین با توجه به تغییر ثابت دی‌الکتریک مؤثر با تغییر فرکانس و نیز ایجاد خاصیت سلفی و خازنی در محل خم‌خوردگی خطوط انتقال، به منظور کاهش خطای فاز بهتر است این خطوط برای فرکانس مرکزی باند مورد نظر بهینه شوند.

کلیدواژه: رتمن‌لنز، بیم‌پورت، پورت آرایه ، پورت جاذب

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل۱) انواع روش‌های ایجاد چند بیم همزمان در آرایه فازی و هدف پایان نامه.....۱

مقدمه.....۲

۱-۱) روش دیجیتالی.....۴

۱-۲)روش مداری یا شبکه ای.....۵

۱-۲-۱) ماتریس باتلر.....۵

۱-۲-۲) ماتریس بلس.....۶

۱-۲-۳) ماتریس نلن.....۷

۱-۳) هدایت بیم با استفاده از لنز.....۷

۱-۴) هدف وساختار پایان‌نامه.....۱۰

فصل ۲) طراحی رتمن‌لنز.....۱۲

۲-۱)تعیین محل پورت‌ها و مشخصات خطوط انتقال.....۱۳

۲-۱-۱) اثر پارامتر α ۱۷

۲-۱-۲) اثر پارامتر g ۱۸

۲-۱-۳) اثر پارامتر F ۱۸

۲-۱-۴) اثر پارامتر W_0.....۱۹

۲-۱-۵) اثر پارامتر ε_r.....۱۹

۲-۲) بیم‌پورت‌های غیرکانونی.....۱۹

۲-۲-۱) اثر پارامتر g و نسبت G/D ۲۰

۲-۲-۲) اثر گریز از مرکز بیضی.....۲۲

۲-۳) نتیجه‌گیری..... ۲۳

فصل ۳) ملاحظات الکترومغناطیسی در طراحی رتمن‌لنز..... ۲۴

۳-۱) صفحات موازی..... ۲۵

۳-۲) تطبیق امپدانس خطوط انتقال با صفحات موازی..... ۲۵

۳-۲-۱) رفتار امپدانسی صفحات موازی..... ۲۵

۳-۲-۲) تطبیق امپدانس..... ۳۰

۳-۳) انتشار موج در بخش صفحات موازی..... ۳۲

۳-۴) انعکاسات داخلی در بخش صفحات موازی..... ۳۵

۳-۵) تیپرینگ دامنه توان در آرایه..... ۳۷

۳-۶) خطای فاز ناشی از تغییر ε_{eff} با تغییر فرکانس..... ۳۹

۳-۷) نتیجه‌گیری..... ۳۹

فصل۴) لنز طراحی شده..... ۴۰

۴-۱) طراحی در نرم‌افزار MATLAB ۴۱

۴-۲) شبیه‌سازی در نرم‌افزار HFSS ۴۲

فصل۵) جمع‌بندی و پیشنهاد..... ۵۱

۵-۱) نوآوری..... ۵۲

۵-۲) پیشنهاد..... ۵۲

ضمائم..... ۵۳

ضمیمه الف) برنامه تولید پارامترهای لنز..... ۵۴

ضمیمه ب) برنامه محاسبه ضریب آرایه..... ۶۰

فهرست مراجع..... ۶۲

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی..... ۶۶

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی..... ۶۷

فصل اول

انواع روش‌های ایجاد چند بیم همزمان در آرایه فازی

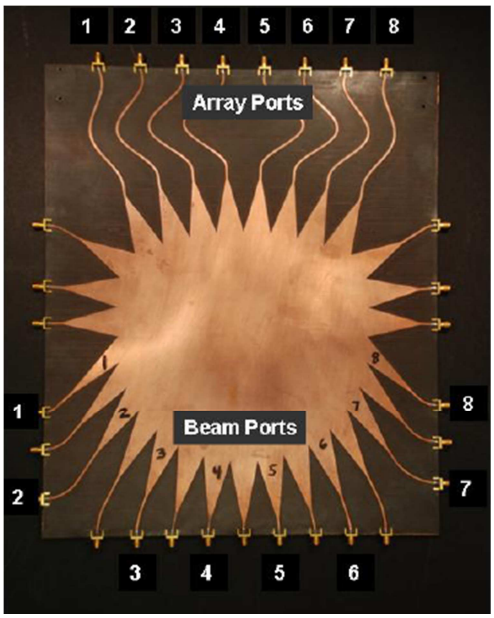
و هدف پایان نامه

مقدمه

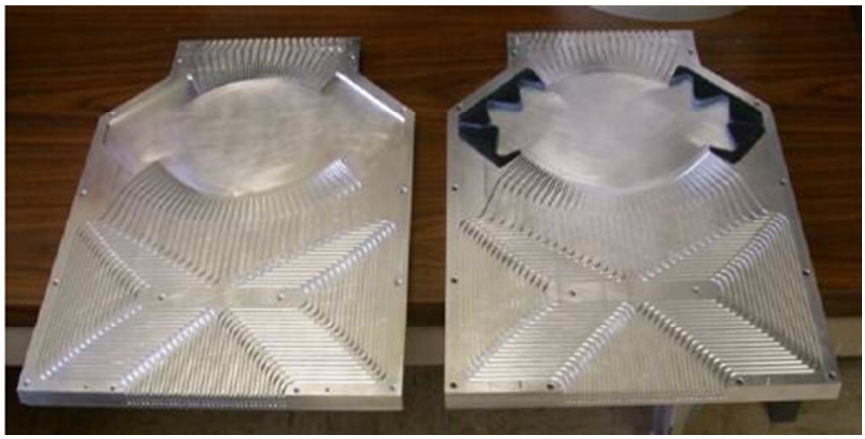
آرایه‌های فازی سال‌هاست به عنوان یکی از عناصر مهم سیستم‌های مخابراتی اعم از ارسال و دریافت داده و یا کاربردهای راداری مطرح شده‌اند. با توجه به این‌که این ساختارها متشکل از چند آنتن با چیدمان خاص بوده و برای هدایت بیم در راستایی خاص نیازمند تحریک با فاز مشخص می‌باشند ساختارهای ویژه‌ای را به عنوان شبکه تغذیه نیاز دارند. در این میان نیاز به اسکن یک قطاع فضایی بزرگ با تفکیک‌پذیری و یا بهره[1] بالا، آرایه فازی با چند بیم همزمان را مطرح کرده و به شبکه‌های تغذیه آرایه فازی که این امکان را فراهم می‌آورند اهمیت ویژه‌ای داده‌است. این ساختارها به سه دسته دیجیتالی، مداری و تابشی (با استفاده از لنز) قابل تفکیک هستند[۱]. در میان این سه دسته نوع سوم آن یعنی استفاده از لنز به دلیل طراحی و ساخت با هزینه کمتر و همچنین پهنای باند بالا برجستگی ویژه‌ای دارد. این دسته از لنزها از سال ۱۹۵۰ میلادی که توسط روز[2] مطرح شدند تا امروز روند تکاملی خود را پیموده‌اند و امروزه نوعی از این لنزها که با نام رتمن لنز[3][۲] شناخته می‌شود استفاده وسیعی در آرایه‌های فازی پیدا کرده است و تحقیقات فراوانی بر روی آن انجام شده است. به عنوان مثال [۱] و [۳] دو رساله دکتری می‌باشند که بر روی این ساختار مطالعه کرده‌اند و به عنوان مرجع درباره این ساختار بسیار مفید هستند. از مزایای رتمن‌لنز می‌توان به قابلیت پیاده سازی در ساختارهای موجبری[4][۴] ، مایکرواستریپ[5][۵-۷] ، موجبر مجتمع‌شده سطحی[6] [۸-۹] ، دی‌الکتریک چند لایه[7] [۱۰-۱۱] و با استفاده از امواج سطحی[8][۱۲] و همچنین قابلیت طراحی برای فرکانس‌های پایین [۱۳] تا موج میلیمتری[۱۴-۱۶] اشاره نمود. از سوی

[1] Gain
[2] Ruze
[3] Rotman lens
[4] Waveguide
[5] Microstrip
[6] SIW
[7] Slab dielectric
[8] Surface wave

دیگر ضعف برجسته این ساختار راندمان پایین آن می‌باشد. راندمان این ساختار، نوعاً بین ۱۰ تا ۴۰ درصد می‌باشد[۱۸-۱۷]. این امر سبب می‌شود تا در سیستم‌های ارسال این ساختار در قسمت توان پایین[1] و قبل از تقویت کننده اصلی و در سیستم‌های دریافت، بعد از تقویت کننده کم نویز[2] نصب گردد.



شکل ۱-۱: رتمن‌لنز در ساختار مایکرواستریپ-شماره‌ها، پورت‌های خروجی و ورودی را نشان می‌دهند[۱۹].



شکل ۱-۲ : رتمن‌لنز در ساختار موجبری[۱۹]

[1] Low power
[2] LNA

در ادامه این فصل به معرفی انواع روش‌های ایجاد چند بیم همزمان در آرایه فازی پرداخته خواهدشد. مرجع [۲۰] مروری بر انواع این روش‌ها ارائه نموده است. همانطور که پیش از این اشاره گردید این روش‌ها به سه دسته کلی قابل تقسیم هستند:

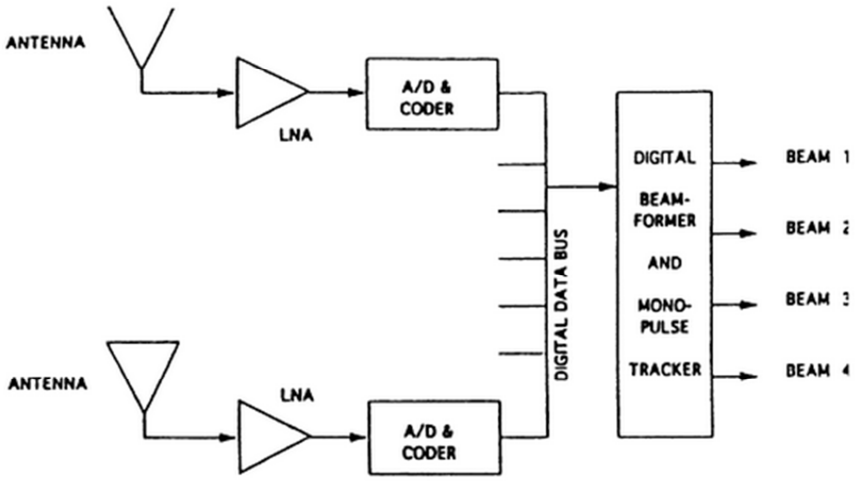
۱) روش دیجیتالی
۲) روش مداری یا شبکه‌ای
۳) با استفاده از لنز

۱-۱) روش دیجیتالی

این روش برای سیستم‌های دریافت، آسان‌ترین شیوه می‌باشد[۲۱]. در این روش سیگنال دریافتی از هر آنتن ابتدا تقویت شده ، سپس در صورت لزوم با ضرب‌کننده فرکانسی[1] به فرکانس پایین‌تر منتقل شده و آنگاه توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال به داده دیجیتال تبدیل می‌شود و پس از کد شدن (در صورت لزوم) به یک پردازشگر منتقل شده که در آن دامنه و فاز سیگنال مربوط به هر آنتن کنترل می‌شود. شکل ۱-۱ این مراحل را نشان می‌دهد. از مزایای این روش می‌توان به کنترل دامنه و فاز با خطای صفر ، تیپرینگ دلخواه دامنه و قابلیت طراحی گام‌های بسیار کوتاه در چرخش بیم اشاره نمود[۱]. همچنین با توجه به این-که سیگنال به دیجیتال تبدیل شده است الگوریتم‌های لازم را می‌توان در پردازشگر بر روی آن اعمال نمود، به عنوان مثال انجام اعمال ریاضی مورد نظر در رهگیری منوپالس[2][۲۲] و یا انجام پردازش‌های لازم برای تشخیص نوع هدف در سیستم‌های راداری[۲۱]. قابل ذکر است که ایجاد شیفت فاز در سیگنال به دو روش در پردازشگر انجام می‌شود[۲۲]:

۱) در حوزه زمان: در این روش به مقدار تعیین شده سیگنال دچار تأخیر می‌شود. مزیت این روش استقلال از فرکانس می‌باشد.
۲) در حوزه فرکانس: در این روش ابتدا تبدیل فوریه بر روی دیتا انجام شده و سپس به مقدار لازم شیفت فاز اعمال میگردد.

[1] Mixer
[2] Monopulse tracking



شکل۱-۳: هدایت بیم با استفاده از روش دیجیتالی[۲۱]

محدودیت عمده هدایت بیم توسط روش دیجیتالی مربوط به سرعت مبدل آنالوگ به دیجیتال و پردازشگر می‌باشد. زیرا دریافت سیگنال از آنتن‌ها و تبدیل به دیجیتال و پردازش آن باید همزمان انجام شود. این محدودیت حداکثر فرکانس کاری را برای سیستم‌هایی که با این روش طراحی می‌شوند، محدود می‌نماید.

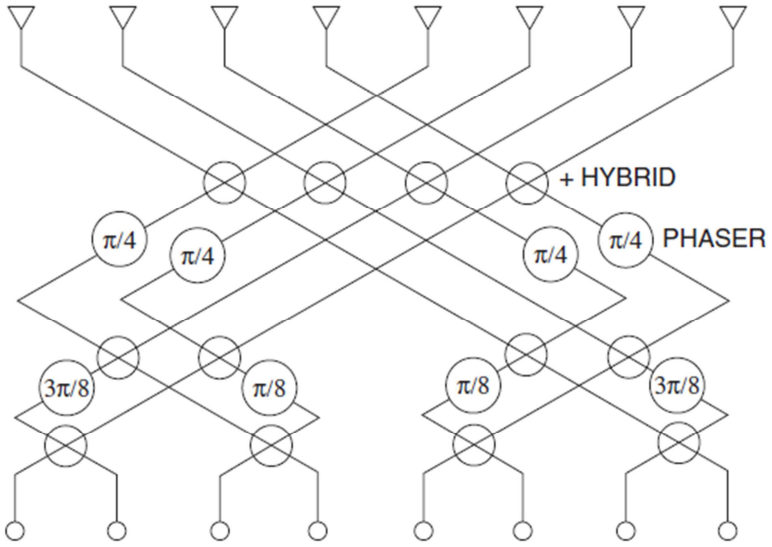
۱-۲) روش مداری یا شبکه‌ای

در این روش با استفاده از شیفت دهنده‌های فاز و یا خطوط انتقال و همچنین کوپلرهای جهتی[۱] شبکه‌ای ایجاد می‌گردد که شیفت فاز لازم بین آنتن‌ها را ایجاد می‌کند. این شبکه‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱) ماتریس باتلر[۲]
۲) ماتریس بلس[۳]
۳) ماتریس نلن[۴]

۱-۲-۱) ماتریس باتلر: در این شبکه که یک نمونه از آن در شکل ۱-۲ نشان داده شده است توان اِعمال شده به هریک از ورودی‌ها (بیم‌پورت‌ها) توسط کوپلر جهتی تقسیم و با گذر از شیفت دهنده‌های فاز به مقدار لازم شیفت فاز پیدا کرده، سپس قبل از ورود به آنتن مجدداً ترکیب می‌شوند. این ساختار قابل پیاده-سازی با

[1] Directional coupler
[2] Butler matrix
[3] Blass matrix
[4] Nolen matrix

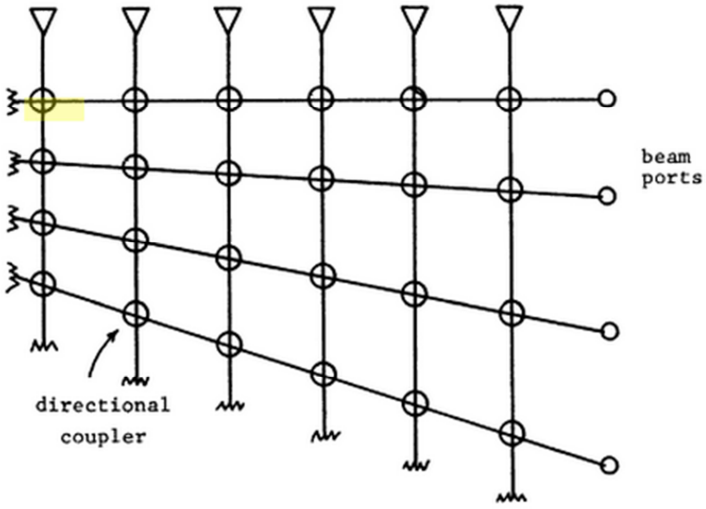


شکل۱-۴ : طرح کلی ماتریس باتلر[۲۲]

استفاده از روش مدار چاپی می‌باشد ولی با توجه به تقاطع خطوط انتقال استفاده از مدارهای چند لایه اجتناب‌ناپذیر است. همچنین این ساختار پهنای باند کمی داشته و با تغییر فرکانس بیم چرخش پیدا می-کند ، هرچندکه اگر شیفت دهنده‌های فاز به صورت تأخیر زمانی باشند پهنای باند آن افزایش می‌یابد[۲۲]. نمونه‌ای از طراحی این ساختار را می‌توان در [۲۳] یافت.

۱-۲-۲) ماتریس بلس: در این روش که توسط بلس عنوان گردید[۲۴] و ساختار آن در شکل۱-۳ نشان داده شده است، شیفت فاز لازم توسط اختلاف طول خطوط انتقال به وجود می‌آید و توان در محل‌های لازم توسط کوپلر جهتی تقسیم می‌گردد. از مزایای این روش قابلیت پیاده‌سازی آن با استفاده از فیبر مدار چاپی تک لایه و از معایب آن پهنای باند کم و چرخش بیم با تغییر فرکانس می‌باشد هرچندکه طرح اصلاح شده با استفاده از تأخیر زمانی دارای پهنای باند بیشتری است[۲۰]. همچنین از دیگر معایب این ساختار تحریک آنتن‌ها با استفاده از مسیر بیم‌پورت یک در هنگامی است که بیم‌پورت دو تحریک می‌شود زیرا کوپلرهای جهتی در هنگام تقسیم توان ، بخشی از آن را به سمت مسیر تحریک آنتن‌ها از بیم پورت یک گسیل می‌دارند[۲۰]. همین وضعیت در هنگام تحریک بیم‌پورت سه ایجاد می‌شود ولی این بار سیگنال‌های مزاحم از طریق مسیر بیم‌پورت یک و دو به آنتن‌ها می‌رسند. این پدیده خطای فاز و سطح گلبرگ کناری[1] را افزایش می‌دهد.

[1] SLL



شکل۱-۵ : ماتریس بلس[۲۱]

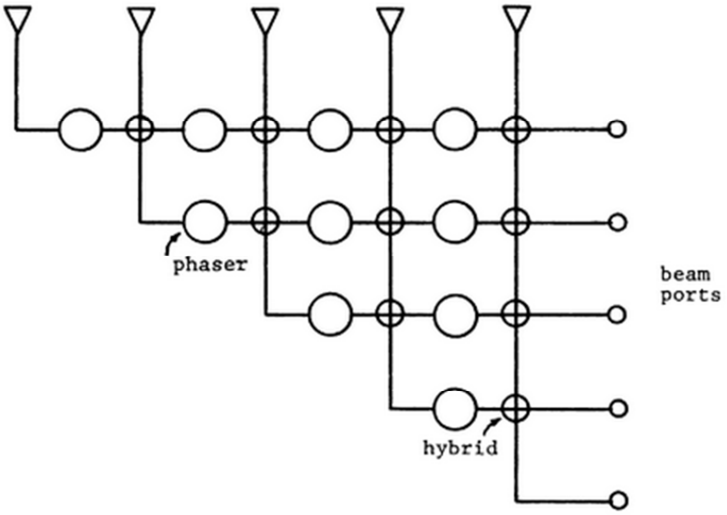
۱-۲-۳) ماتریس نلن : این ساختار که طرح آن در شکل۱-۴ نشان داده شده است، اصلاح‌شده طرح ماتریس بلس و باتلر است[۱] و اصول عملکردی آن همچون ماتریس بلس می‌باشد.

۱-۳) هدایت بیم با استفاده از لنز

از دیگر روش‌های تحریک بیم مورد نظر در آرایه فازی استفاده از لنز می‌باشد. در این بخش به بررسی این ساختارها که استفاده گسترده‌ای در آرایه‌های فازی پیدا کرده‌اند خواهیم پراخت. شکل کلی چنین ساختارهایی در شکل۱-۵ ارائه گردیده است. از جمله مزایای این ساختار قابلیت پیاده‌سازی بر روی فیبر مدار چاپی با استفاده از یک لایه و همچنین پهنای باند زیاد است که به علت ایجاد شیفت فاز به وسیله تأخیر زمانی می‌باشد.

تاریخچه مختصری از روند تکامل این لنزها در مرجع[۱] فراهم آمده است. نخستین گام در طراحی لنزهای مفید برای تحریک آرایه فازی به سال ۱۹۵۰ با ابداع لنز روز[1] برمی‌گردد. طرح کلی این لنز در شکل۱-۶ نشان داده شده است. دراین لنز موج دریافتی از هر آنتن از یک خط انتقال با طول مشخص گذر

[1] Ruze lens

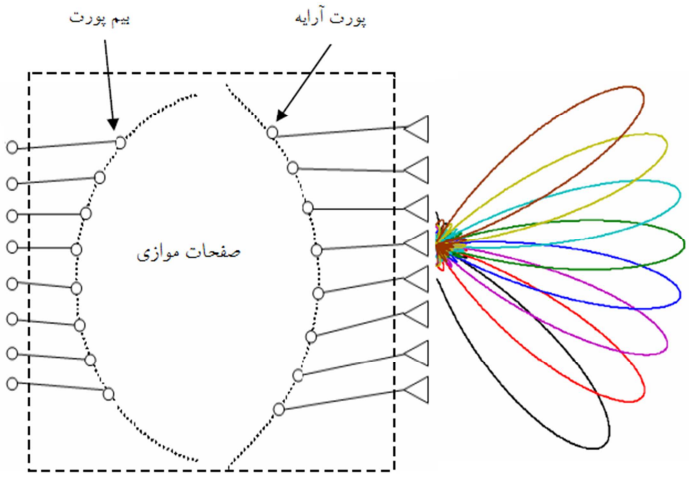


شکل۱-۶ : ماتریس نلن[۲۱]

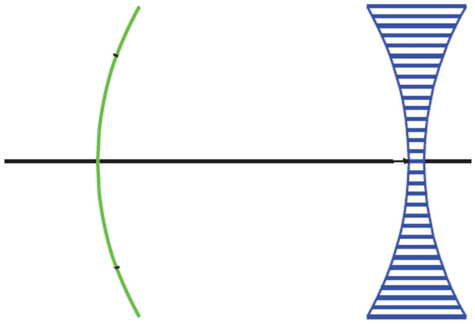
داده شده و سپس از طریق تابش در محیط صفحات موازی[۱] به محلی می‌رسد که از آن به عنوان بیم‌پورت یاد می‌کنیم. بیم‌پورت محل تجمیع توان همه آنتن‌ها می‌باشد. در هنگام فرستندگی تحریک ساختار از یک بیم پورت خاص منجر به هدایت بیم در زاویه‌ای خاص می‌گردد. محل بیم‌پورت‌ها، طول و نقاط ابتدایی و انتهایی خط انتقال متصل شده به هر آنتن جهت بیم آرایه فازی را مشخص می‌کند زیرا تفاوت طول مسیر طی شده توسط امواج از آنتن‌ها تا محل بیم‌پورت مشخص می‌باشد.

در سال ۱۹۵۷ نمونه تکمیل‌یافته‌ای از این خانواده توسط جنت[۲] به جوامع علمی عرضه گردید که به دلیل شکل ظاهری آن به لنز بند پوتینی[۳] مشهور گردید. طرح کلی این لنز در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. نمونه‌ای از طراحی این لنز را می‌توان در [۲۶-۲۵] یافت. در سال ۱۹۶۲ رتمن[۴] و تونر[۵] با بهینه‌سازی لنز روز لنزی را طراحی نمودند که از نظر خطای فاز و درجات آزادی در طراحی بسیار بهتر از لنزهای قبلی بود. این لنز هرچند که برای آرایه فازی خطی طراحی گردید اما قابل اصلاح برای آرایه‌های غیرخطی نیز می-باشد[۲۰]. این نوع لنز که طرح آن در شکل ۱-۸ نشان داده شده است به رتمن‌لنز شهرت یافت و امروزه در آرایه‌های فازی استفاده گسترده‌ای دارد. این لنز دارای سه بیم‌پورت با خطای فاز صفر می‌باشد، بدین معنی که اگر از این سه نقطه تحریک صورت گیرد اختلاف فاز بین آنتن‌ها بدون خطا می‌باشد. این سه پورت با نام بیم‌پورت کانونی شناخته می‌شوند. یکی از بیم پورت‌های کانونی مربوط به بیم مستقیم و زاویه بیم دوتای

[1] Parallel plate
[2] Gent
[3] Bootlace lens
[4] Rotman
[5] Tuner



شکل۱-۷ : طرح کلی لنز برای هدایت بیم آرایه فازی



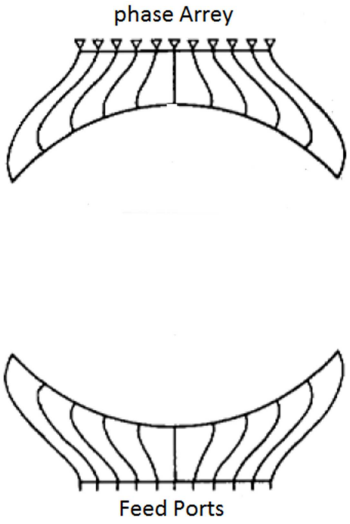
شکل۱-۸ : نمونه‌ای از طرح لنز روز[۳]

دیگر در طراحی مشخص می‌شوند. از آنجائیکه موضوع پژوهش حاضر مستقیماً به رتمن لنز مربوط می‌شود در فصل‌های آتی به تفصیل به این ساختار پرداخته خواهدشد.

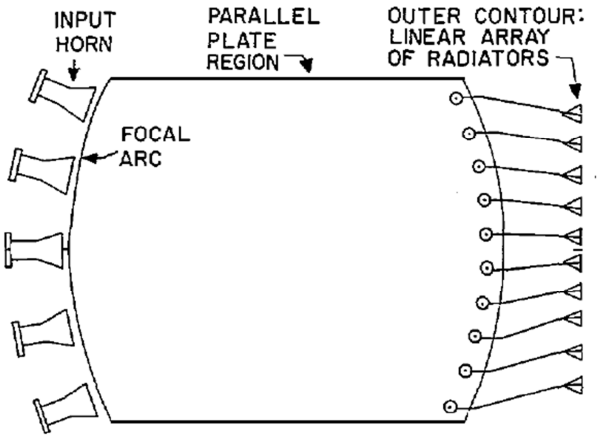
در رتمن لنز چنانچه از بیم‌پورت صفر درجه به عنوان بیم‌پورت کانونی صرفنظر کنیم تعداد بیم-پورت‌های کانونی قابل افزایش به چهار نقطه می‌باشند . این لنز به عنوان لنز چهارکانونی[1] شناخته می‌شود. چنانچه به تعدادبیم‌پورت بیشتری نیاز داشته باشیم باید خطای فاز غیرصفر را بپذیریم. از این بیم‌پورت‌ها به عنوان بیم‌پورت غیر کانونی یاد می‌شود[۱و۲۷].

همچنین نوع دیگری لنز از این گروه وجود دارد که بر این اصل استوار است که به جای اینکه تعدادی از بیم پورت‌ها خطای فاز صفر و بقیه خطای فاز غیر صفر داشته باشند، خطای فاز را بین همه بیم-پورت‌ها تقسیم کنیم، این لنزها با نام لنز غیرکانونی[2] شناخته می‌شوند[۱و۲۷].

[1] Quadrufocal lens
[2] Nonfocal lens



شکل۱-۹ : لنز بندپوتینی[۱]



شکل۱-۱۰ : رتمن‌لنز[۲]

خاطرنشان می‌شود در این فصل تنها روش‌هایی معرفی شدند که قادر هستند در یک زمان چند بیم در زوایای مختلف را در آرایه فازی فعال نمایند و از بیان روش‌هایی که در یک زمان تنها یک بیم رامی‌توانند فعال نمایند پرهیز گردید.

۱-۴) هدف و ساختار پایان‌نامه

همانطورکه در مقدمه ذکر گردید معادلات پایه رتمن‌لنز مستقل از فرکانس می‌باشد ولی ملاحظات پیاده سازی سخت‌افزاری و عملکرد الکترومغناطیسی سبب می‌شود تا پهنای باند مفید آن محدود گردد.