بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی برق

تحلیل و طراحی شیفت‌دهنده فاز باند وسیع

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک

وحید کرمی

استاد راهنما:

دکتر حسین میار نعیمی

بهمن‌ماه ۱۳۹۲

چکیده

شیفت‌دهنده فاز یک بلوک دوقطبی است که در آن اختلاف فاز بین ورودی و خروجی با یک سیگنال کنترلی تنظیم می‌شود. شیفت‌دهنده‌های فاز به دو دسته آنالوگ و دیجیتال تقسیم می‌شوند. در نوع دیجیتال تنها می‌توان به مقادیر گسسته‌ای از فاز دست پیدا کرد اما در نوع آنالوگ تغییر فاز پیوسته ممکن است. در دسته‌بندی دیگر، شیفت‌دهنده‌های فاز را می‌توان به دو دسته غیرفعال و فعال تقسیم‌بندی کرد. در نوع غیرفعال از ترانزیستور فقط به عنوان کلید استفاده می‌شود، اما در نوع فعال از ترانزیستور به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود.

هدف از این تحقیق طراحی یک شیفت‌دهنده فاز فعال چهار بیتی با تغییرات فاز از ۰ تا ۳۶۰ درجه و با قابلیت عمل‌کرد در محدوده فرکانسی چند گیگاهرتز می‌باشد. شیفت فاز دلخواه در این روش از طریق جمع فازوری دو سیگنال ورودی با اختلاف فاز ۹۰ درجه و دامنه‌های مناسب برای ایجاد شیفت فاز مورد نیاز به‌دست می‌آید. سیگنال‌های با اختلاف فاز ۹۰ درجه، توسط فیلتر تمام‌گذر متعامد ایجاد می‌شوند.

از آن‌جا که در این نوع از شیفت‌دهنده‌های فاز یکی از عوامل تاثیرگذار بر دقت عمل‌کرد مدار عدم دقت کامل مدار متعامدساز در قسمت ورودی است، در ساختار پیشنهادی مکانیسم کنترلی در نظر گرفته شده است به‌گونه‌ای که مدار به صورت خودکار خطای ناشی از بخش متعامدساز را برطرف و جبران می‌کند. برای این منظور اختلاف فاز ایجادشده در خروجی با مقدار مورد نظر مقایسه و اختلاف آن‌ها به عنوان سیگنال خطا در نظر گرفته می‌شود و از روی آن جریان‌های دنباله طبقات به‌گونه‌ای باز تنظیم می‌گردد که خطای فاز ایجادشده صفر گردد.

برای ارزیابی مدار پیشنهادی، مدار در بازه فرکانسی ۱- ۷ گیگاهرتز طراحی گردید و شبیه‌سازی‌های زیادی در تکنولوژی ۰.۱۸ میکرون CMOS انجام شد. شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که مدار پیشنهادی قادر است شیفت فازهای مورد نظر را در محدوده فرکانسی تعریف‌شده با حداکثر خطای فاز 2.46° ایجاد نماید. حداکثر خطای بهره نیز برای مدار فوق $0.36\ dB$ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مدار شیفت‌دهنده فاز فعال، تکنولوژی ۰.۱۸ میکرون cmos، مدار متعامدساز.

فهرست مطالب

فصل ۱: ۱

مقدمه ۱

۱-۱- دسته‌بندی‌ها ۳

۱-۲- ساختار پایان‌نامه ٤

فصل ۲: ۵

سیستم‌های آنتن آرایه‌ای ۵

۲-۱- سیستم‌های آنتن آرایه‌ای فاز [۴] ٦

۲-۲- روش‌های پیاده‌سازی سیستم‌های آرایه فاز ۹

۲-۳- نتیجه‌گیری ۱۲

فصل ۳: ۱۳

انواع ساختارهای شیفت‌دهنده فاز ۱۳

۳-۱- انواع ساختارهای شیفت‌دهنده فاز ۱٤

۳-۱-۱- روش سوئیچ- خط ۱۸

۳-۱-۲- روش خط بارگذاری شده ۲۱

۳-۱-۳- روش سوئیچ- شبکه ۲۳

۳-۱-۴- روش انعکاس ۲۵

۳-۱-۵- روش فعال ۲۸

۳-۲- معیارهای ارزیابی شیفت‌دهنده فاز ۲۹

۳-۳- ساختار مورد استفاده در این تحقیق ۳۰

۳-۴- نتیجه‌گیری ۳۱

فصل ۴: ۳۲

طراحی مدار شیفت‌دهنده فاز ۳۲

۴-۱- بلوک‌های شیفت‌دهنده فاز فعال ۳۳

۴-۱-۱- طراحی فیلتر تمام‌گذر متعامد (QAF) ۳٤

۴-۱-۲- طراحی بلوک تعیین علامت، تقویت‌کننده و جمع‌کننده ٤٤

۴-۱-۳- طراحی مدار کنترلی ٤٦
۴-۲- ارائه ساختار کنترلی جدید ۵۱
۴-۲-۱- طراحی منبع جریان ثابت ۵۲
۴-۲-۲- طراحی مدار ضرب‌کننده ۵٦
۴-۲-۳- طراحی فیلتر ۷۰
۴-۲-۴- طراحی بخش مقایسه و تقویت ۷۱
۴-۳- نتایج شبیه‌سازی شیفت‌دهنده فاز ۴ بیتی ۷٤
۴-۴- نتیجه‌گیری ۷۹

فصل ۵: **۸۱**

نتیجه‌گیری و پیشنهادات **۸۱**
۵-۱- نتیجه‌گیری ۸۲
۵-۲- دست‌آوردهای پایان‌نامه ۸٤
۵-۳- پیشنهادات ۸٤

منابع **۸۵**

فهرست اشکال

شکل ۲-۱ اساس کار یک گیرنده آرایه فاز ۷
شکل ۲-۲ مقدار ضریب آرایه برای یک سیستم چهار کاناله ۹
شکل ۲-۳ تأخیر در مسیر فرکانس بالا ۱۰
شکل ۲-۴ تأخیر در مسیر نوسان‌ساز ۱۰
شکل ۲-۵ تأخیر در باند پایه ۱۱
شکل ۳-۱ مشخصه فاز و تأخیر گروهی شیفت‌دهنده فاز ایده‌آل ۱۵
شکل ۳-۲ انواع ساختارهای شیفت‌دهنده فاز ۱۶
شکل ۳-۳ تغییر خازن‌های خط انتقال مصنوعی ۱۶
شکل ۳-۴ تغییر دادن سلف‌ها با سری کردن خازن‌ها ۱۷
شکل ۳-۵ خارج کردن سیگنال از نقاط مختلف خط انتقال مصنوعی ۱۸
شکل ۳-۶ روش سوئیچ- خط ۱۹
شکل ۳-۷ مدار معادل اختلاف‌دهنده فاز به روش سوئیچ- خط ۲۰
شکل ۳-۸ پدیده تشدید در اختلاف‌دهنده فاز به روش سوئیچ- خط ۲۰
شکل ۳-۹ نمودارهای توان رفت و فاز در حالت تشدید ۲۱
شکل ۳-۱۰ روش خط بارگذاری شده ۲۲
شکل ۳-۱۱ روش سوئیچ- شبکه ۲۴
شکل ۳-۱۲ تغییرات مشتق فاز نسبت به تغییرات فرکانس ۲۴
شکل ۳-۱۳ روش انعکاس ۲۵
شکل ۳-۱۴ نوع راکتانس قابل سوئیچ ۲۵
شکل ۳-۱۵ نوع خط قابل سوئیچ ۲۶
شکل ۳-۱۶ شبکه هایبرید ۲۷
شکل ۳-۱۷ ساختار نهایی شیفت‌دهنده فاز به روش انعکاس ۲۷
شکل ۳-۱۸ شیفت‌دهنده فاز فعال ۲۸
شکل ۴-۱ بلوک‌های تشکیل‌دهنده شیفت‌دهنده فاز فعال ۳۳
شکل ۴-۲ فیلتر تمام‌گذر متعامد تفاضلی [۳] ۳۴
شکل ۴-۳ منحنی خطای فاز QAF به ازای Q های مختلف [۳] ۳۶
شکل ۴-۴ فیلتر تمام‌گذر متعامد اصلاح‌شده (الف) ساختار سری (ب) ساختار موازی [۳۲] ۳۶
شکل ۴-۵ منحنی نوعی از خطای فاز فیلتر [۳۲] ۳۸
شکل ۴-۶ خطای فاز فیلتر با افزایش γ [۳۲] ۳۹

شکل ۴-۷ فیلتر متعامدساز RC دو طبقه (الف) نوع اول (ب) نوع دوم [۳۱]..... ٤٠
شکل ۴-۸ فیلتر متعامدساز RC اصلاح‌شده [۳۱] ٤٠
شکل ۴-۹ فیلتر متعامد ساز RC هایبرید [۳۱]..... ٤١
شکل ۴-۱۰ مقایسه خطای فاز فیلترهای نوع دوم، اصلاح شده و هایبرید [۳۱] ٤٢
شکل ۴-۱۱ مقایسه بهره فیلترهای مختلف [۳۱] ٤٢
شکل ۴-۱۲ خطای فاز برای مدار متعامدساز استفاده شده ٤٣
شکل ۴-۱۳ مدار تعیین علامت، تقویت‌کننده و جمع‌کننده ٤٥
شکل ۴-۱۴ مدار کنترلی برای تغییر جریان‌های دنباله [۳]..... ٤٩
شکل ۴-۱۵ مدار کنترلی با ولتاژ کنترل آنالوگ [۳۲] ٥١
شکل ۴-۱۶ نمای کلی از شیفت‌دهنده فاز ارائه‌شده..... ٥٤
شکل ۴-۱۷ منبع جریان با NMOS..... ٥٤
شکل ۴-۱۸ منبع جریان ثابت ٥٥
شکل ۴-۱۹ سلول گیلبرت ٥٧
شکل ۴-۲۰ دامنه خروجی‌های یک مدار متعامدساز ٥٧
شکل ۴-۲۱ منحنی‌های ورودی و خروجی ضرب‌کننده ٥٨
شکل ۴-۲۲ منحنی‌های ورودی و خروجی ضرب‌کننده ٥٩
شکل ۴-۲۳ تبدیل سیگنال سینوسی به پالس..... ٦٠
شکل ۴-۲۴ منحنی‌های Amp1 در فرکانس 1GHz ٦٠
شکل ۴-۲۵ منحنی‌های Amp2 در فرکانس 1GHz ٦١
شکل ۴-۲۶ مدار ضرب‌کننده کسکود ٦١
شکل ۴-۲۷ ضرب‌کننده در فرکانس 1GHz..... ٦٢
شکل ۴-۲۸ ضرب‌کننده در فرکانس 7GHz..... ٦٣
شکل ۴-۲۹ مدار ضرب‌کننده با گیت NOT ٦٣
شکل ۴-۳۰ ضرب‌کننده در فرکانس 1GHz..... ٦٤
شکل ۴-۳۱ ضرب‌کننده در فرکانس 7GHz..... ٦٤
شکل ۴-۳۲ مدار ضرب‌کننده تفاضلی ٦٥
شکل ۴-۳۳ ضرب‌کننده در فرکانس 1GHz..... ٦٦
شکل ۴-۳۴ ضرب‌کننده در فرکانس 7GHz..... ٦٦
شکل ۴-۳۵ مدار ضرب‌کننده (XNOR) ٦٧
شکل ۴-۳۶ ضرب‌کننده در فرکانس 1GHz..... ٦٧
شکل ۴-۳۷ ضرب‌کننده در فرکانس 7GHz..... ٦٨

شکل ۴-۳۸ منحنی تغییرات سطح DC به ازای شیفت فازهای مختلف (تئوری) ٦٩
شکل ۴-۳۹ فیلتر RC پایین گذر ۷۰
شکل ۴-۴۰ بخش مقایسه و تقویت..... ۷۱
شکل ۴-۴۱ (الف) جریان دنباله I_{IBias} (ب) جریان دنباله I_{QBias} ۷۳
شکل ۴-۴۲ (الف) جریان دنباله I_{IBias} (ب) جریان دنباله I_{QBias} ۷۳
شکل ۴-۴۳ نمای سیستمی ساختار پیشنهادی ۷٤
شکل ۴-۴۴ منحنی تغییرات سطح DC به ازای شیفت فازهای مختلف ۷٤
شکل ۴-۴۵ خطای موثر فاز ۷۵
شکل ۴-۴۶ خطای موثر بهره ۷٦
شکل ۴-۴۷ شیفت فاز ۷٦
شکل ۴-۴۸ پاسخ بهره ۷۷
شکل ۴-۴۹ تلفات بازگشتی ورودی ۷۷
شکل ۴-۵۰ منحنی توان ۷۸

فهرست جداول

جدول ۲-۱ مقایسه روش‌های مورد استفاده برای پیاده‌سازی گیرنده‌های آرایه فاز ۱۲
جدول ۴-۱ مقادیر عناصر مدار ۴۳
جدول ۴-۲ وضعیت کلیدها ۴۴
جدول ۴-۳ مقادیر عناصر مدار ۴۶
جدول ۴-۴ جدول کنترل کلیدها [۳] ۵۰
جدول ۴-۵ تغییرات جریان دنباله با ولتاژ درین - سورس ۵۵
جدول ۴-۶ مقادیر عناصر مدار ۵۶
جدول ۴-۷ عمل‌کرد مدار ضرب‌کننده ۶۹
جدول ۴-۸ مقادیر عناصر مدار ۶۹
جدول ۴-۹ مقایسه این کار با سایر مدارات شیفت‌دهنده فاز [۳۲] ۷۹

فصل ۱:

مقدمه

شیفت‌دهنده فاز یکی از اجزای مایکروویوی پرکاربرد در سیستم‌های مخابراتی و رادار، دستگاه‌های اندازه‌گیری و سیستم‌های مایکروویوی و صنعتی است. قبل از ظهور شیفت‌دهنده‌های فاز متغیر الکترونیکی در سال ۱۹۵۰، تقریباً همه شیفت‌دهنده‌های فاز ثابت و متغیر، مکانیکی بودند. با گسترش آنتن‌های آرایه فازی و نیاز به شیفت‌دهنده‌های فاز در این سیستم‌ها توجه ویژه‌ای به انواع شیفت‌دهنده‌های فاز شد.

شیفت‌دهنده فاز ایده‌آل یک بلوک دو قطبی است که بدون ایجاد تلفات، اختلاف فاز مابین سیگنال‌های ورودی و خروجی را تغییر می‌دهد. در یک شیفت‌دهنده فاز ایده‌آل اختلاف فاز حالت‌های مختلف مدار در باند فرکانسی مورد نظر باید ثابت بماند.

عمده‌ترین کاربرد مدارهای شیفت‌دهنده فاز در پیاده‌سازی سیستم‌های آنتن‌های آرایه فازی می‌باشد. هم‌چنین در تست و تنظیم آنتن‌ها، خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های توان و پیاده‌سازی مدولاتورهای QAM نیز می‌توان از مدارهای شیفت‌دهنده فاز استفاده کرد.

با وجود تلاش‌های زیادی که برای افزایش پهنای باند بسیاری از مدارهای مخابراتی صورت پذیرفته است، ساخت مدارات شیفت‌دهنده فاز با پهنای باند زیاد به سختی امکان‌پذیر است. مهم‌ترین علت این موضوع چندبعدی بودن مسئله‌ی طراحی یک مدار شیفت‌دهنده‌ی فاز است. طراحی یک مدار شیفت‌دهنده فاز که اختلاف فازهای مورد نظر را در یک فرکانس خاص ایجاد کند، به سادگی انجام‌پذیر می‌باشد. در صورتی که ثابت نگه‌داشتن اختلاف فاز مورد نظر در یک پهنای باند فرکانسی وسیع بسیار دشوار است. با افزایش مقدار اختلاف فازهایی که مدار باید ایجاد کند، طراحی مدار شیفت‌دهنده فاز نیز دشوارتر می‌شود. این در حالی است که طراحی مدار باید به نحوی صورت پذیرد که سایر مشخصات شیفت‌دهنده فاز مانند تلفات و تطبیق امپدانس در ورودی و خروجی در طول باند فرکانسی مورد نظر و در همه اختلاف فازهای مدار از مقادیر معینی تجاوز نکنند.

تا چند سال گذشته اکثر شیفت‌دهنده‌های فاز با استفاده از تکنولوژی GaAs ساخته می‌شدند. با پیشرفت‌هایی که در بهبود ترانزیستورهای MOS و سلف‌ها صورت پذیرفته است امکان پیاده‌سازی مدارهای شیفت‌دهنده‌ی فاز در زیر لایه‌های سیلیکونی فراهم شده است. با این وجود استفاده از سلف‌های متعدد در غالب این مدارها و ضریب کیفیت پایین سلف‌ها در تکنولوژی CMOS، باعث افزایش تلفات خواهد شد. از سویی دیگر مقاومت ترانزیستورهای CMOS در حالت

روشن بر اثر قابلیت تحرک کم‌تر الکترون‌ها در سیلیکان نسبت به GaAs بالاتر می‌باشد. عیب دیگر آن، هادی بودن زیر لایه CMOS نسبت به همتای GaAs می‌باشد. این امر اثر خازن‌های پیوندی سورس و درین نسبت به زمین مدار[1] را بیش‌تر می‌کند. در نتیجه استفاده از این ترانزیستورها به عنوان کلید، تلفات مدار را بیش‌تر افزایش خواهد داد. با این وجود پیاده‌سازی این مدارها در تکنولوژی‌های CMOS باعث کاهش قیمت سیستم آرایه فاز خواهد شد و امکان مجتمع‌سازی این مدارها را با سایر مدارات آنالوگ گیرنده و فرستنده و مدارهای دیجیتال باند پایه فراهم خواهد کرد.

۱-۱- دسته‌بندی‌ها

در یک دسته‌بندی، شیفت‌دهنده‌های فاز به دو دسته آنالوگ و دیجیتال تقسیم می‌شوند. در نوع دیجیتال تنها می‌توان به مقادیر گسسته‌ای از فاز دست پیدا کرد. اما در نوع آنالوگ تغییر فاز پیوسته ممکن است و می‌توان به هر فاز دلخواه دست یافت. نوع آنالوگ نسبت به دیجیتال دقت پایین‌تر و پهنای باند کم‌تری دارد [۱].

در دسته‌بندی دیگر، شیفت‌دهنده‌های فاز را می‌توان به دو دسته غیرفعال و فعال تقسیم کرد. در نوع غیرفعال از ترانزیستور فقط به عنوان کلید استفاده می‌شود [۱]. این امر باعث می‌شود که در فرکانس‌های بالا به خاطر تلفات، از یک یا دو تقویت‌کننده در مسیر شیفت‌دهنده استفاده شود. در نوع فعال از ترانزیستور به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود. در مقایسه با نوع غیرفعال، نوع فعال می‌تواند به سطح یکپارچگی بالایی با بهره عالی و دقت بالا برسد [۲]، [۳]. یکی از معایب نوع فعال مصرف توان DC، به علت گرایش ترانزیستورها در ناحیه فعال می‌باشد. این در حالی است که میزان تلفات نوع غیرفعال بدون استفاده از تقویت‌کننده، تقریباً صفر است. در نوع غیرفعال تلفات کل شیفت‌دهنده فاز به تعداد شیفت فازها (در نوع دیجیتال) بستگی دارد، به‌گونه‌ای که هرچه تعداد شیفت فازها افزایش یابد، مقدار تلفات به‌شدت افزایش خواهد یافت.

[1] Bulk

۱-۲- ساختار پایان‌نامه

در این تحقیق به مباحث مربوط به طراحی مدار شیفت‌دهنده فاز فعال در تکنولوژی ۰/۱۸ میکرون CMOS پرداخته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدارها ارائه‌شده است.

در این پایان‌نامه از ساختار کنترلی جدید برای دست‌یابی به شیفت فازهای مورد نظر استفاده شده است. به این سبب پس از ارائه مقدمه‌ای کوتاه در فصل نخست، در فصل دوم به بررسی سیستم‌های آنتن آرایه‌ای و روش‌های مختلف پیاده‌سازی آن‌ها پرداخته می‌شود. در فصل سوم انواع ساختارهای شیفت‌دهنده فاز که متناسب با شیفت فاز در مسیر فرکانس بالا می‌باشند به همراه معایب و مزایای مربوط به هر یک از آن‌ها، مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصل چهارم ساختار کلی شیفت‌دهنده فاز فعال معرفی خواهد شد و نکات مربوط به طراحی بلوک‌های تشکیل‌دهنده آن بیان می‌شود. در ادامه ساختار کنترلی جدید برای ایجاد شیفت فاز مورد نظر در خروجی به همراه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدار شیفت‌دهنده فاز ارائه می‌شود. در انتها در فصل پنجم جمع‌بندی مختصری از دست‌آوردهای پایان‌نامه ارائه می‌گردد.

فصل ۲:

سیستم‌های آنتن آرایه‌ای

یک سیستم آرایه فاز، سیستمی است متشکل از چند آنتن که به صورت الکتریکی قابلیت تغییر جهت موج ارسالی و دریافتی را فراهم می‌سازد. با ایجاد یک تأخیر زمانی متغیر در مسیر هر یک از آنتن‌ها و جبران‌سازی تأخیر ناشی از مسیرهای با طول مختلف در فضا، تغییر جهت موج ارسالی و دریافتی، امکان‌پذیر می‌شود. برای این منظور از شیفت‌دهنده‌های فاز استفاده می‌شود. از آن‌جا که بیش‌ترین کاربرد شیفت‌دهنده‌های فاز در سیستم‌های آنتن آرایه‌ای می‌باشد، در این فصل به توضیح مختصری در مورد ماهیت این سیستم‌ها و روش‌های پیاده‌سازی آن‌ها پرداخته شده است.

۲-۱- سیستم‌های آنتن آرایه‌ای فاز [۴]

درحالی‌که ارسال اطلاعات با نرخ‌های بالا با استفاده از سیستم‌های آرایه‌ای فاز برای کاربردهای تجاری پیشینه چندانی ندارد، سابقه استفاده از این سیستم‌ها برای پیاده‌سازی رادارهای با قابلیت‌های بالا به بیش از ۵۰ سال می‌رسد.

یک سیستم آرایه فاز از چندین آنتن تشکیل‌شده است که به صورت الکتریکی قابلیت تغییر جهت موج ارسالی و دریافتی را فراهم می‌سازد. با ایجاد یک تأخیر زمانی متغیر در مسیر هر یک از آنتن‌ها و جبران‌سازی تأخیر ناشی از مسیرهای با طول مختلف در فضا، تغییر جهت موج ارسالی و دریافتی امکان‌پذیر می‌شود. شکل ۲-۱ چگونگی عمل‌کرد یک گیرنده آرایه فاز N کاناله را نشان می‌دهد.

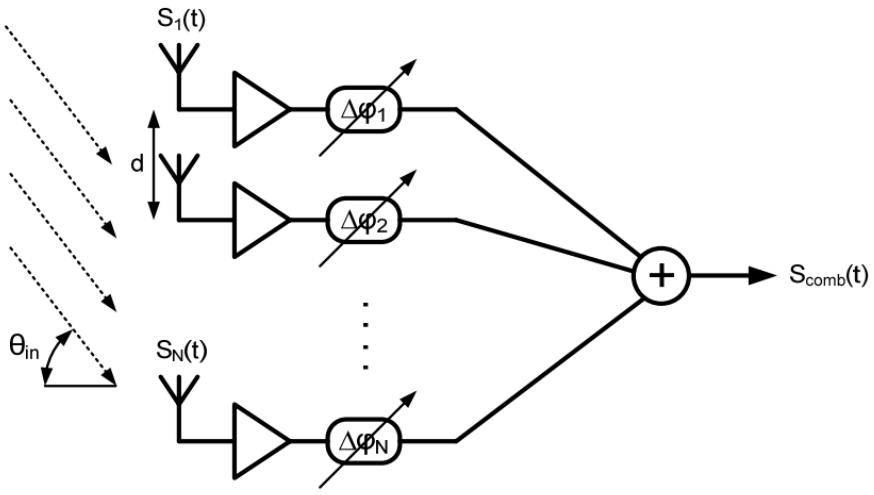
در این شکل فاصله تمام آنتن‌ها از یکدیگر d در نظر گرفته شده است. با فرض این‌که موج دریافتی با زاویه θ_{in} نسبت به خط عمود بر صفحه آنتن‌ها برخورد کند، به علت فاصله میان آنتن‌ها، میزان تأخیر در موج دریافتی بین دو آنتن مجاور از رابطه (۲-۱) به‌دست می‌آید.

$$\Delta\tau = \frac{d \times \sin\theta_{in}}{c} \qquad (۱-۲)$$

که در این رابطه C سرعت نور در محیط انتقال می‌باشد. بنابراین اگر موج دریافتی به شکل سینوسی و با فرکانس ω و دامنه A باشد، سیگنالی که توسط آنتن i ام دریافت می‌شود را می‌توان

به کمک رابطه (۲-۲) نشان داد.

$$S_i(t) = A \times \cos(\omega(t - (i-1)\frac{d \times \sin\theta_{in}}{c})) \qquad (۲-۲)$$



شکل ۲-۱ اساس کار یک گیرنده آرایه فاز

بنابراین موج ارسال‌شده با تأخیر خطی در آنتن‌های متوالی دریافت خواهد شد. برای جبران این تأخیر، مقدار تأخیر در کانال‌های دریافتی طوری تنظیم می‌شود که آنتنی که سیگنال را با تأخیر کم‌تری دریافت می‌کند، تأخیر مداری بیش‌تری یابد. برای مثال شکل مسیر i ام باید تأخیری برابر با $(N-i+1)\Delta\tau$ داشته باشد. اگر رابطه (۲-۱) برقرار باشد، تأخیر ایجادشده در فضا کاملاً جبران‌سازی خواهد شد. بنابراین برای سیگنال‌های دریافتی در خروجی تاخیردهنده‌ها می‌توان رابطه (۲-۳) را نوشت.

$$S_i(t) = G \times A \times \cos(\omega(t - (i-1)\frac{d \times \sin\theta_{in}}{c} - (N-i+1)\Delta\tau)) \qquad (۲-۳)$$

در این رابطه G مقدار بهره هر یک از کانال‌ها می‌باشد. یکی از پارامترهایی که میزان کارایی یک سیستم آرایه فاز را نشان می‌دهد، ضریب آرایه[1] می‌باشد. این پارامتر به صورت نسبت توان در خروجی یک سیستم آرایه فاز به توان یک کانال تعریف می‌شود. با جمع کردن خروجی‌های هر

[1] Array Factor

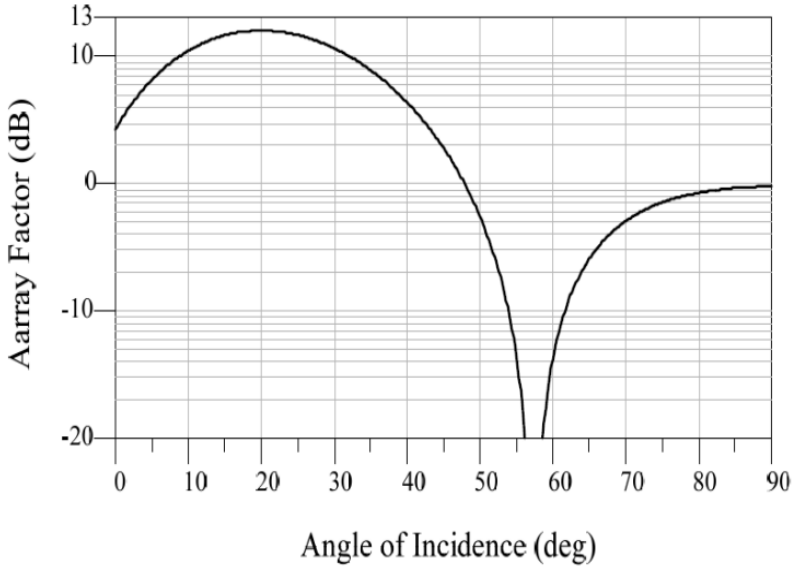
کانال در رابطه (۲-۳) و تقسیم کردن مقدار به‌دست آمده بر توان یک کانال می‌توان ضریب آرایه را به صورت رابطه (۲-۴) نوشت.

$$AF(\Delta\tau,\theta_{in})=\left(\frac{\sin\frac{N\left(\omega\Delta\tau-\frac{\omega d}{c}\sin\theta_{in}\right)}{2}}{\sin\frac{\omega\Delta\tau-\frac{\omega d}{c}\sin\theta_{in}}{2}}\right)^2 \qquad (۲-۴)$$

اگر تأخیر زمانی در فضا کاملاً توسط تأخیرهای ایجادشده در مدار خنثی شوند، سیگنال‌های دریافتی به صورت هم فاز با یکدیگر جمع خواهند شد. در این حالت ضریب آرایه بیش‌ترین مقدار یعنی N^2 می‌باشد. برای سایر زاویه‌های دریافتی مقدار ضریب آرایه کم‌تر از این مقدار می‌باشد و این موضوع باعث می‌شود تا یک سیستم آرایه فاز بتواند موج‌های دریافتی را بر اساس زاویه دریافت تفکیک کند[1]. بنابراین یک سیستم آرایه فاز می‌تواند تداخل‌کننده‌هایی را که جهت تابش آن‌ها با جهت تابش سیگنال مورد نظر تفاوت دارد را تضعیف کند و این یکی از مزایای مهم این سیستم‌ها می‌باشد. شکل ۲-۲ مقدار ضریب آرایه برای یک سیستم چهار کاناله را که فاصله آنتن‌های آن $\lambda/2$ می‌باشد و برای زاویه دریافت ۲۰ درجه تنظیم شده است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، این سیستم می‌تواند تداخل‌کننده‌ای را که از زاویه حدود ۵۷ درجه تابش می‌کند، کاملاً حذف کند.

یک سیستم آرایه فاز هم‌چنین می‌تواند حساسیت گیرنده را نیز افزایش دهد. در جهتی که بیش‌ترین بهره وجود دارد توان سیگنال N^2 برابر سیگنال دریافتی از یک کانال می‌باشد. ولی اگر نویز کانال‌های مختلف ناهم‌بسته باشند، توان کل نویز خروجی N برابر توان نویز خروجی یک کانال خواهد شد. بنابراین نسبت سیگنال به نویز در یک سیستم N کاناله، N برابر بهتر از یک گیرنده معمولی خواهد شد.

[1] Spatial Selectivity

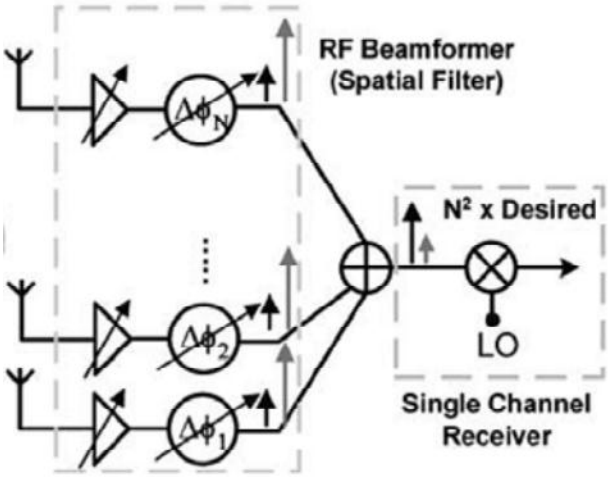


شکل ۲-۲ مقدار ضریب آرایه برای یک سیستم چهار کاناله

در فرستنده نیز ضریب آرایه را می‌توان عامل افزایش بهره آنتن تلقی کرد. برای تولید توان خروجی برابر با یک فرستنده معمولی در یک جهت خاص، هر یک از کانال‌های سیستم آرایه فاز $1/N^2$ برابر توان خروجی یک فرستنده معمولی را باید تولید کند. بنابراین کل توان مصرف‌شده توسط فرستنده، N برابر کاهش می‌یابد.

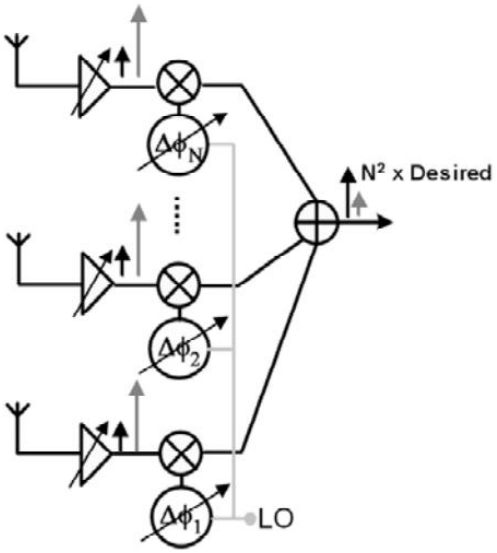
۲-۲- روش‌های پیاده‌سازی سیستم‌های آرایه فاز

تأخیرهای قابل تغییر در سیستم‌های آرایه فاز به چندین روش قابل پیاده‌سازی می‌باشد. یکی از این روش‌ها پیاده‌سازی تأخیرها در ورودی فرکانس بالای مدار است که در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۳ تأخیر در مسیر فرکانس بالا

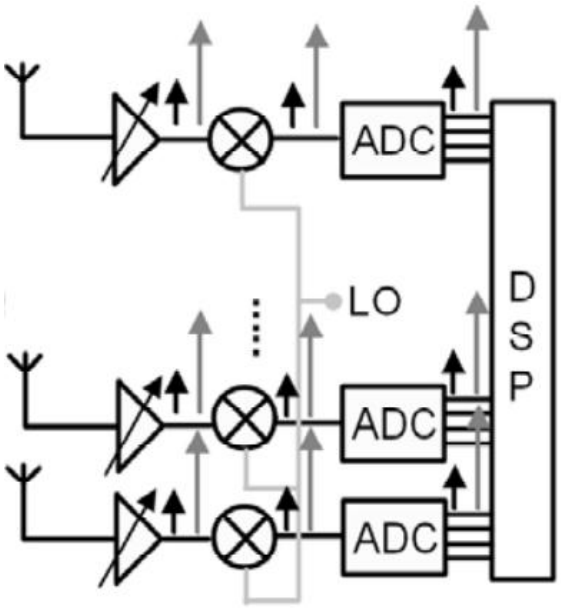
هم‌چنین می‌توان سیگنال نوسان‌ساز مدار را با فازهای مختلف به میکسرهای هر یک از مسیرها اعمال کرد. این روش که تأخیر در مسیر نوسان‌ساز صورت می‌گیرد در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴ تأخیر در مسیر نوسان‌ساز

پیاده‌سازی تأخیرها در باند پایه نیز یکی از روش‌های ممکن می‌باشد، که در شکل ۲-۵ نمایش داده شده است. اگرچه می‌توان تأخیرها را در فرکانس میانی مدار نیز ایجاد کرد ولی به علت بزرگ‌تر شدن اندازه سلف‌ها و خازن‌های مدار در فرکانس‌های پایین، ساخت مدارهای

شیفت‌دهنده فاز در این فرکانس‌ها چندان متداول نمی‌باشد.



شکل ۲-۵ تأخیر در باند پایه

برای ساخت گیرنده‌های ساده آرایه فاز روش شکل ۲-۴ متداول‌تر از سایر روش‌ها می‌باشد. در این روش نیازی به استفاده از شیفت‌دهنده فاز نیست و نوسان‌ساز مدار را می‌توان طوری طراحی کرد که قابلیت تولید فازهای مختلف را داشته باشد [۵–۷]. با این وجود نویز فاز نوسان‌ساز در این روش باعث کاهش نرخ انتقال اطلاعات خواهد شد.

روش شکل ۲-۵ به سخت‌افزار بسیار پیچیده‌ای نیاز دارد ولی این روش انعطاف‌پذیری زیادی دارد و می‌توان به کمک نرم‌افزار سیستم را تبدیل به یک سیستم MIMO[1] نیز کرد [۸]، [۹]. با این وجود کلیه مدارهای آنالوگ مورد استفاده در این روش باید قابلیت تحمل تداخل‌کننده‌های توان بالا را داشته باشند. هم‌چنین مصرف توان در این روش بیش‌تر از سایر روش‌های معرفی‌شده می‌باشد و مساحت اشغال‌شده از مدار مجتمع نیز در این روش بیش‌تر است. در جدول ۲-۱ عمل‌کرد روش‌های مختلف پیاده‌سازی سیستم‌های آرایه فاز با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

[1] Multiple Input Multiple Output