



دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته برق و الکترونیک

موضوع:

طراحی و شبیه سازی یک شیفت دهنده فاز در باند X با استفاده از تکنولوژی میکروماشین

اساتید راهنما:

دکتر محمد نقی آذرمنش

دکتر ابراهیم عباسپور ثانی

اساتید داور:

دکتر مهدی چهل امیرانی

دکتر بهبود مشعوفی

تنظیم و نگارش:

فرشاد فراهی بلمیری

شهریور ۱۳۹۳

حق چاپ برای دانشگاه ارومیه محفوظ است

تقدیم به

پدر صبورم،

مادر فداکارم،

خواهر مهربانم،

و

برادر بزرگووارم

به از این چه شادمانی که تو جانی و جهانی

تقدیر و تشکر

سپاس بیکران خدای را که به بندگان توفیق تحصیل علم و ادب را عنایت فرمود و ادب را روشنائی علم نهاد تا حلاوت کشف و شهود را بر دل بندگان بنشانند. بر خود واجب می‌بینم مراتب قدردانی خود را از زحمات اساتید گرانقدرم آقایان دکتر ابراهیم عباسپور ثانی و محمد نقی آذینش که صبورانه مراد تدوین این پایان نامه را هنمایی نمودند اعلام نمایم. بی‌شک اگر راهنمایی های ایشان نبود این امر میسر نمی‌شد. همچنین مراتب سپاسم از آن دوستان خوبم آقایان جواد شهاوند، سروش کیانی قلعه سرد، شهرام آقایی، رسول سلیمی، سینا کوهستانی و همه دانشجویان ورودی ۹۱ الکترونیک است که محطات تلخ و شیرین این دو سال را با یکدیگر به اشتراک گذاردم. از آقای مهندس بهمن محمدی به سبب راهنمایی هایشان در به ثمر رسیدن این پایان نامه کمال تشکر را دارم.

جای آن است که این سیاهه را با بر شمردن نام پدر و مادرم که همواره باز خود گذشتگی مشوق و پشتیبان من در تحصیل علم و ادب بوده اند زین نمایم. دستان پر مهرشان را می‌بوسم.

امید است که روزی آن پادشاه خوبان شب بجز را به سر رساند و بوی خوش و صلش مرهمی بر دل شب خستگان باشد.

ای پادشاه خوبان داد از غم تنهایی	دل بی توبه جان آمد وقت است که باز آیی
دایم گل این بستان شاداب نمی ماند	دریاب ضعیفان را در وقت توانایی
دیشب کله زلفش بآبادی همی کردم	گفتا غلطی بگذر زین فکر ت سودایی
صد باد صبا اینجا با سلسله می رقصند	این است حریف ای دل تابا و پیمایی
مشقتی و مجوری دور از تو چنانم کرد	کز دست بخوابد شاد پایاب شکیمیایی
یار ببه که شاید گفت این نکته که در عالم	رخساره به کس ننمود آن شاه حر جایی
ساقی چمن و گل را بی روی تورنگی نیست	شمشاد خزان کن تاباغ بیاری
ای درد تو ام درمان در بستر ناکامی	و ای یاد تو ام مونس در گوشه تنهایی
در دایره قسمت ما نقطه تسلیمیم	لطف آن چه تو اندیشی حکم آنچه تو فریایی
فکر خود و رای خود در عالم رندی نیست	کفر است در این مذهب خود بینی و خود رایی
زین دایره مینا خونین جگر م می ده	تا حل کنم این مشکل در ساغر مینایی
حافظ شب هجران شد بوی خوش وصل آمد	شادیت مبارک باد ای عاشق شیدایی

چکیده

طراحی و شبیه سازی یک شیفت دهنده فاز میکرو الکترومکانیکی ۶ بیتی در باند X مورد بررسی قرار گرفته است. در طراحی این شیفت دهنده ساختار به نسبت جدیدی را با ادغام دو ساختار DMTL و switched-line ارائه داده ایم. با توجه به نتایج شبیه سازی، میانگین insertion loss و return loss برای تمامی ۶۴ حالت شیفت فاز در فرکانس ۹/۷ GHz به ترتیب برابر ۲۲ dB و ۰/۰۶ dB- است. همچنین در این فرکانس مقدار موثر خطای فاز برابر ۲/۳ درجه است. با توجه به میانگین تلفات ۰/۶ dB برای تمامی حالات شیفت فاز، عملکرد این شیفت دهنده برابر ۰/۱ dB/bit بدست می آید. از ویژگی های شیفت دهنده فاز پیشنهادی می توان به استفاده از پل های خازنی فلز-هوا-فلز اشاره نمود که موجب کاهش تلفات انتقال می گردد. همچنین فرآیند ساخت پیشنهادی برای این شیفت دهنده برخلاف شیفت دهنده DMTL نیاز به لایه سیلیکان نایتراید ندارد که موجب سادگی و کاهش مراحل ماسک گذاری و لیتوگرافی به پنج مرحله می گردد. با استفاده از روابط ریاضی اثبات کرده ایم که نسبت فرکانس قطع به فرکانس کاری برای این شیفت دهنده فاز برابر ۲۰ است که این نسبت مستقل از پارامترهای طراحی همچون فاصله بین پل های خازنی است. ابعاد این شیفت دهنده ۶ بیتی برابر 134 mm^2 است.

کلید واژه: شیفت دهنده فاز میکرو الکترومکانیکی، شیفت دهنده DMTL، شیفت دهنده switched-line، return loss، insertion loss، میانگین تلفات

فهرست مطالب

عنوان.....	شماره صفحه
۱ مقدمه	۱
۱-۱ انگیزه پژوهش	۱
۲-۱ آنتن آرایه فازی	۲
۳-۱ بررسی سیستمهای میکروالکترومکانیکی در فرکانسهای رادیویی	۳
۱-۳-۱ سویچهای میکروالکترومکانیکی	۵
۲-۳-۱ شیفت دهندههای فاز میکروالکترومکانیکی	۸
۴-۱ اهداف پایان نامه	۹
۵-۱ ساختار پایان نامه	۹
۲ بررسی خطوط انتقال و شیفت دهندههای فاز میکروالکترومکانیکی	۱۱
۱-۲ خطوط انتقال مسطح	۱۱
۱-۱-۲ خط انتقال Microstrip	۱۱
۲-۱-۲ خط انتقال Stripline	۱۳
۳-۱-۲ خط انتقال Coplanar waveguide	۱۴
۲-۲ شیفت دهندههای فاز دیجیتال	۱۵
۱-۲-۲ شیفت دهنده فاز DMTL	۱۶
۲-۲-۲ شیفت دهنده فاز SWITCHED-LINE	۲۱
۳-۲-۲ شیفت دهنده فاز REFLECTION-TYPE	۲۴
۳-۲ جمع بندی	۲۶
۳ بررسی ساختار پیشنهادی برای شیفت دهنده فاز	۲۷
۱-۳ طراحی شیفت دهنده فاز ۶ بیتی X-band به دو روش switched-line و DMTL	۲۷
۱-۱-۳ طراحی شیفت دهنده ۶ بیتی با روش Switched-Line	۲۷

۳۱	طراحی شیفت دهنده ۶ بیتی با روش DMTL	۲-۱-۳
۳۸	ساختار پیشنهادی برای شیفت دهنده فاز ۶ بیتی X-band	۲-۳
۳۹	روابط طراحی شیفت دهنده فاز پیشنهادی	۱-۲-۳
۴۰	بهینه سازی طراحی	۲-۲-۳
۴۱	ساختار سویچهای به کار رفته در شیفت دهنده فاز پیشنهادی	۳-۲-۳
۴۲	سویچ به کار رفته در شیفت دهنده فاز پیشنهادی	۴-۲-۳
۴۴	بررسی نویز فاز بر روی شیفت دهنده فاز پیشنهادی	۵-۲-۳
۴۶	نتایج شبیه سازی شیفت دهنده فاز پیشنهادی	۶-۲-۳
۴۹	فرآیند ساخت پیشنهادی	۷-۲-۳
۵۲	نتیجه گیری و مقایسه	۴
۵۴	مراجع	۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱ میانگین تلفات یک شیفت دهنده فاز نمونه ۳ بیتی برای RF MEMS و GaAs FET در باندهای فرکانسی مختلف	۴
جدول ۲-۱ مقایسه پارامتر سویچ‌های RF MEMS, PIN-Diode و FET	۴
جدول ۱-۲ تاثیر اندوکتانس سری (L_B) بر روی فرکانس قطع	۱۸
جدول ۱-۳ ابعاد شیفت دهنده ۵ بیتی switched-line شکل ۳-۳	۳۰
جدول ۲-۳ نتایج اندازه گیری شیفت دهنده فاز به همراه میزان خطا در هر حالت برای فرکانس $f_0 = 10\text{ GHz}$	۳۰
جدول ۳-۳ مشخصات DMTL ۶ بیتی. $f_0 = 12\text{ GHz}$ ، $f_B = 60\text{ GHz}$ ، $Z_0 = 80\ \Omega$	۳۶
جدول ۴-۳ مشخصات طراحی شیفت دهنده ۶ بیتی پیشنهادی برای کار در باند X	۴۰
جدول ۵-۳ پارامترهای سویچ سری Inline DC-contact MEMS ساخته شده توسط آزمایشگاه Lincoln	۴۴
جدول ۶-۳ نتایج شبیه سازی برای ۶۴ حالت شیفت فاز به همراه مقدار خطای نسبی برای هر حالت	۴۸
جدول ۱-۴ مقایسه شیفت دهنده طراحی شده و چند شیفت دهنده شناخته شده	۵۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نمایش اصول کلی آنتن آرایه فازی در جهت دهی به سیگنال ارسالی با به کارگیری شیفت دهنده‌های فاز ۲.....
- شکل ۲-۱ معماری گیرنده سوپرهتروداین در ساختارهای (الف) سنتی (ب) آرایه‌های فازی ۳.....
- شکل ۳-۱ سویچ میکروالکترومکانیکی سری با خط انتقالی ۶.....
- شکل ۴-۱ مدار معادل سویچ خازنی سری با خازن متغیر در محدوده ۲۰ fF تا ۲ pF ۶.....
- شکل ۵-۱ نتایج شبیه سازی سویچ خازنی سری با توجه به مدار معادل آن ۶.....
- شکل ۶-۱ پل خازنی MEMS در ساختار موازی بر روی خط انتقالی CPW ۷.....
- شکل ۷-۱ مدار معادل سویچ خازنی موازی با خازن متغیر در محدوده ۲۰ fF تا ۲ pF ۷.....
- شکل ۸-۱ نتایج شبیه سازی سویچ خازنی موازی با توجه به مدار معادل آن ۷.....
- شکل ۹-۱ نمای بالایی از یک شیفت دهنده فاز true-time delay با بارگذاری پلهای خازنی بر رو خط انتقالی CPW ۹.....
- شکل ۱-۲ خطوط انتقالی مسطح: (الف) microstrip، (ب) stripline، (ج) coplanar waveguide(CPW) ۱۲.....
- شکل ۲-۲ شیفت دهنده‌های فاز دیجیتال (الف) DMTL، (ب) Switched-Line، (ج) Reflection-Type ۱۵.....
- شکل ۳-۲ مدل کلی خط انتقال که به صورت متناوب بارگذاری میشود به همراه امپدانس سری Z_S و ادmittانس موازی Y_p ۱۶.....
- شکل ۴-۲ مدل المان فشرده DMTL که در آن خازن پل MEMS با خازن متغیر C_b نمایش داده شده است. L_t و C_t به ترتیب برابر با خازن و سلف واحد طول خط انتقال بدون بار است. S فاصله بین پلهای خازنی است. ۱۷.....
- شکل ۵-۲ مدل مداری یک بخش از ساختار DMTL برای شبیه سازی. Z_0 برابر با امپدانس بدون بار، S برابر با فاصله تناوب پلها و C_b برابر خازن پل ۱۹.....
- شکل ۶-۲ یک DMTL دو بیتی ساخته شده در باند w به همراه (الف) عکس و دیاگرام دو بیتی آن، به همراه نتایج شبیه سازی و اندازه گیری (ب) return loss (ج) phase shift و (د) insertion loss ۲۰.....
- شکل ۷-۲ شیفت دهندههای Switched-Line با پیاده سازی (الف و ب) سویچ‌های سری (ج) سویچ‌های موازی. Radial stubs در (ج) تنها برای طراحی با microstrip مورد استفاده قرار میگیرد. ۲۱.....
- شکل ۸-۲ دیاگرام شماتیکی از یک شیفت دهنده فاز 4 بیتی Switched-Line با استفاده از سویچ SP4T ۲۲.....
- شکل ۹-۲ (الف) ساختار سویچ SP4T به همراه (ب) نتایج شبیه سازی ۲۲.....
- شکل ۱۰-۲ شیفت دهنده فاز ۲ بیتی switched-line به همراه (الف) نمونه ساخته شده، نمودارهای (ب)

۲۳	insertion loss (ج) و return loss (د) شیفیت فاز. برای هر چهار حالت شیفیت فاز.
شکل ۱۱-۲	یک شیفیت دهنده فاز N بیتی reflect-line با استفاده از سوییچهای (الف) موازی و
۲۴	(ب) سری
شکل ۱-۳	ساختار تک بیت شیفیت دهنده Switched-Line
۲۸	شکل ۲-۳ نمایی از ساختار شیفیت دهنده ۶ بیتی switched-line با استفاده از سوییچ SP4T
شکل ۳-۳	شیفیت دهنده ۵ بیتی switched-line
۲۹	شکل ۴-۳ نتایج شبیه سازی شیفیت دهنده ۵ بیتی switched-line برای میانگین (الف) return loss (ب)
۳۰	insertion loss
شکل ۵-۳	تاثیر فرکانس قطع بر روی محدوده خطی $\Delta\phi$ ، $f_{max} = 40 \text{ GHz}$ و $Z_u = 61 \Omega$
۳۲	$s = 700 \mu\text{m}$
شکل ۶-۳	مدل فشرده یک بخش از شیفیت دهنده DMTL با مشخصات $s = 180 \mu\text{m}$ و $Z_0 = 85 \Omega$
شکل ۷-۳	نمایی از خازن MEMS با دی الکتریک ضخیم برای عملکرد دیجیتال
شکل ۸-۳	نمودار نسبت خازنی بر حسب ارتفاع نرمالیز شده دی الکتریک
شکل ۹-۳	تک سلول ارایه شده از DMTL که از خازن استاتیک به صورت سری با خازن پل استفاده میکند.
۳۵	از این نوع ساختار برای پیاده سازی DMTL دیجیتالی استفاده میشود.
شکل ۱۰-۳	نمای بالا از ۳ بیت شبیه سازی شده یک DMTL ۶ بیتی. $f_0 = 12 \text{ GHz}$ و $f_B = 60 \text{ GHz}$
۳۶	$Z_0 = 80 \Omega$
شکل ۱۱-۳	نتایج شبیه سازی (الف) return loss، (ب) insertion loss برای ۳ بیت شبیه سازی شده
DMTL ۶ بیتی.	مقادیر میانگین return loss و insertion loss در فرکانس ۱۲ GHz به ترتیب برابر با
۳۷	۱۶ dB و ۰/۱۴ dB- است.
شکل ۱۲-۳	میزان شیفیت فاز برای سه بیت اول یک DMTL ۶ بیتی با حالات فاز :
۳۷	$39/375^\circ, 33/75^\circ, 28/125^\circ, 22/5^\circ, 16/875^\circ, 11/25^\circ, 5/625^\circ$
شکل ۱۳-۳	ساختار کلی شیفیت دهنده فاز پیشنهادی به همراه (الف) تاخیر هر خط بر حسب درجه، (ب) نمای
نزدیک از پلهای خازنی بر روی خط انتقال، (ج) سوییچهای سری MEMS	
۳۸	برای انتخاب خطوط انتقال سیگنال
شکل ۱۴-۳	برداشتن شماری از پلهای خازنی از روی بعضی از خطوط انتقال به منظور تنظیم و بهینه کردن
۴۱	عملکرد هر خط
شکل ۱۵-۳	ساختار سوییچهای به کار رفته در شیفیت دهنده فاز پیشنهادی
شکل ۱۶-۳	(الف و ب) سوییچ سری Inline DC-contact MEMS با یک محل اتصال، (ج و د) مقطع
سوییچ در حالات up-state و down-state، (ه) سطح مقطع سوییچ خازنی Inline،	
۴۲	(ی) مدل کلی مدار.
شکل ۱۷-۳	تصویر SEM از سوییچ سری Inline DC-contact MEMS ساخته شده توسط آزمایشگاه

۴۳	Lincoln
شکل ۱۸-۳	سطح مقطع سویچ سری inline آزمایشگاه Lincoln در حالت اتصال (الف) DC،
۴۳	(ب) خازنی
شکل ۱۹-۳	نتایج شبیه سازی (الف) return loss، (ب) insertion loss، شیفته دهنده ۶ بیتی پیشنهادی
۴۷	برای حالات منتخب 0° ، 90° ، 135° ، 180° ، 270° و 315° به همراه میانگین ۶۴ حالت فاز
۴۸	شکل ۲۰-۳ نمودار میانگین تلفات شیفته دهنده فاز پیشنهادی
شکل ۲۱-۳	فرآیند ساخت شیفته دهنده فاز پیشنهادی (سمت راست نمای بالا و سمت چپ سطح مقطع)
۵۱	

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ انگیزه پژوهش

شیفت دهنده‌های فاز^۱ از جمله مهمترین بلوک تشکیل دهنده سیستم‌های آنتن آرایه فازی^۲ مورد استفاده در صنایع نظامی و ارتباطات بی‌سیم^۳ محسوب می‌شوند. شیفت دهنده‌های فاز متغیر الکترونیکی ابتدا در دره ۱۹۵۰ معرفی گردیدند. پس از آن تحقیقات بر روی زمینه شیفت دهنده‌های فاز به دو بخش کلی روش طراحی و فرآیند ساخت تقسیم گردید [۱].

همزمان با دهه ۱۹۶۰ هنگامیکه اولین شیفت دهنده فاز نیمه هادی اختراع شد، پیشرفت شگرفی در شیفت دهنده‌های فاز دیود PIN به وقوع پیوست. Cheng یک دیود ورکتور^۴ بر اساس شیفت دهنده فاز reflection-type برای فرکانس ۵/۸ GHz گزارش کرده است [۲۴]. insertion loss گزارش شده برای این شیفت دهنده کمتر از ۰/۶ dB است.

همزمان با پیشرفت تکنولوژی میکروالکترومکانیکی RF^۵، سویچ‌های RF MEMS قابلیت جایگزینی با سویچ‌های دیود PIN و ترانزیستورهای FET را از خود نشان دادند. در قیاس با سویچ‌های نیمه هادی از جمله سویچ‌های دیود PIN و ترانزیستورهای FET، سویچ‌های MEMS دارای مزیت‌های نمونه‌ای هستند از جمله:

- ❖ توان مصرفی نزدیک به صفر
- ❖ isolation بسیار بالا
- ❖ insertion loss بسیار پایین
- ❖ linearity بالا
- ❖ هزینه بسیار کم

بدین منظور در این فصل ابتدا به معرفی مختصری از آنتن آرایه فازی خواهیم پرداخت و در ادامه به بررسی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی RF و تفاوت آن با تکنولوژی‌های دیگر خواهیم پرداخت و سویچ و شیفت دهنده فاز میکروالکترومکانیکی را به عنوان دو قطعه مهم از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی RF به صورت مختصر معرفی خواهیم کرد. فصل اول با بیان اهداف و ساختار پایان نامه اتمام می‌یابد.

^۱ Phase Shifter

^۲ Phased Array Antenna System

^۳ Wireless

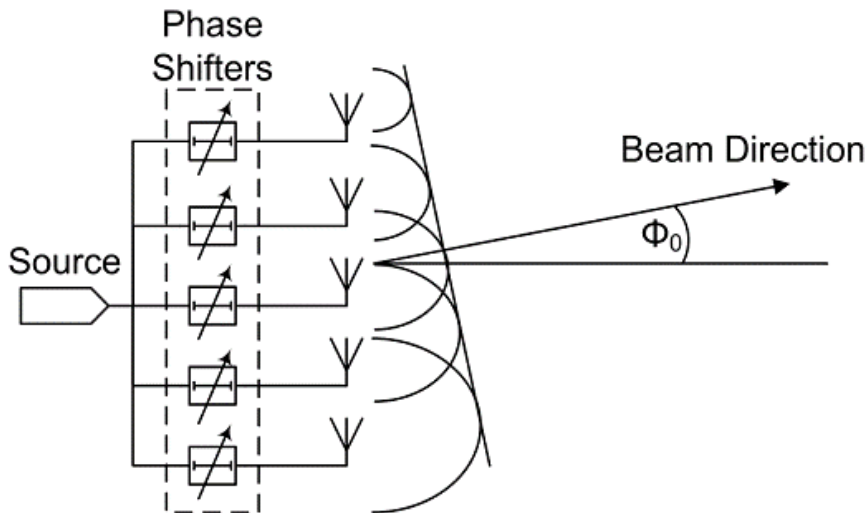
^۴ Varactor

^۵ RF MEMS

۲-۱ آنتن آرایه فازی

آنتن‌های آرایه فازی به مجموعه از آنتن‌ها گفته می‌شود که در آن فاز نسبی سیگنال‌های ورودی آنتن‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کند که الگوی تشعشعی موثر^۱ آرایه‌ای در جهتی معین هدایت می‌شود و در جهات ناخواسته حذف می‌گردد [۲]. این تکنولوژی ابتدا در خلال جنگ جهانی دوم معرفی شد و پس از آن کاربرد گسترده‌ای در ارتباطات رادیویی فضایی، رادارها به منظور ردگیری هدف و سایر زمینه‌ها از جمله سیستم‌های پدافندی در صنایع نظامی پیدا کرد. امروزه با گسترش تکنولوژی‌های مدارهای مجتمع میکروویو یکپارچه^۲ (MMICs)، مدارهای مجتمع سیلیکانی CMOS RF^۳ (RFICs)، مجتمع سازی سه بعدی^۴ و RF MEMS، سیستم-های آرایه‌ای فازی می‌توانند با سایز کوچک و توان مصرفی کم در زمینه‌های تجاری مورد استفاده قرار گیرند.

در شکل ۱-۱-۱ نمایشی از اصول کاری سیستم آنتن آرایه فازی نمایش داده شده است. در این ساختار برای تغییر فاز نسبی سیگنال‌های ورودی از شیفت دهنده‌های فاز استفاده می‌شود. از جمله کاربردهای دیگر سیستم‌های آرایه‌ای فازی می‌توان به نقش آن‌ها در سیستم‌های ارتباطی بی سیم اشاره نمود. در شکل ۱-۲(الف) یک گیرنده سوپرهترداین^۵ سنتی به منظور ایجاد ارتباطات بی سیم نشان داده شده است [۳]. جایگزینی آنتن آرایه فازی به همراه شیفت دهنده فاز به جای تک آنتن گیرنده سوپرهترداین شکل ۱-۲(الف)، موجب افزایش ظرفیت کانال بدون کاهش پهنای باند می‌گردد (شکل ۱-۲ ب).



شکل ۱-۱-۱ نمایش اصول کلی آنتن آرایه فازی در جهت دهی به سیگنال ارسالی با به کارگیری شیفت دهنده‌های فاز

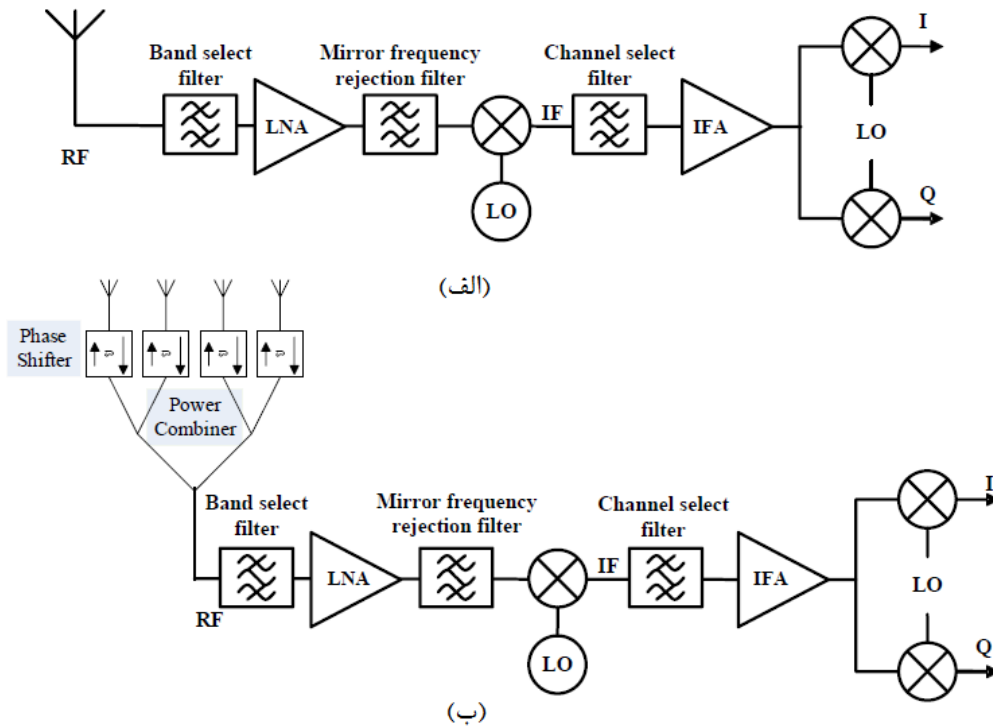
^۱Effective radiation pattern

^۲ Monolithic microwave integrated circuits

^۳ Silicon CMOS RF integrated circuits

^۴ Three-dimensional (3D) integration technology

^۵ Superheterodyne receiver



شکل ۲-۱ معماری گیرنده سوپرهتروداین در ساختارهای (الف) سنتی (ب) آرایه‌ای فازی

۳-۱ بررسی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در فرکانس‌های رادیویی

تحقیقات بر روی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی مورد استفاده در فرکانس‌های رادیویی به دلیل عملکرد خوب آن‌ها در سیستم‌های دفاعی و ارتباطی در طی یک دهه اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است. سیستم‌های RF MEMS نمونه جدیدی از قطعات کوچک شده آرایه می‌دهند که تعاملی از سیگنال‌های مکانیکی، الکتریکی و RF را به کار می‌گیرند. مزیت مهم سیستم‌های RF MEMS مقاومت بسیار کم آن‌ها به میزان ۰/۱ الی ۰/۳ اهم در قیاس با مقاومت ۲ الی ۶ اهم ترانزیستورهای FET و دیودهای pin است که موجب کاهش در تلفات سیگنال^۱ می‌گردد، از جمله مزیت دیگر این سیستم‌ها مصرف توان به شدت کم در محدوده μW در قیاس با مصرف توان ترانزیستورهای FET و دیودهای pin در محدوده mW است [۴].

در جداول ۱-۱ و ۲-۱ به ترتیب مقایسه‌ای بین تلفات سیستم‌های RF MEMS و GaAs FET و برای یک شیفت دهنده فاز نمونه ۳ بیتی و پارامترهای سویچ در تکنولوژی‌های RF MEMS، دیود PIN و ترانزیستور FET صورت گرفته است [۵ و ۹]. همانگونه که در جداول ۱-۱ و ۲-۱ نشان داده شده است مزیت مهم شیفت دهنده‌ها و سویچ‌های RF MEMS در قیاس با شیفت دهنده‌ها و سویچ‌های نیمه هادی، تلفات بسیار کم آن‌ها است اگرچه سرعت switching سویچ‌های RF MEMS در قیاس با سویچ‌های نیمه هادی بسیار کمتر است.

^۱ Signal losses

جدول ۱-۱ میانگین تلفات یک شیفت دهنده فاز نمونه ۳ بیتی برای تکنولوژی‌های RF MEMS و GaAs FET در باندهای فرکانسی مختلف [۵]

تلفات FET GaAs (dB)	تلفات RF MEMS (dB)	فرکانس (GHz)
۳-۴	۰/۹-۱	باند X (۱۰ GHz)
۶-۷	۱/۷-۲	باند Ka (۳۵ GHz)
۸-۹	۲/۳-۲/۶	باند V (۶۰ GHz)
۹-۱۰	۲/۶-۳	باند W (۹۴ GHz)

جدول ۲-۱ مقایسه پارامتر سوئیچ‌های RF MEMS، PIN-Diode و FET [۹]

FET	PIN-Diode	RF MEMS	پارامتر
۳-۵	±۳-۵	۲۰-۸۰	ولتاژ (V)
۰	۳-۲۰	۰	جریان (mA)
۰/۰۵-۱	۵-۱۰۰	۰/۰۵-۱	توان مصرفی (mW)
۱-۱۰۰ ns	۱-۱۰۰ ns	۱-۳۰۰ μs	زمان سوئیچینگ
۷۰-۱۴۰	۴۰-۸۰	۱-۶	خازن سری حالت بالا (Ff)
۴-۶	۲-۴	۰/۵-۲	مقاومت سری (Ω)
-	۱۰	۴۰-۵۰۰	نسبت خازنی
۰/۵-۲	۱-۴	۲۰-۸۰	فرکانس قطع (THz)
متوسط	بالا	بسیار بالا	ایزولاسیون (۱-۱۰ GHz)
ضعیف	متوسط	بسیار بالا	ایزولاسیون (۱۰-۴۰ GHz)
-	ضعیف	بالا	ایزولاسیون (۴۰-۱۰۰ GHz)
۰/۴-۲/۵	۰/۳-۱/۲	۰/۰۵-۰/۲	تلفات (۱-۱۰۰ GHz) (dB)
<۱۰	<۱۰	<۱	انتقال توان ماکزیمم (W)

پروسه ساخت قطعات RF MEMS نیاز به فرایند دمایی کمتری نسبت به نیمه هادی‌ها دارد در نتیجه با استفاده از فرآیند post-processing امکان مجتمع سازی این قطعات با مدارات مجتمع نیمه هادی همچون CMOS، GaAs و SiGe امکان پذیر می‌باشد، که منجر به تولید قطعات کوچک با قابلیت بالا به همراه مصرف توان کم نسبت به قطعات سنتی می‌گردد [۶]. امروزه تکنولوژی RF MEMS در زمینه طراحی و ساخت قطعات همچون سوئیچ، شیفت دهنده فاز، ورکتور، اسیلاتور قابل تنظیم، سلف، فیلتر، آنتن، رزوناتور و سایر موارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه فصل به بررسی دو قطعه پرکاربرد از سیستم‌های

RF MEMS یعنی سویچ‌ها و شیف‌دهنده‌های فاز با ذکر جزئیات هر یک می‌پردازیم.

۱-۳-۱ سویچ‌های میکروالکترومکانیکی^۱

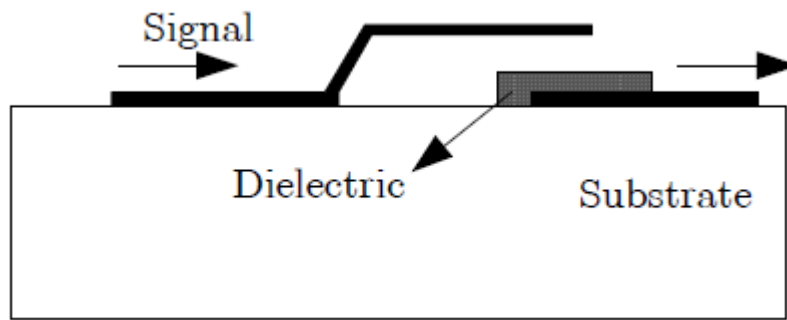
سویچ‌های میکروالکترومکانیکی در ساختارهای بازویی و دیافراگمی با ارتفاع پل ۳ الی ۴ میکرومتر بالای خط انتقالی^۲ ساخته می‌شوند که در این حالت ولتاژ اعمالی برای تغییر حالت آن‌ها از up-state به down-state به میزان ۲۵ الی ۱۰۰ ولت افزایش می‌یابد. Pacheco به همراه همکاران نشان داده‌اند که با ارتفاع پل ۳ میکرومتر و با استفاده از فنرهای مارپیچی در انتهای بازو، می‌توان ولتاژ اعمالی به سویچ را به ۹ الی ۱۶ ولت کاهش داد. این ارتفاع نه تنها برای کاهش خازن پارازیتیکی پل خازنی ضروری است بلکه موجب افزایش نسبت خازنی بین دو حالت up-state و down-state به میزان ۵۰ الی ۱۰۰ می‌گردد. سویچ‌های میکروالکترومکانیکی قادر به کار در فرکانس‌های بالای ۴۰ GHz با insertion loss بین ۰/۲ الی ۰/۵ dB به صورت بسیار خطی می‌باشند. این سویچ‌ها بسته به ابعاد آن‌ها امکان دستیابی به isolation در محدوده ۲۰ الی ۴۰ dB به همراه reflection coefficient ۱۵- الی ۲۰- dB را دارا هستند.

در حال حاضر سویچ‌های میکروویو در ساختارهای سری و موازی به صورت بازوهای یک سر یا دو سر ثابت طراحی می‌شوند. در ساختار سری که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، میزان isolation به خاطر وجود خازن‌های پارازیتیکی که در فرکانس‌های بالا موجب coupling می‌شود، محدود می‌گردد. این اثر را می‌توان با شبیه‌سازی سویچ خازنی نشان داد. همانطور که در شکل ۱-۴ مشاهده می‌شود، پل خازنی را با مدار سری خازن-سلف-مقاومت جایگزین کرده‌ایم. شکل ۱-۵ نتایج شبیه‌سازی را برای isolation هنگامیکه سویچ در حالت قطع یا up-state و return loss هنگامیکه سویچ در حالت وصل یا down-state قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، عملکرد سویچ با توجه به مقادیر خازنی نشان داده شده در شکل ۱-۴، در فرکانس‌های پایین بوسیله return loss در محدوده ۲ GHz که تا ۱۰- dB افزایش می‌یابد، محدود می‌گردد. در فرکانس‌های بالا این عملکرد بوسیله isolation که در محدوده ۸ GHz تا ۲۰- dB کاهش می‌یابد، محدود می‌گردد. یکی از مشکلات اصلی سویچ‌های خازنی سری return loss بالای آن‌ها در حالت اتصال با خط در محدوده فرکانسی است که سویچ از خود isolation بالایی نشان می‌دهد، که در شکل ۱-۵ این مساله در محدوده فرکانسی ۰/۱ الی ۲ GHz نشان داده شده است.

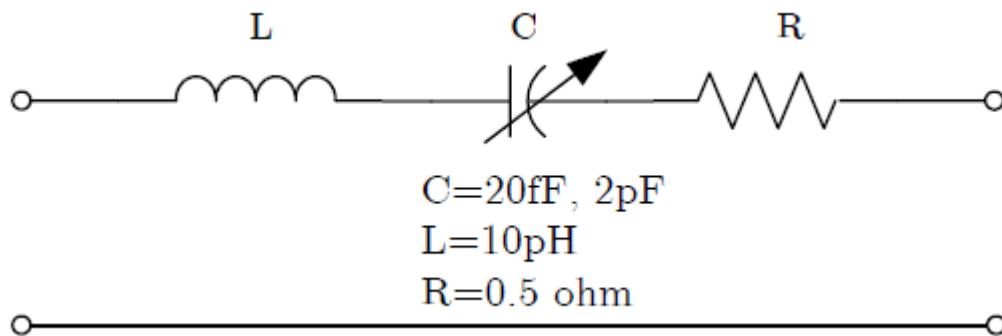
شکل ۱-۶ یک سویچ خازنی را با ساختار بازویی دو سر ثابت در حالت موازی با خط انتقالی نشان می‌دهد. در این حالت در فرکانس‌های بالا به سبب حضور خازن‌های پارازیتیکی reflection ناخواسته داریم، همچنین پل خازنی می‌تواند با ترکیب سری از خازن-سلف-مقاومت جایگزین شود (شکل ۱-۷). شبیه‌سازی این مدار در شکل ۱-۸ نشان داده شده است به طوری که مقدار isolation هنگامیکه سویچ در حالت down-state و میزان return loss هنگامیکه سویچ در حالت up-state است، نشان داده شده است.

^۱ MEMS Switches

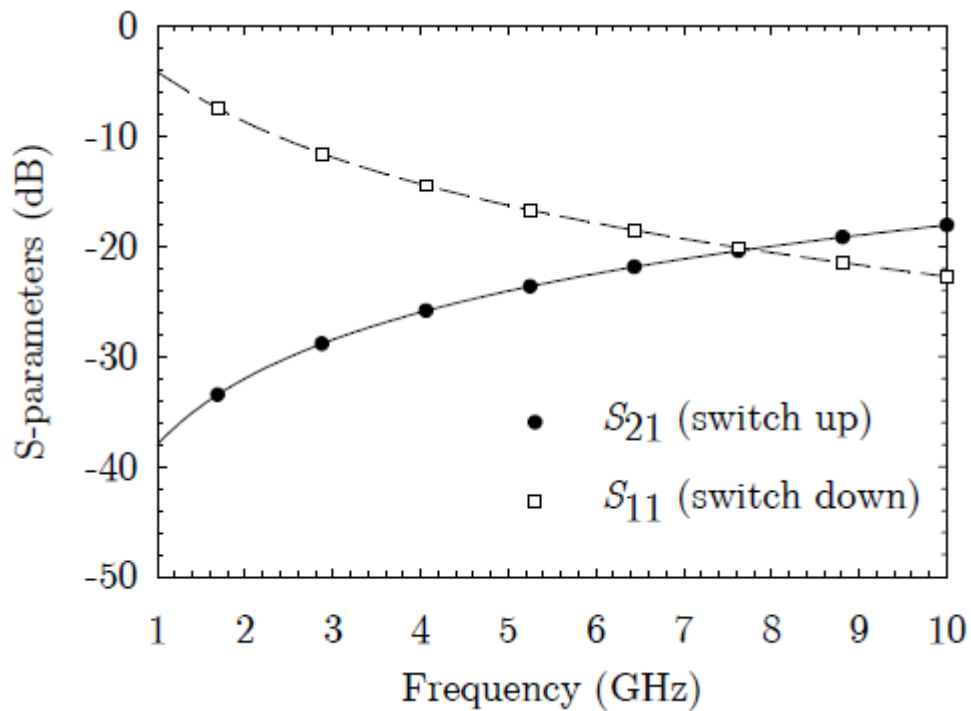
^۲ Transmission Line



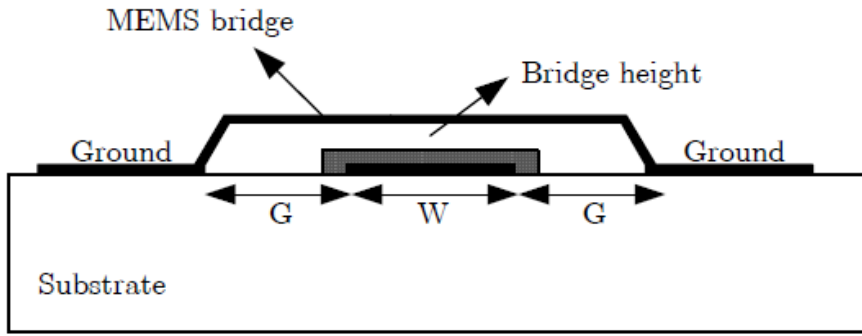
شکل ۳-۱ سویچ میکروالکترومکانیکی سری با خط انتقالی



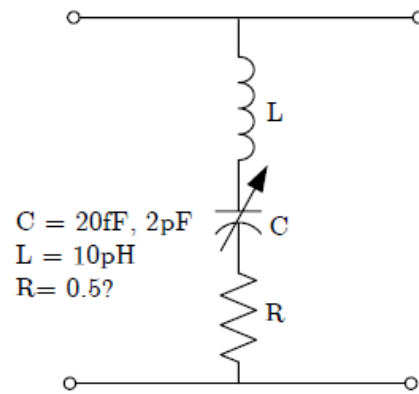
شکل ۴-۱ مدار معادل سویچ خازنی سری با خازن متغیر در محدوده ۲۰ fF تا ۲ pF



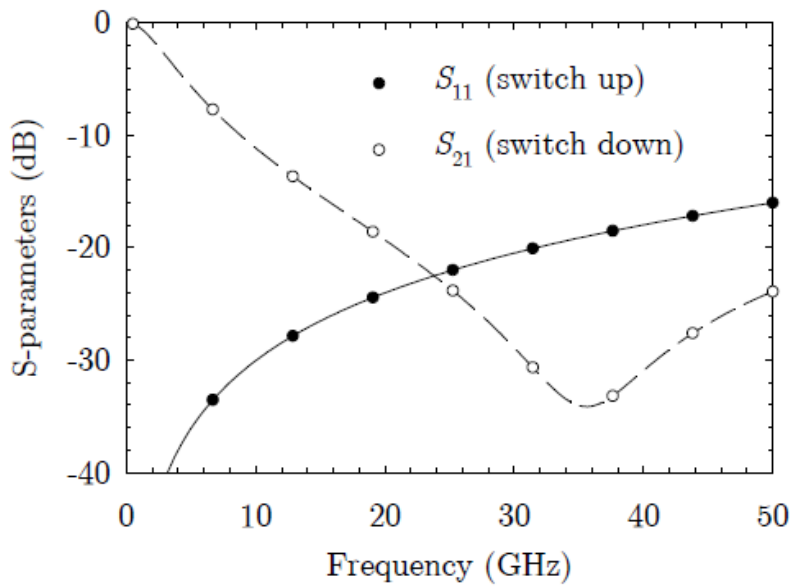
شکل ۵-۱ نتایج شبیه سازی سویچ خازنی سری با توجه به مدار معادل آن



شکل ۶-۱ پل خازنی MEMS در ساختار موازی بر روی خط انتقالی CPW



شکل ۷-۱ مدار معادل سویچ خازنی موازی با خازن متغیر در محدوده ۲۰ fF تا ۲ pF



شکل ۸-۱ نتایج شبیه سازی سویچ خازنی موازی با توجه به مدار معادل آن

همانطور که در شکل ۱-۸ مشاهده می‌شود عملکرد فرکانس پایین سویچ موازی بوسیله isolation پایین و عملکرد فرکانس بالای آن توسط return loss بالا محدود می‌شود.

از سویچ‌های خازنی موازی برای کار در فرکانس‌های بالا استفاده می‌شود که فرکانس رزونانس سلف و خازن سویچ موجب تغییر در منحنی isolation می‌گردد. این مساله در شکل ۱-۸ در محدوده ۳۰ الی ۴۰ GHz نشان داده شده است. Goldsmith به همراه همکاران [۷] سویچ میکروالکترومکانیکی خازنی موازی‌ای را ارائه داده‌اند که isolation آن در حالت down-state برابر با ۴۰ dB و return loss آن در حالت up-state برابر ۱۵ dB- است. Muldavin به همراه همکاران [۸] نشان داده‌اند که با استفاده از چند سویچ خازنی موازی به جای یک سویچ امکان تنظیم reflection و دستیابی به isolation بالا امکان پذیر است. نتایج اندازه‌گیری return loss کمتر از ۱۵ dB- در بازه فرکانسی DC تا ۴۰ GHz به همراه isolation بهتر از ۴۰ dB در بازه فرکانسی ۱۶ تا ۴۰ GHz نشان می‌دهد [۴].

۱-۳-۲ شیفت دهنده‌های فاز میکروالکترومکانیکی

شیفت دهنده‌های فاز از جمله مهمترین بلوک‌های تشکیل دهنده سیستم‌های آنتن آرایه فازی هستند که بر پایه مواد فریت^۱، دیوده‌های pin، سویچ‌های FET می‌باشند. امروزه با گسترش تکنولوژی میکروماشین و برتری آن‌ها در زمینه ساخت قطعات کوچکتر همراه با توان مصرفی بسیار کم و تلفات پایین آن در امواج میلیمتری نسبت به انواع نیمه هادی آن، توجه به ساخت این قطعات با استفاده از تکنولوژی میکروماشین افزایش یافته است. در حالت کلی عملکرد یک شیفت دهنده فاز با توجه به فاکتورهای زیر تعیین می‌شود:

- ❖ Frequency range
- ❖ Insertion loss
- ❖ Input return loss
- ❖ Output return loss
- ❖ phase error
- ❖ linearity
- ❖ Control voltage-current

شیفت دهنده‌های فاز ferrite عملکرد خوبی را نشان می‌دهند و قابلیت کار در توان‌های بالا را دارند اما هزینه ساخت آن‌ها بالا است و به صورت دستی تنظیم^۲ می‌گردند و توان مصرفی به نسبت بالایی را دارند. امروزه شیفت دهنده‌های فاز solid-state از پرکاربردترین شیفت دهنده‌ها هستند. شیفت دهنده‌های طراحی شده با دیوده‌های pin توان DC بیشتری را نسبت به شیفت دهنده‌های FET مصرف می‌کنند اگرچه تلفات کمتری را خصوصاً در محدوده امواج میلیمتری دارند. مزیت شیفت دهنده‌های فاز FET امکان مجتمع سازی آن‌ها با تقویت کننده‌ها در یک چیپ است که موجب کاهش در هزینه تولید می‌گردد [۹].

^۱ Ferrite materials

^۲ Tuning