تحلیل و طراحی تغییر دهنده فاز N - بیتی MEMS توزیع شده در باند Ka

حبیب اله زلفخانی*[۱] , جلیل راشد محصل[۲] و فرخ حجت کاشانی[۳]

[۱]استادیار گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان

[۲]دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

[۳] استاد دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت

(تاریخ دریافت ۸۵/۴/۲۶ , تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۱/۱۸ , تاریخ تصویب ۸۶/۸/۳۰)

چکیده

در این مقاله تحلیل و طراحی تغییر دهنده های فاز میکروالکترومکانیکی توزیع شده بر روی موجبر هم صفحه ارائه می شود. یک تغییر دهنده فاز n بیتی با استفاده از خازنهای متغیر یا سوئیچ MEMS که بطور متناوب بر روی موجبر هم صفحه واقع شده اند ساخته می شود. با تغییر ظرفیت توسط ولتاژ بایاس؛ خازن موثر خط انتقال تغییر کرده و در نتیجه یک ساختار آهسته کننده موج بوجود می آید. مدل دقیق تغییر دهنده فاز با استفاده از تحلیل موجی کامل الکترومغناطیسی وتئوری مدارهای مایکروویو امکان پذیر است. با استفاده از روش اجزاء محدود توسط شبیه ساز ساختارهای فرکانس بالا (HFSS) میدانها در سلول واحد محاسبه می گردد. با معلوم بودن میدانها پارامترهای S و نیز حساسیت آنها نسبت به ابعاد فیزیکی بدست می آید. از نتایج حاصل؛ طراحی تغییر دهنده فاز n بیتی با مفهوم مدارهای مایکروویو انجام می گیرد. در نهایت عملکرد تغییر دهنده فاز در تمام حالتها در باند Ka بررسی می شود.

واژه های کلیدی : سوئیچ MEMS - تغییر دهنده های فاز - سیستم های میکروالکترومکانیکی - پارامترهای S - ماتریس انتقال - تلفات داخلی - افت بر گشتی

مقدمه

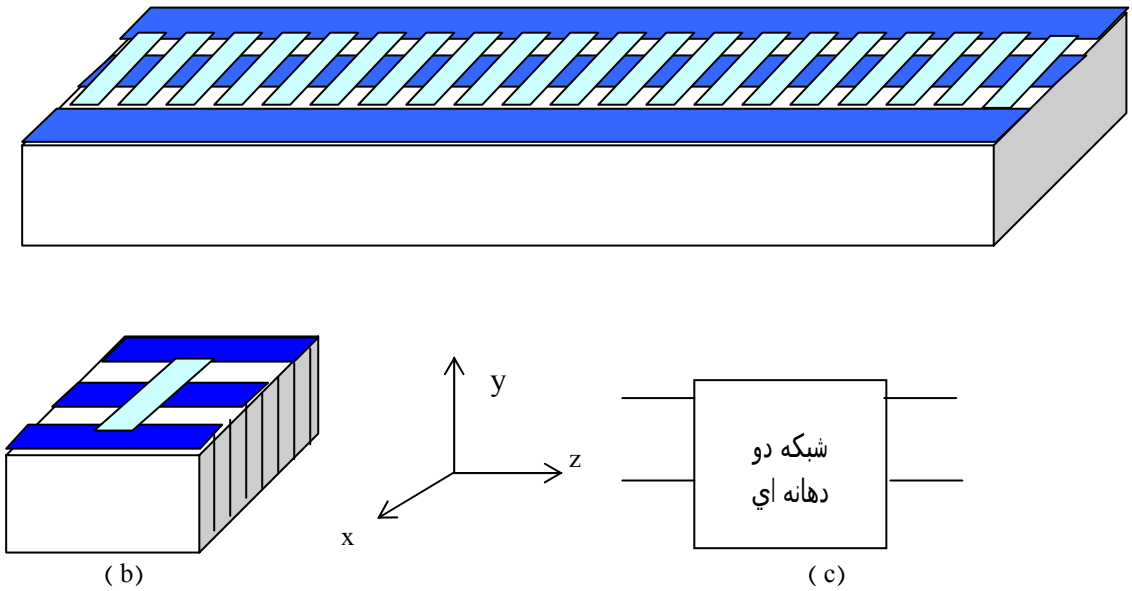
آرایه های فازی بخاطر پویش الکترونیکی فضا بدون حرکت فیزیکی آنتنها اهمیت زیادی در سیستم های مخابراتی و رادار دارند. عنصر اصلی در آرایه های فازی انتقال دهنده فاز می باشد. یک آرایه فازی ممکن است از تعداد زیادی آنتن دارای تغذیه جداگانه بهمراه تغییر دهنده فاز تشکیل گردد بنابراین انتقال دهنده های فاز با اتلاف پائین ؛ هزینه ساخت ارزان و وزن کم در طراحی آرایه های فازی نقش بسزائی دارند. تغییر دهنده های فاز فریتی تلفات داخلی کم داشته و توانهای بالا را تحمل می کنند اما ساختار پیچیده و هزینه ساخت بالا دارند. انتقال دهنده های فاز نیمه هادی که در آنها از دیودهای PIN و یا ترانزیستورهای FET استفاده می گردد نسبت به نوع فریتی هزینه ساخت و اندازه کمتری دارند اما کاربرد آنها بخاطر تلفات داخلی بالا محدود است. در سالهای اخیر انتقال دهنده های فاز با استفاده از فناوری سیستمهای میکروالکترومکانیکی به منظور غلبه بر محدودیت های مذکور ارائه شده است [۱].

تغییر دهنده های فاز MEMS [۱] در فرکانسهای مایکروویو و امواج میلیمتری بصورت چشمگیری توسعه پیدا کرده است. دو روش عمده طراحی؛ یکی روش سوئیچینگ و دیگری خط انتقال MEMS توزیع شده (DMTL)[۲] برای انتقال دهنده فاز در منابع مختلف دیده می شود. در روش شبکه سوئیچینگ تاخیر فاز با ا ستفاده از سوئیچ کردن بین مسیرهای مختلف بدست می آید. در روش DMTL خازنهای متغیر بصورت متناوب روی خط انتقال قرار می گیرند و تاخیر فاز با استفاده از کنترل مقدار خازن و یا حالتهای سوئیچ ایجاد می گردد[۲] . انواع خطوط انتقال و ترکیبهای متنوعی از خازنهای MEMS را می توان در نظر گرفت. معروفترین آنها سوئیچ خازنی موازی است که از یک لایه نازک فلزی بصورت معلق بر روی هادی مرکزی موجبر هم صفحه (CPW)[۳] و متصل به هادیهای کناری آن تشکیل شده و با ولتاژ بایاس DC به حرکت در می آید(شکل ۱). یک لایه دی الکتریک جهت جلو گیری از اتصال فلز به فلز بین لایه و هادی مرکزی قرار می گیرد.

* نویسنده مسئول : تلفن : ۰۲۴۱-۵۱۵۲۶۰۹ , فاکس : ۰۲۴۱-۲۲۸۳۲۰۴ , Email: h.zolfkhani@znu.ac.ir

با اعمال ولتاژ بین هادی مرکزی و لایه، لایه در اثر نیروی الکترواستاتیکی به طرف پائین کشیده شده وبا قطع ولتاژ؛ لایه در اثر کشش به مکان اولیه بر می گردد. با اعمال ولتاژ بایاس به تعداد معینی از این سوئیچها می توان تاخیر فازهای ۱۸۰ و۹۰و ۴۵ و۲۲/۵ و ۱۱/۲۵ درجه ایجاد نمود و با ترکیب مناسب از آنها می توان انتقال دهنده های فاز چند بیتی در فرکانسهای مختلف بدست آورد. انتقال دهنده های فاز DMTL اولین بار توسط Rebeiz و Barker ارائه شد [۳]. بدنبال آن تغییر دهنده فاز دو بیتی در باند X [۴] ؛ تغییر دهنده فاز سه بیتی در باند K [۵] مورد بررسی قرار گرفتند. تغییر دهنده فاز چهار بیتی توزیع شده را نیز در منابع می توان یافت [۶] . انتقال دهنده های فاز پنج بیتی با استفاده از تغییر طول استابهای اتصال کوتاه و مدار باز توسط سوئیچهای MEMS در باند X پیشنهاد شده است [۷]. همچنین تغییر دهنده فاز پنج بیتی از نوع انعکاسی با استفاده از سوئیچهای MEMS مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. بطور کلی در چند سال اخیر در محدوده فرکانسی GHz ۱۲۰ –۱ انتقال دهنده های فاز دیجیتال با با فناوری MEMS توسط گروههای تحقیقاتی طراحی و ساخته شده است.

اکثر روشهای تحلیل و طراحی موجود در منابع بر اساس مدل عناصر فشرده برای لایه روی CPW استوار بوده و هر کدام برای حالت خاصی کاربرد دارند. در این روشها مقادیر عناصر فشرده با روشهای مختلف بدست آمده و با استفاده از مفهوم مدارهای گسترده عملکرد تغییر دهنده فاز استنتاج می گردد. همچنین در منابع موجود روشها همگی در مورد تغییر دهنده فاز با تعداد بیت خاص بررسی شده اند. مثلا روش مربوط انتقال دهنده دو بیتی با تغییر دهنده فاز سه بیتی, سه بیتی با چهار بیتی و .... متفاوت می باشد. روشی که بتوان یکجا تغییر دهنده فاز با بیتهای مختلف را طراحی نمود ضروری به نظر می رسد. در این مقاله تحلیل موجی کامل جهت توصیف عملکرد الکترومغناطیسی بکار گرفته می شود. روش عددی مناسب با توجه به ساختار سلول واحد بکار رفته و میدانهای الکترومغناطیسی در فضای مورد نظر محاسبه می گردد. با معلوم بودن میدانها؛ پارامترهای S و حساسیت آنها به ازای مقادیر پهنا و ارتفاع لایه محاسبه می شود. با استفاده از نتایج مذکور ساختار و عملکرد تغییر دهنده فاز n بیتی به کمک تئوری مدارهای مایکروویو ارائه می گردد. و در نهایت تلفات داخلی ؛ افت بر گشتی و فاز ایجاد شده در حالتهای مختلف بدست می آید.



شکل ۱ : a) تغییر دهنده فاز DMTL b) سلول واحد c) شبکه دو قطبی معادل.

مدل الکترومغناطیسی

همچنانکه در شکل (۱) دیده می شود در تغییر دهنده فاز DMTL قسمتهای مشابه بطور متناوب تکرار شده اند . بنابراین عملکرد آن را می توان از شناخت رفتار بخشهای تشکیل دهنده آن و ترکیب مناسب آنها بدست آورد. یک قسمت تکرار شونده را تحت عنوان سلول واحد در نظر می گیریم. برای آنکه مدل دقیق وعملی برای سلول واحد که متشکل از یک لایه در روی موجبر CPW می باشد بدست آید باید تمام ساختار سلول واحد را یکجا با تحلیل موجی کامل بررسی کرده و میدانهای الکترومغناطیسی را بدست آوریم. ساختار سلول واحد در عمل متشکل از دی الکتریک ها و رساناهای مختلف می با شد. شناخت رفتار آن مستلزم حل معادلات ماکسول در نواحی مذکور با توجه به شرایط مرزی خواهد بود. معادله موج هلمهولتز برای این نوع مسائل با استفاده از معادلات ماکسول بصورت زیر است.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \varepsilon_r \mu_r \vec{E} = 0$$

(۱)

با توجه به اینکه بدنبال حل معادله موج در مد انتشار امواج هستیم میدانها را بصورت زیر که بیانگر انتشار موج در جهت z در حالت هارمونیک زمانی می باشد؛ در نظر می گیریم:

$$\vec{E}(x,y,z,t) = \mathrm{Re}[\vec{E}(x,y)e^{(j\omega t-\gamma z)}]$$

(۲)

معادله موج مربوط به E وH با روشهای عددی و با توجه به شرایط مرزی حل؛ و رفتار الکترومغناطیسی ساختار معلوم می گردد. حل در ساختار سلول واحد بعلت محیط ناهمگن و شرایط مرزی غیر منطبق بر صفحات کامل مختصات چندان آسان نیست [۹] . در بین شبیه سازهای موجود؛ HFSS[۴] بطور موثری برای چنین ساختاری مناسب است که در اینجا تحلیل موجی کامل را با آن انجام می دهیم . HFSS روش اجزاء محدود (FEM)[۵] را بکار گرفته و فضای مورد نظررا به چهار وجهی های زیادی تقسیم کرده و میدانها را در هر سلول تقریب می زند. معادلات موج را برای میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بطور مستقل حل کرده و نتایج در معادلات ماکسول زیر آزمایش می شود.

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$$

(۳)

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + j\omega\varepsilon\vec{E}$$

(۴)

در صورت قابل قبول بودن جواب میدانهای الکتریکی و مغناطیسی ؛ حل نهائی بدست می آید. با استفاده از این حل امپدانس در دهنه های مشخص شده؛ از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$P = \oint_s (\vec{E} \times \vec{H}^*).\vec{ds} \qquad V = \oint_l \vec{E}.\vec{dl}$$

$$I = \oint_l \vec{H}.\vec{dl} \qquad Z_{pv} = \frac{V.V}{P}$$

$$Z_{pi} = \frac{P}{I.I} \qquad Z_{vi} = \sqrt{Z_{pv}Z_{pi}}$$

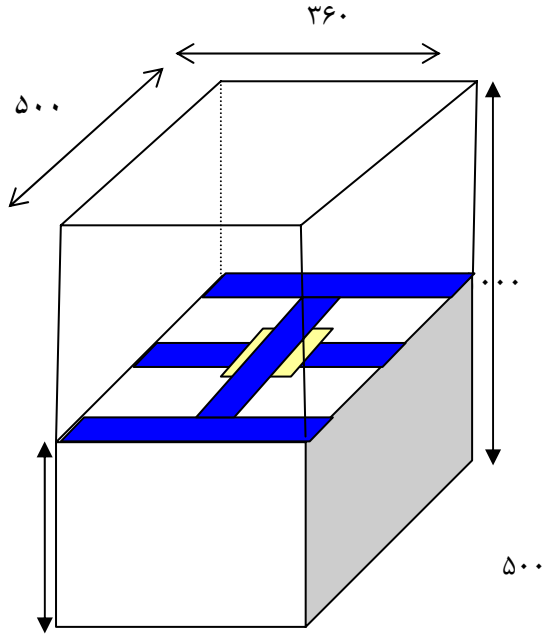
(۵)

امپدانس مشخصه در سه حالت؛ Z_{vi} برای مود TEM , Z_{pi} برای مدل میکرواستریپ و Zpv برای موجبر هم صفحه مناسب می باشد. نحوه تحریک ساختار بعنوان سوئیچ بدین صورت است که هر دهنه تعریف شده به موجبری یکنواخت با همان سطح مقطع دهنه وصل می شود. در نتیجه میدان تحریک متناظر با میدان موجبر یکنواخت می باشد. روش کار در HFSS با شبکه بندی تمام فضای مورد نظر با چهار وجهی شروع می شود. میدانها با توابع محلی در روی هر سطح چهار وجهی تقریب می گردد. درهر راس مولفه های مماسی بر سطوح متصل به آن راس ذخیره می شود. میدان در روی سطوح از طریق برازش از میدانهای معلوم رئوس مشخص می گردد. شبکه بندی با توجه به دقت در گامهای بعدی بصورت بهینه قابل تصحیح است. سطح هاشور خورده و سطح روبروی آن دهنه های تحریک را نشان می دهند. با استفاده از مقادیر میدانها, امپدانس در دهنه ها و پارامترهای S در حالتهای مختلف استخراج می گردد.

تحلیل موجی کامل و استخراج پارامترهای S

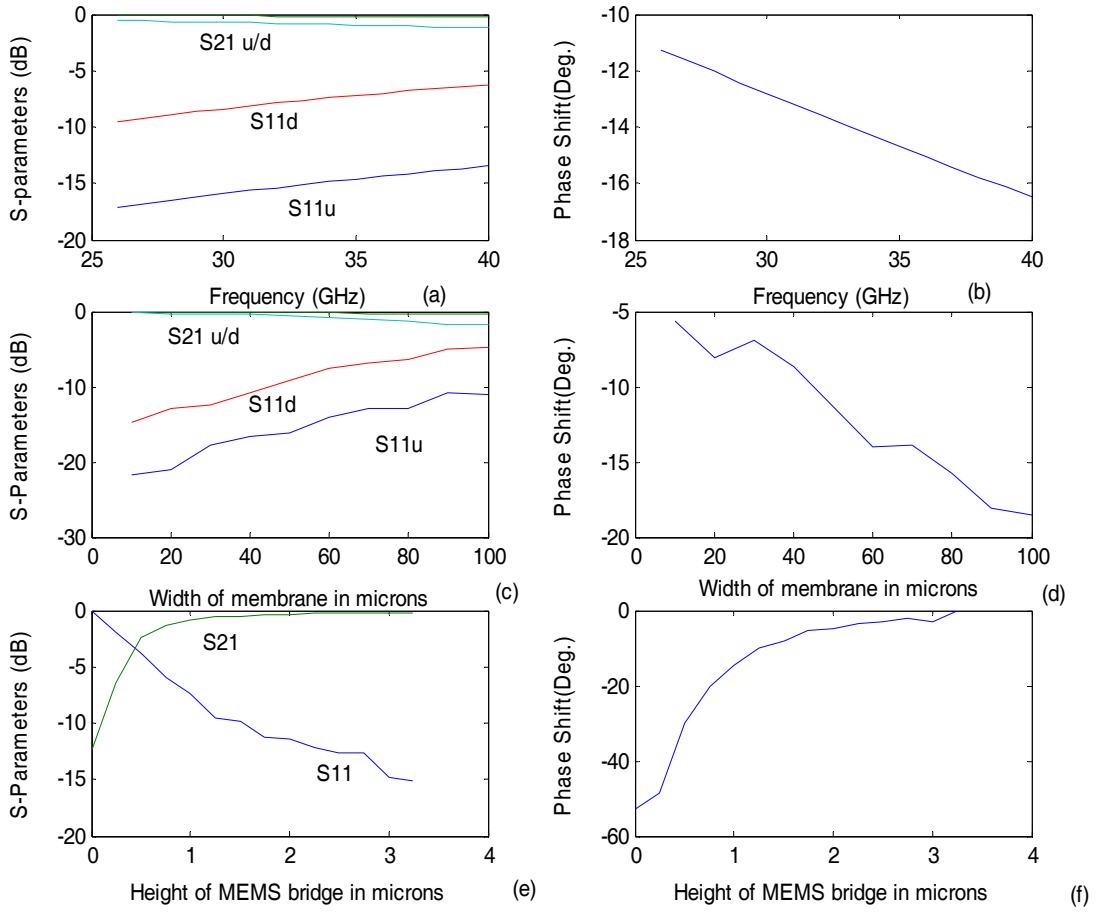
برای آنکه سوئیچ MEMS ساخته شده بر روی CPW عملکرد مطلوب را داشته باشد مناسب آن است که هادی وسطی نازکتر از هادیهای کناری ساخته شود. روشن است که در چنین حالتی روشهای تحلیل که بر مبنای یکسان بودن ضخامت هادیها ارائه شده اند دیگر کارائی لازم را نداشته و استفاده از روش تحلیل موجی کامل ضروری می نماید. مشخصات هندسی و فیزیکی سلول واحد بدین ترتیب است: پهنای هادی مرکزی و شکاف بین

آن بصورت ۹۰ /۱۲۰ /۹۰ = G/W/G (ابعاد همگی بر حسب میکرون هستند) و هادیهای کناری با پهنای ۱۰۰ در نظر گرفته می شوند. ضخامت هادی مرکزی ۰/۵ وهادیهای کناری ۴ می باشند. زیر لایه با ضخامت ۵۰۰ واز جنس سیلیکن با ضریب دی الکتریک نسبی ۱۱/۹ بوده و جنس هادیها طلا با ضریب هدایت $۴/۱ * ۱۰^{۷}$ زیمنس بر متر لحاظ شده اند. جعبه ای به ابعاد ۳۶۰ * ۱۰۰۰ *۵۰۰ برای حل در نظر گرفته شده است. دی الکتریک با ابعاد ۱۰۰ * ۱۲۰ با ضریب دی الکتریک نسبی ۷ و ضخامت ۰/۲۵ و لایه فلزی با طول $L_m = ۳۰۰$ و $w_m = ۶۰$ و $t_m = ۰/۵$ منظور شده است. سلول واحد به همراه ابعاد آن در شکل (۲) مشاهده می شود. تمام این ساختار به صورت دقیق و به همراه ابعاد و جنس مواد به نرم افزار HFSS با روش مناسب خود معرفی می شود. HFSS با روش عناصر اجزاء محدود آنالیز موجی را انجام داده و میدانها در نقاط این ساختار بدست می آید. از روی میدانها با استفاده از روابط (۵) پارامترهای S محاسبه می شود که داده های پایه برای طراحی است. لازم به ذکر است که مزیت اصلی HFSS نه تنها استفاده از روش FEM که مش بندی بهینه می باشد.

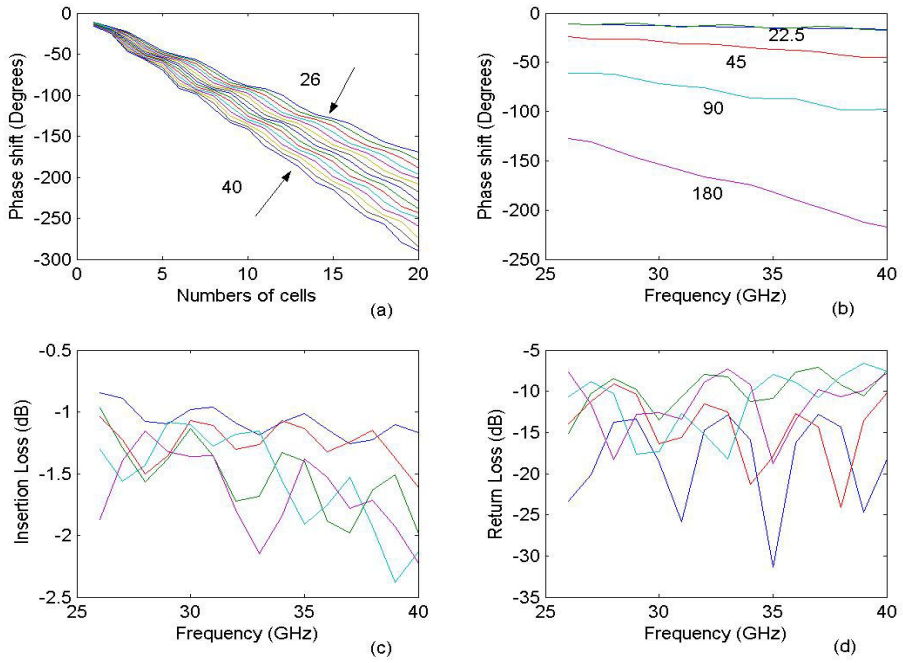


شکل۲ : ابعاد و شکل سلول واحد در تحلیل موجی کامل.

با استفاده از نتایج تحلیل به روش عناصر محدود توسط HFSS پارامتر های S در محدوده فرکانسی GHz ۴۰ –۲۶ استخراج شده است. نتایج در حالتهای بالا با ارتفاع ۳/۲۵ و پائین با ارتفاع ۱/۰۷۵ در شکل (۳) بر حسب فرکانس رسم شده است برای آنکه اثر ابعاد هندسی در پارامترهای S معلوم گردد و در طراحی بتوان ازآنها کمک گرفت مقادیر آنها بر حسب تغییرات پهنا و ارتفاع لایه بدست آمده و در شکل (۳) بصورت ترسیمی دیده می شود. مبنای طراحی در تغییر دهنده های فاز DMTL همین پارامتر های S و نحوه تغییرات آنها با ابعاد فیزیکی می باشد. براحتی از منحنی های شکل (۳) دیده می شود که هر چه پهنای لایه بیشتر گردد اختلاف فاز بالاتری ایجاد می گردد اما تلفات نیز زیاد می شود همچنین کاهش ارتفاع لایه نیز باعث افزایش اختلاف فاز می گردد در عوض اتلاف را بالا می برد و به ولتاژ بایاس بیشتری نیاز دارد. علت افزایش فاز را می توان چنین توجیه نمود که: لایه به همراه هادی مرکزی CPW بصورت یک خازن مسطح موازی عمل می کند. افزایش پهنا و کاهش ارتفاع هر دو باعث افزایش ظرفیت خازنی می گردد. فاز S_{21} یک خازن موازی از رابطه $\Delta\varphi = -\tan^{-1}(\frac{c\omega z_0}{2})$ بدست می آید. دیده می شود که افزایش ظرفیت موجب بیشتر شدن اختلاف فاز می گردد. با در گرفتن تمام عوامل، لایه با پهنای ۶۰ و ارتفاع ۲۵ /۳ برای حالت بالا و ارتفاع ۱/۰۷۵ برای حالت پائین مناسب به نظر می رسد. برای تبین لزوم بکارگیری آنالیز موجی کامل مدل خازن موازی بعنوان یک ادمیتانس و طرفین را بصورت خط انتقال فرض می گیریم. اگر مدل فوق را برای سلول واحد در نظر بگیریم اولین مشکل تعیین سطح خازن است که در رابطه ظرفیت خازن مسطح قرار گیرد به ناچار قسمت روی به روی هم لایه و هادی مرکزی را باید در نظر بگیریم. در اینجا ۶۰ در ۱۲۰ می باشد فاصله نیز ۳/۵ برای هوا و ۰/۲۵ برای دی الکتریک است. ظرفیت خازن با این مشخصات Pf ۰/۰۲ بدست می آید. فاز S_{21} برای در فرکانس GHz ۳۰ , ۵/۴ درجه بدست می آید برای خطوط انتقال طرفین با طول ۱۵۰ میکرون اختلاف فاز ۱۰/۸درجه بدست می آید که اختلاف فاز کل ۱۶/۲ خواهد بود در حالی اختلاف فاز برای سلول واحد از روی شکل (۳) و قسمت b تقریبا ۱۲/۵ درجه بدست می آید که تفاوت فاحشی را نشان می دهد. بنابراین آنالیز موجی کامل ضروری می باشد. با توجه به این موضوع دربخش بعد طراحی تغییر دهنده فاز n بیتی را با استفاده از این نتایج انجام می دهیم.



شکل ۳ : پارامتر های S سلول واحد (a) پارامتر های S در حالتهای بالا و پائین (b) اختلاف فاز (c) حساسیت پارامتر های S بر حسب پهنای لایه (d) تغییرات فاز (e) حساسیت ها بر حسب ارتفاع (f) تغییرات فاز .



شکل ۴ : (a) اختلاف فاز در فرکانسهای مختلف (b) اختلاف فاز تغییر دهنده های تک بیتی (c) تلفات داخلی (d) افت بر گشتی.

طراحی تغییر دهنده فاز n بیتی DMTL

با استفاده از پارامترهای S سلول واحد حاصل از روش تحلیل موجی کامل بخش قبل و تئوری مدارهای مایکروویو می توان مشخصات تغییر دهنده فاز را بدست آورد. سلول واحد را بعنوان دو قطبی با پارامتر های S معلوم در نظر می گیریم در واقع تغییر دهنده فاز متشکل از بهم بستن متوالی چندین دو قطبی خواهد بود. بهترین روش در چنین حالتی استفاده از ماتریس انتقال T است که از ضرب آنها می توان براحتی ماتریس انتقال کل را محاسبه کرد. تاخیر فاز N سلول واحد را از همین روش محاسبه کرده ودر فرکانس GHz ۳۳ به ازای مقادیر مختلف N در شکل (۴) رسم کرده ایم . از منحنی شکل (۴) دیده می شود که هر کدام از تغییر دهنده های فاز یک بیتی ۱۱/۲۵ ، ۲۲/۵، ۴۵، ۹۰ ، ۱۸۰ درجه را می توان بترتیب با تعداد۱ و ۲ و ۴و ۸ و ۱۶ سوئیچ MEMS برروی CPW تحقق بخشید. بگونه ای که در حالتها و فرکانسهای مختلف از حیث سایر پارامترها از جمله تلفات داخلی و افت بر گشتی نیز قابل قبول باشد. در نهایت تعداد سوئیچها ۳۱ خواهد بود که با آنها می توان تمام حالتهای تغییر دهنده فاز n (۵، ۴ ، ۳ ، ۲ =n)بیتی را بدست آورد. برای بدست آوردن مشخصات در حالتهای مختلف از رابطه زیر استفاده می کنیم :

$$T_t = T_d^{nd} \times T_u^{nu}$$

(۶)

که در آن T_u و T_d ماتریسهای انتقال و n_u و n_d تعداد سلولهای واحد در حالتهای بالا و پائین می باشند. ماتریس S از ماتریس انتقال کل در هر حالت محاسبه شده و تاخیر فاز از تفاضل فاز S_{21} در حالتهای مختلف معلوم می گردد. بنابراین می توان تغییر دهنده فاز ۲ بیتی را با ۹۰و۱۸۰ درجه ، ۳ بیتی را با ۴۵ و۹۰ و۱۸۰ درجه ، ۴ بیتی را با ۲۲/۵ و۴۵و۹۰و۱۸۰ درجه وبالاخره ۵ بیتی را با ۱۱/۲۵ و ۲۲/۵ و۴۵و۹۰و۱۸۰ و ترکیب آنها طراحی نمود. با طراحی یک شبکه بایاس مناسب حتی می توان از یک ساختار با کنترل و تنظیم حالتهای مختلف ولتاژ DC تغییر دهنده فاز با تعداد بیت دلخواه بدست آورد یعنی وقتی که تغییر دهنده فاز با این روش طراحی و ساخته شد می توان از آن بعنوان تغییر دهنده فاز دو یا سه یا چهار یا پنج بیتی استفاده نمود. برای توضیح در چگونگی طراحی تغییر دهنده فاز لازم به ذکر است که, طراحی با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترهای S بر حسب ابعاد (منحنی های شکل (۳ , f , e, d , c)) بعمل می آید مثلا از منحنی شکل (۳) قسمت f به ازای ارتفاع یک میکرون و پهنای ۶۰ میکرون لایه اختلاف فاز S_{21} تقریبا ۱۵- درجه حاصل می شود. از متوالی بستن چند سلول می توان اختلاف فاز مضارب ۱۵- درجه را بدست آورد

لازم به ذکر است که روش طراحی فوق را می توان در فرکانسهای دیگر نیز بکار گرفت. با توجه به آنالیز حساسیتها (منحنیهای شکل) می توان ابعاد لایه و موجبر هم صفحه را چنان انتخاب نمود که مشخصات مورد نظر از جمله انتقال فاز و تلفات داخلی و افت بر گشتی حاصل آید. با تکرار فرآیند طراحی تغییر دهنده فاز با فاز دیجیتالی دلخواه در فرکانسهای مختلف بدست آورد. بعنوان مثال جدول (۱) برای تمام ۱۶ حالت مختلف تغییر دهنده فاز ۴ بیتی ؛ تلفات داخلی ؛ افت بر گشتی و خطای فاز را در فرکانس GHz ۳۳ (فرکانس مرکزی) را نشان می دهد. برای توضیح در مورد منحنی های شکل (۴) قسمتهای b,a فاز حاصل از اعمال HFSS به سلول واحد و محاسبه ماتریس S کل, جدول (۱) برای چهار بیتی حاصل می شود. محاسبات مربوط به S کل با استفاده از خروجی آنالیز موجی کامل با HFSS , با M فایلهای نوشته شده در مطلب انجام شده است. این مقادیر وقتی توسط مطلب رسم می شوند شکلهای مذکور ایجاد می شود. بنابراین نقاط با مقادیر گسسته بهم وصل می شود. روشن است که مثلا تعداد سلول ۵/۴ نداریم تا انتظار داشته باشیم که اختلاف فاز تقریبا ۳۳/۳۹ ایجاد گردد.

نکته مهم دیگر کوپلینگ است. می توان گفت که : ابعاد ساختار با استفاده از آنالیز حساسیت پارامترهای S چنان انتخاب شده اند که مقدار S_{11} تا حد ممکن کوچک گردد و انعکاس حداقل شود (شرط تطبیق که بسیار مهم است و بدون آن, فازها برای شبکه های متوالی جمع نمی شود. به روابط پارامترهای S دو شبکه متوالی توجه شود) چون انعکاس کم است بنابراین کوپلینگ معکوس نیز کم خواهد بود. آنالیز دو سلول واحد بعنوان یک ساختار نیز نتایج حاصل از یک سلول و ضرب آنها برای بدست آوردن پارامترهای کل, این موضوع را تائید می کند. روشن است آنالیز موجی کامل تمام ساختار تغییر دهنده فاز به خاطر ناهمگنی های بسیار زیاد در آن خیلی مشکل و تقریبا غیر ممکن خواهد بود علاوه بر آن در چنین روندی

ساختار متناوب تغییر دهنده فاز لحاظ نخواهد شد.

جدول ۱ : فاز و افت تغییر دهنده فاز ۴ بیتی در فرکانس GHz ۳۳.

افت بر گشتي (dB)	تلفات داخلي (dB)	خطاي فاز (درجه)	فاز از محاسبه (درجه)	حالت فاز (درجه)
۸/۲۲	۱/۶۹	۰/۰	۰/۰	۰/۰
۱۲/۵۲	۱/۲۶	۲/۲۶	۲۰/۲۴	۲۲/۵
۹/۲۳	۱/۶۰	۱/۲۶	۴۶/۲۶	۴۵
۱۳/۶۱	۱/۱۶	۲/۱۴	۶۵/۳۶	۶۷/۵
۱۸/۲۶	۱/۲۷	۲/۲۷	۹۲/۲۷	۹۰
۱۴/۳۷	۱/۸۰	۲/۶۸	۱۱۵/۱۸	۱۱۲/۵
۸/۷۲	۱/۳۶	۱/۸۴	۱۳۶/۸۴	۱۳۵
۱۳/۵۷	۲/۱۵	۳/۴۸	۱۶۰/۹۸	۱۵۷/۵
۷/۲۸	۱/۶۵	۱/۲۱	۱۸۱/۲۱	۱۸۰
۱۰/۲۶	۲/۱۲	۰/۱۵	۲۰۲/۶۵	۲۰۲/۵
۱۰/۳۴	۱/۶۹	۲/۸۸	۲۲۷/۸۸	۲۲۵
۲۳/۱۵	۱/۴۳	۰/۶۹	۲۴۶/۸۱	۲۴۷/۵
۱۲/۰۷	۱/۶۱	۴/۳۶	۲۷۴/۳۶	۲۷۰
۹/۹۱	۱/۹۵	۲/۸۲	۲۹۵/۳۲	۲۹۲/۵
۱۲/۱۴	۱/۶۷	۴/۸۵	۳۱۹/۸۵	۳۱۵
۷/۴۱	۲/۴۴	۴/۴۵	۳۴۱/۹۵	۳۳۷/۵

نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل و طراحی تغییر دهنده فاز n بیتی MEMS توزیع شده بخاطر ساختار متناوب آن با استفاده از مفهوم سلول واحد انجام گرفت. مدل الکترومغناطیسی و تحلیل موجی کامل سلول واحد با نرم افزار HFSS انجام وپارامترهای S آن استخراج گردید. با استفاده از این پارامترها عملکرد کلی تغییر دهنده فاز n بیتی با استفاده از تئوری مدارهای مایکروویو بدست آمد. با توجه به این نکته که تمام ۳۲ حالت با ترکیب مناسب از تغییر دهنده های تک بیتی ۱۱/۲۵ و ۲۲/۵ و ۴۵ و ۹۰ و۱۸۰ درجه حاصل می شود. آنها را بطور کامل مورد بررسی قرار داده ایم. مقادیر تلفات داخلی و افت بر گشتی و انتقال فاز در تمام ۱۶ حالت در محدوده فرکانسی GHz ۴۰ –۲۶ بطور کامل محاسبه گردید. تلفات داخلی متوسط dB ۱/۶۸ و افت بر گشتی متوسط dB ۱۱/۹۴ و خطای متوسط ۲/۳۳درجه بدست آمد که در مقایسه با منابع موجود نتیجه خوبی محسوب می شود. بدلیل اینکه تغییر دهنده های فاز در کنار وبه همراه عناصر دیگر در مدارات فرکانس بالا مورد استفاده قرار می گیرد توصیف آن با پارامترهای S در طراحی به کمک کامپیوتر (CAD)[۶] از اهمیت ویژه ای بر خوردار است. مشخصات این تغییر دهنده فاز از جمله تلفات داخلی, افت بر گشتی, خطای فاز با نتایج چندین منبع در جدول (۲) مقایسه شده است. هر کدام از منابع مذکور فقط برای تغییر دهنده فاز با تعداد بیت خاص انجام شده است. همچنین در آنها از مدل فشرده عناصر استفاده شده است. اگر هم آنالیز موجی بکار رفته است برای بدست آوردن مقادیر این عناصر است. مزیت روش ما ترکیب مناسب آنالیز موجی و تئوری مدارهای مایکروویو و بکارگیری ساختار متناوب است و بطور یکجا برای هر چند بیتی می تواند بکار رود.

جدول ۲ : مقایسه نتایج با منابع مختلف.

مرجع	نوع: چند بیتی	تلفات داخلی (dB)	افت بر گشتی (dB)	خطای فاز (درجه)	فرکانس (GHz)
[۴]	۲ بیتی	-۰/۹	-۱۱	۳	۱۱/۴
[۵]	۳ بیتی	-۱/۷	-۷	۵	۲۶
[۶]	۴ بیتی	-۲/۸	-۱۵	۲/۸	۴۵
[۷]	۵ بیتی	-۴/۳	-۱۰	۳/۵	۱۲
این کار	۲ بیتی ۳ بیتی ۴ بیتی ۵ بیتی	-۱/۴۶ -۱/۵۳ -۱/۶۸ -۱/۶۳	-۱۲/۷ -۱۱/۷ -۱۱/۹ -۱۱/۷	۲/۶ ۲/۳۴ ۲/۳۳ ۲/۲۵	۳۳ ۳۳ ۳۳ ۳۳

مراجع

1 - Vijay, K. Varadan, Vinoy, K. J. and Jose, K. A. (2003). *RF MEMS and Their Applications*. John Wiley & Sons.

2 - Hayden, J. S. and Rebeiz, G. M. (2000). "*Low-Loss cascadable MEMS distributed X-band phase shifters*." *IEEE Microwave and Guided Wave Letters,* Vol. 10, No.4, PP. 142-144.

3 - Barker, N. S. and Rebeiz,. G. M. (2000). "Optimization of distributed MEMS transmission-line phase shifters --- U-band and W-band designs." *IEEE Trans. MTT,* Vol. 48, No. 11, November, PP. 1957-1966.

4 - Hayden, J. S. and Rebriz, G. M. (2000). "2-Bit MEMS distributed X-band phase shifters." *IEEE Microwave and Guided Wave Letters,* Vol. 10, No. 12, December, PP.540-542.

5 - Liu, Yu, Borgioli, Andrea, Nagra, Amit S. and York, Robert A. (2000). "K-band 3-Bit low-loss distriduted MEMS phase shifter." *IEEE Microwave and Guided Wave Letters,* Vol. 10, No.10, October, PP.415-417.

6 - Kim, Hong-Teuk., Park, Jae-Hyoung., Lee, Sanghyo., Kim, Seongho., Kim, Jung-Mu., Kim, Yong-Kweon and Kwon, Youngwoo. (2002). "*V-band 20b and 4-b low-loss and low-voltage distributed MEMS digital phase shifter using metal-air-metal capacitors*." *IEEE Trans. MTT,* Vol.50, No. 12, December, PP.2918-2923.

7 - Ko Young J., Park, Jae Y., Kim, Hong T. and Bu, Jong U. (2003). "Integrated five-bit RF MEMS phase shifter for satellite broadcasting/communication systems." *IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, MEMS-03 Kyoto Volume, Issue, 19-23 Jan. PP. 144 – 148.

8 - Lee, Sanghyo., Park, Jae-Hyoung., Kim, Hong Teak., Kim, Jung-Mu., Kim, Yong-Kweon, and Kwon, Young Woo . (2004). "Low-loss analog and digital refection-type MEMS phase shifters with 1:3 bandwith." *IEEE Trans. MTT*, Vol. 52, No.1, January, PP.211-220.

9 - Pierantoni, Luca. Farina, Marco., Rozzi, Tullio., Coccetti, Fabio., Dressel, Wolfgang, and Peter. (2002). "Comparison of the efficiency electromagnetic solvers in the time and frequency domain the accurate modeling of planar circuits and MEMS." *IEEE MTT-S Digest.*

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - MicroElectroMechanical Systems (MEMS)

2 - Distributed Microelectromechanical-system Transmission Line (DMTL)

3 - Co-Planar Waveguide (CPW)

4 - High Frequency Structure Simulator (HFSS)

5 - Finite Element Method (FEM)

6 - Computer Aided Design (CAD)