

طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی یک سلول واحد سه‌حالتی برای شیفتهنده فاز ۶ بیتی MEMS از نوع DMTL با رویکرد کاهش اندازه و تلفات

سیدمجید تیموری^۱، مسعود دوستی^۲، سعید افرونگ^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران m_dousti@srbiau.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق الکترونیک، دانشگاه ارومیه

چکیده

شیفتهنده فاز به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی ادواتی نظیر رادارها و سیستم‌های آرایه فازی محسوب می‌شود. در این مقاله طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی یک شیفتهنده فاز ۶ بیتی با اندازه بسیار کوچک و تلفات پایین با استفاده از فناوری MEMS ارائه می‌شود. ساختار پیشنهادی از ۱۷ سلول واحد که هر سلول قابلیت تولید سه شیفتهنده فاز ۵/۶۲۵، ۱۱/۲۵ و ۲۲/۵ درجه را دارد، تشکیل شده است. سلول واحد پیشنهادی شامل یک خط انتقال موج بر هم‌صفحه، یک پل MEMS و دو پل فلز هوا فلز است که از نظر الکتریکی به‌صورت سری به هم متصل هستند. در سه مرحله مختلف این پل‌ها با اعمال ولتاژ تحریک شده و ترکیب الکتریکی آن‌ها ظرفیت خازنی خط انتقال را تغییر داده و شیفتهنده فاز موردنظر را ایجاد می‌کند. شیفتهنده فاز پیشنهادی با استفاده از روابط حاکم بر شیفتهنده‌های فاز خط انتقال توزیعی و با استفاده از نرم‌افزار متلب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و برای صحت‌سنجی نتایج، ساختار ارائه‌شده با استفاده از نرم‌افزار فرکانس بالای ANSOFT HFSS شبیه‌سازی شده است. نتایج محاسبات و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شیفتهنده فاز ۶ بیتی طراحی شده با اندازه ۸/۵ میلی‌متر دارای میانگین تلفات ۱/۲ dB و خطای فاز مؤثر ۱/۳۵ درجه است.

کلیدواژه

شیفتهنده فاز، تلفات جای‌گزینی و بازگشتی، MEMS، DMTL

مقدمه

شیفتهنده فاز شد که به دلیل قابلیت‌های بالای این فناوری جایگاه بسیار مهمی در کاربردهایی نظیر سیستم‌های راداری و مخابرات ماهواره‌ای و سیستم‌های دفاعی پیدا کرد. عملکرد با تلفات پایین در فرکانس‌های بالا بخصوص 8-100 GHz، افزایش میزان ایزولاسیون (تلفات بازگشتی خیلی کم)، توان مصرفی DC بسیار پایین و خطینگی بسیار بالای شیفتهنده‌های فاز MEMS نسبت به نوع نیمه‌رسانای آن با فناوری سوئیچ‌های MMIC [۲-۳]، محبوبیت و قابلیت بالایی به آن داده است. درکنار این مزایا، اندازه بزرگ شیفتهنده‌های فاز MEMS از مهم‌ترین چالش‌های فناوری RF MEMS به‌شمار می‌آید [۴]. شیفتهنده‌های فاز MEMS به دو دسته کلی آنالوگ و دیجیتال دسته‌بندی می‌شوند که با توجه به امکان تحقق شیفتهنده‌های بزرگ‌تر و مکانیسم ساده‌تر، نوع دیجیتال آن از طرف محققان مورد اقبال بیشتری قرار گرفته است. پیاده‌سازی شیفتهنده‌های فاز MEMS معمولاً به چهار روش

نزدیک به نیم‌قرن از ظهور فناوری سامانه‌های ریز الکترومکانیکی^۱ موسوم به فناوری MEMS می‌گذرد. این فناوری به موضوع طراحی و ساخت ادوات و سیستم‌های مینیاتوری با استفاده از فناوری ساخت مدارهای مجتمع می‌پردازد. کاربردهای بسیار گسترده فناوری MEMS که شامل حوزه‌های مختلفی از جمله هوافضا، دستگاه‌های مخابراتی، خودرو، حمل‌ونقل، ادوات و تجهیزات پزشکی، ادوات الکترونیک و قطعات صنعتی می‌شود، این فناوری را موردتوجه بسیاری از کارشناسان و طراحان ادوات الکترونیکی قرار داده است [۱]. یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربردی فناوری MEMS که تأثیرات شگرفی بر آن داشته است حوزه سیستم‌های مخابراتی است که از آن به سامانه ریز الکترومکانیکی فرکانس رادیویی یاد می‌شود و به‌اختصار RF MEMS نامیده می‌شود. توسعه فناوری RF MEMS باعث تحقق ادوات مهم و پرکاربردی نظیر

^۱ Micro Electro Mechanical Systems

بیتی و همچنین تلفات کل می‌شود. مقاله شامل سه بخش اساسی است. ابتدا ساختار پیشنهادی به همراه روابط ریاضی حاکم معرفی می‌شود. بخش بعدی شامل صحت‌سنجی و تحلیل ریاضی ساختار پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار متلب است. شبیه‌سازی‌های لازم برای نشان دادن عملکرد صحیح طراحی پیشنهادی در بخش سوم مطرح می‌شود و در نهایت مقایسه‌ای بین شیفتهنده‌های فاز موجود و شیفتهنده فاز با طرح جدید و پیشنهادی صورت گرفته و مزایای طرح جدید نشان داده می‌شود.

ساختار سلول واحد پیشنهادی

برای طراحی یک شیفتهنده فاز DMTL از نوع خازنی روی یک خط انتقال موج بر هم‌صفحه معمولاً از سلول واحد شکل ۱ استفاده می‌شود. مطابق این شکل، سلول واحد مرسوم از یک پل MEMS که روی یک خط انتقال CPW سوار شده است، تشکیل می‌شود. خازن‌های استاتیک واقع در طرفین پل MEMS برای تطبیق امپدانس بهتر و کاهش تلفات بازگشتی استفاده می‌شود. ترکیب سری دو خازن پل MEMS و خازن استاتیک، ظرفیت خازنی قبل از تحریک را نشان می‌دهد. با تحریک پل MEMS و قرار گرفتن آن در حالت down، ظرفیت خازنی پل افزایش بسیار زیادی داشته و ترکیب سری این دو خازن معادل همان خازن استاتیکی می‌شود. تغییر ظرفیت خازن خط انتقال باعث تغییر سرعت موج و در نتیجه ایجاد شیفتهنده فاز می‌شود. نسبت ظرفیت خازنی بعد از تحریک به حالت قبل از تحریک مقدار شیفتهنده فاز را مشخص می‌کند رابطه ۱ رابطه شیفتهنده فاز یک شیفتهنده فاز DMTL را نشان می‌دهد [۱]:

$$\Delta\phi = \frac{360 \times s \times f \times Z_0 \times \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}{c} \left(\frac{1}{Z_{\text{down}}} - \frac{1}{Z_{\text{up}}} \right) \quad (1)$$

که در آن، $\Delta\phi$ مقدار شیفتهنده فاز بر حسب درجه، s طول سلول واحد، f فرکانس کار، Z_{up} و Z_{down} به ترتیب امپدانس‌های خط انتقال بعد و قبل از تحریک سوئیچ، c سرعت نور، ϵ_{reff} ضریب دی‌الکتریک نسبی مؤثر ماده زیرلایه و Z_0 امپدانس مشخصه خط انتقال بدون حضور پل‌های MEMS و MAM^۶ است. با تحریک سوئیچ، مقدار ظرفیت خازنی بازگشتی خط انتقال و در نتیجه امپدانس آن تغییر می‌کند (رابطه ۲).

$$Z_{\text{load}} = \sqrt{\frac{sL_t}{sC_t + C_{\text{load}}}} \times \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{\text{Bragg}}}\right)^2} = \sqrt{\frac{sL_t}{sC_t + C_{\text{load}}}} \times x \quad (2)$$

انعکاسی^۲ [۵]، سوئیچ خط انتقال^۳ [۶]، خط انتقال بارگذاری شده^۴ [۷] و خط انتقال توزیع‌شده^۵ [۸-۱۲] که به DMTL معروف است، انجام می‌شود. با توجه به عدم پیچیدگی ساختاری و مدل‌سازی ساده و دقیق روش خط انتقال توزیع شده، تمرکز طراحان بیش‌تر بر شیفتهنده‌های فاز DMTL می‌باشد. با توجه به لزوم طراحی شیفتهنده‌های فاز دیجیتال با تعداد بیت بالا برای دقت بیش‌تر و افزایش بسیار زیاد تعداد سلول‌های واحد لازم (۳۲ سلول برای نوع ۵ بیتی و ۶۴ سلول برای نوع ۶ بیتی)، امروزه چالش اصلی در طراحی شیفتهنده‌های فاز DMTL بر کاهش اندازه و تلفات استوار است. برای تحقق یک شیفتهنده فاز با اندازه کوچک لازم است که یک سلول واحد با قابلیت شیفتهنده فاز بزرگ طراحی شود و این کار مستلزم افزایش نسبت ظرفیت خازنی (ظرفیت خازن بعد از تحریک به خازن قبل از تحریک) است و این کار باعث از بین رفتن تطبیق امپدانس و در نتیجه زیاد شدن تلفات بازگشتی می‌شود [۱۳]. در طی سال‌های گذشته راه‌کارهای مختلفی برای کاهش اندازه شیفتهنده فاز دیجیتال چندبیتی ارائه شده است. روش سلول واحد خازنی-سلفی برای طراحی سلول واحد با شیفتهنده فاز بزرگ‌تر در سال ۲۰۰۸ ارائه شد [۱۴-۱۵] در این روش از دو عنصر سلف و خازن به‌طور هم‌زمان برای شیفتهنده فاز استفاده می‌شود. شیفتهنده فاز بزرگ ۴۵ درجه برای یک سلول واحد از ویژگی‌های این روش است. تکنیک طراحی شیفتهنده فاز با دو سلول واحد مختلف [۱۶] و سلول واحد با قابلیت ایجاد دو شیفتهنده فاز مختلف [۱۷] روش‌های دیگری بود که تکنیک کاهش تعداد سلول واحد را ارائه دادند. در روش ارائه شده در [۱۷] با استفاده از ساختار سوئیچ جدید و دومرحله‌ای، از یک سلول واحد دو شیفتهنده فاز مستقل به‌دست می‌آید و در نتیجه اندازه نهایی ساختار به نصف کاهش می‌یابد. کاهش تلفات به دنبال کاهش اندازه از مزایای این روش است.

در مقاله حاضر روش جدیدی برای کاهش اندازه و تلفات شیفتهنده فاز DMTL ارائه می‌شود. ایده اصلی روش جدید بر طراحی سلول واحد سه‌حالتی استوار است که قادر است سه شیفتهنده فاز مختلف را در یک سلول واحد انجام دهد. بالطبع، با قابلیت سه‌حالتی بودن سلول واحد، تعداد کل سلول‌های لازم برای پیاده‌سازی یک شیفتهنده فاز با بیت بالا به‌شدت کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای یک شیفتهنده فاز ۶ بیتی، تعداد سلول‌های لازم از ۶۴ عدد در حالت طراحی معمول به ۱۷ سلول در حالت طراحی جدید کاهش یافته و این امر باعث کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در اندازه کلی شیفتهنده فاز ۶

⁶ Co-Planar Waveguide (CPW)

⁷ Metal-Air-Metal

² Reflected

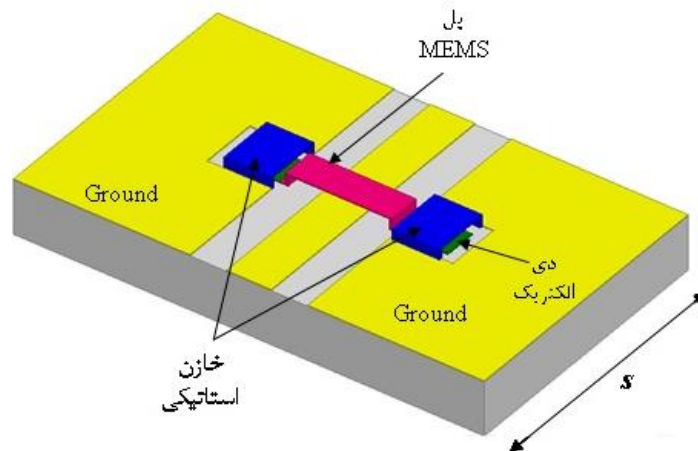
³ Switched Line

⁴ Loaded Line

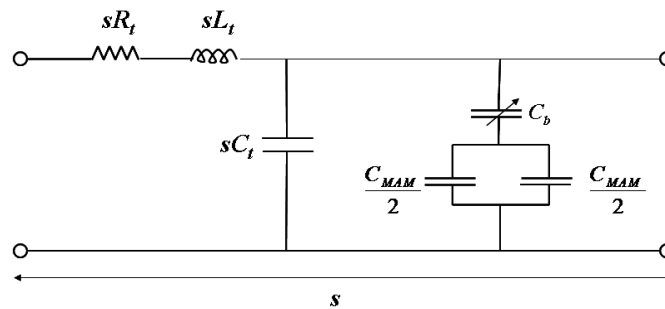
⁵ Distributed MEMS Transmission Line

خط انتقال در آن فرکانس صفر می‌شود) و C_{load} میزان بارگذاری خط انتقال است.

در رابطه (۲)، L_t و C_t به ترتیب اندوکتانس و ظرفیت خازنی خط انتقال، f_{Bragg} فرکانس براگ (فرکانسی که امپدانس



الف



ب

شکل ۱. سلول واحد مرسوم برای شیفت‌دهنده فاز DMTL (الف) ساختار فیزیکی (ب) مدار معادل الکتریکی

وجود سوئیچ‌ها به راحتی حل شده است. استفاده از خازن استاتیکی به عنوان یکی از سوئیچ‌ها از مزایای اصلی روش پیشنهادی جدید است. مطابق شکل ۲، سلول واحد پیشنهادی شامل یک پل اصلی MEMS و دو پل MAM در طرفین پل اصلی است. یکی از پل‌های MAM در فاصله بین خط سیگنال و زمین خط انتقال CPW و پل دیگر در داخل زمین خط انتقال قرار دارند. مدار معادل الکتریکی ساختار پیشنهادی در شکل ۲-ب نشان داده است. خازن بارگذاری خط انتقال شامل سه خازن سری (خازن پل اصلی MEMS و ۲ خازن MAM) می‌باشد. در هر مرحله تحریک یک یا دو پل از سه پل موجود، ترکیب سری این سه خازن، مقدار خازن تحریک را مشخص کرده و شیفت فاز موردنظر به دست می‌آید. مکانیسم عملکرد سلول واحد پیشنهادی برای تولید سه شیفت فاز مختلف در شکل ۳ آمده است.

در حالتی که هیچ سوئیچی تحریک نشده باشد، میزان بارگذاری خط انتقال (C_{up}) از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$C_{up} = \left(\frac{1}{C_{MEMS}} + \frac{1}{C_{MAM-1}} + \frac{1}{C_{MAM-2}} \right)^{-1} \quad (3)$$

برای کاهش اندازه کلی یک شیفت‌دهنده فاز چندبیتی، باید اندازه سلول واحد کاهش یابد که این امر به نوبه خود مقدار شیفت فاز را کاهش داده و در نتیجه تعداد سلول‌های بیشتری موردنیاز خواهد بود که با هدف اصلی کاهش اندازه کلی در تضاد است. راه کار دیگر این است که شیفت فاز بزرگ تری در یک سلول واحد به دست آید که این امر مستلزم افزایش بیش از حد نسبت خازنی و در نتیجه از بین رفتن تطبیق امپدانس و افزایش تلفات بازگشتی است.

ساختار پیشنهادی برای کاهش قابل‌ملاحظه در اندازه کلی یک شیفت‌دهنده فاز چند بیتی (به عنوان مثال ۶ بیتی) در شکل ۲-الف نشان داده است. ایده اصلی این ساختار بر مبنای سه حالتی بودن سلول واحد بنا نهاده شده است، به این معنا که این سلول واحد قادر است سه شیفت فاز ۵/۶۲۵ و ۱۱/۲۵ و ۲۲/۵ درجه را تولید کند. برای تولید سه شیفت فاز مختلف در یک سلول واحد نیاز به سه سوئیچ مختلف برای تغییر خازن قبل از تحریک و نیل به شیفت فاز هدف است. وجود سه سوئیچ در یک سلول واحد موجب افزایش اندازه آن می‌شود. با روشی که در این طراحی استفاده شده است، مسأله افزایش اندازه به خاطر

طراحی سلول واحد پیشنهادی

با فرض این‌که شیفتهنده فاز پیشنهادی قرار است در یک سیستم ۵۰ اهم کار کند، لذا امپدانس بارگذاری خط انتقال از رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$Z_{line} = 50 \times \sqrt{\frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}}} \quad (6)$$

در این رابطه تلفات بازگشتی ورودی سیستم ۵۰ اهم و Z_{line} امپدانس بارگذاری است. با فرض حداکثر تلفات بازگشتی ۱۴dB مقدار امپدانس بارگذاری خط انتقال در حالت بدون تحریک و با تحریک برای رسیدن به شیفتهنده فاز ۲۲/۵ در یک سلول واحد به ترتیب ۶۱/۲ و ۴۰/۸ اهم به دست می‌آیند. در شیفتهنده فاز DMTL خازنی امپدانس بارگذاری خط انتقال قبل از تحریک باید از امپدانس بدون بارگذاری آن کمتر باشد. لذا امپدانس خط انتقال قبل از بارگذاری باید بزرگ‌تر از ۶۱/۲ اهم باشد. بدیهی است امپدانس بارگذاری لازم برای شیفتهنده فازهای ۵/۶۲۵ و ۱۱/۲۵ درجه، بین این دو مقدار قرار دارند.

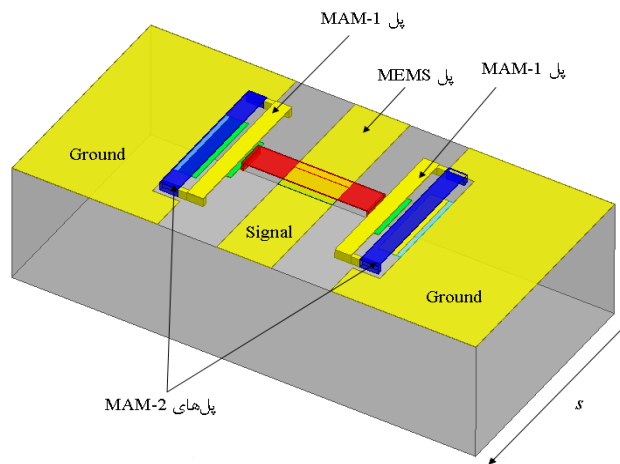
در این رابطه، C_{MEMS} و C_{MAM-2} و C_{MAM-1} به ترتیب ظرفیت خازنی پل‌های MAM-1، MAM-2 و MEMS را نشان می‌دهد. در حالت اول، سوئیچ MAM-1 تحریک شده و ظرفیت خازنی آن به شدت افزایش می‌یابد (با توجه به نوع دی‌الکتریک تا ۷۰ برابر) و خازن بارگذاری معادل سری دو خازن پل اصلی و پل MAM-2 می‌شود (رابطه ۴). در این حالت شیفتهنده فاز ۵/۶۲۵ به دست می‌آید.

$$C_{down1} = \left(\frac{1}{C_{MEMS}} + \frac{1}{C_{MAM-2}} \right)^{-1} \quad (4)$$

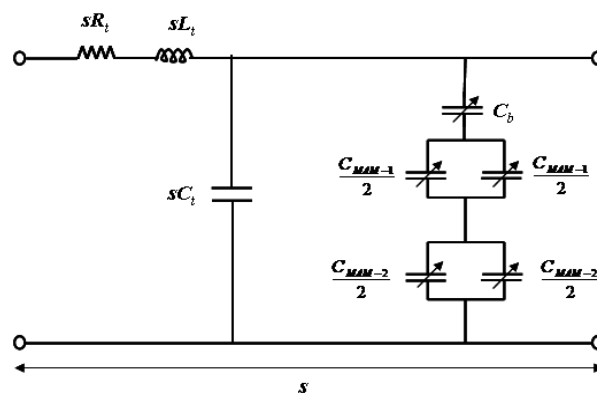
در حالت دوم تنها پل MEMS تحریک شده و خازن معادل سری دو خازن MAM-1 و MAM-2 میزان بارگذاری خط انتقال را تعیین می‌کند (رابطه ۵). در این حالت شیفتهنده فاز ۱۱/۲۵ درجه تولید می‌شود.

$$C_{down2} = \left(\frac{1}{C_{MAM-1}} + \frac{1}{C_{MAM-2}} \right)^{-1} \quad (5)$$

حالت سوم که برای تولید شیفتهنده فاز ۲۲/۵ درجه می‌باشد با تحریک همزمان پل‌های MEMS و MAM-2 انجام شده و خازن بارگذاری معادل خازن پل MAM-1 می‌باشد. در این حالت $C_{down3} = C_{MAM-1}$ خواهد بود.

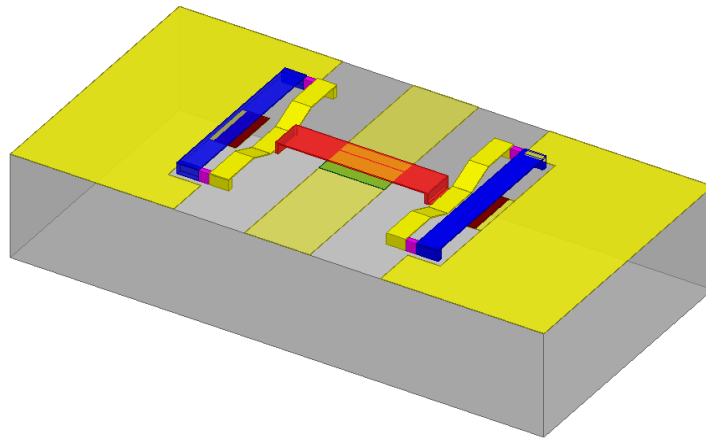


الف

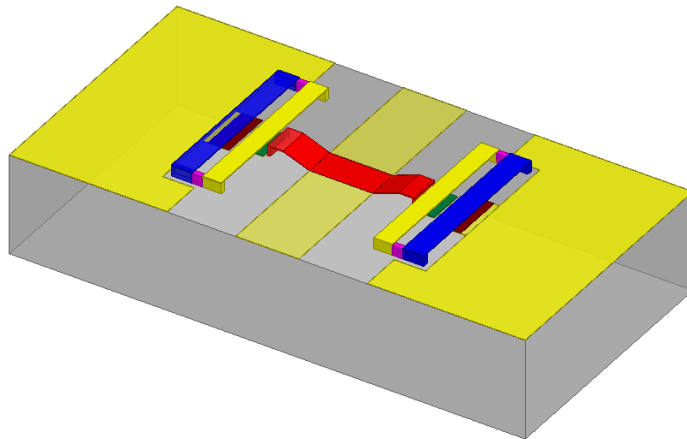


ب

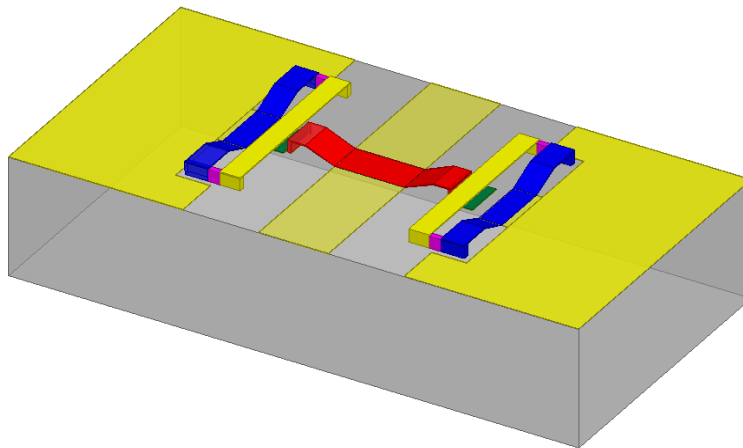
شکل ۳. سلول واحد پیشنهادی برای شیفتهنده فاز (الف) ساختار (ب) مدار معادل الکتریکی



الف



ب



ج

شکل ۴. مکانیسم عملکرد سلول واحد پیشنهادی (الف) حالت اول ۵/۶۲۵ درجه، فقط پل MAM-1 تحریک شده است. (ب) حالت دوم ۱۱/۲۵ درجه، تنها پل MEMS تحریک شده است. (ج) حالت سوم ۲۲/۵ درجه، دو پل MEMS و MAM-2 همزمان باهم تحریک شده‌اند.

کمترین تلفات برای ماده زیر لایه glass در برابر سیلیکان از این ماده به عنوان زیرلایه استفاده شده است [۱۰]. با انتخاب طول $s = 500\mu\text{m}$ برای سلول واحد و باند فرکانسی Ka و

برای تعیین فرکانس کار، امپدانس مشخصه خط انتقال و همچنین طول سلول واحد از رابطه (۱) استفاده می‌شود. با توجه به مشخصه بسیار خوب بالاترین شیفت فاز به ازای

مقادیر خازن‌های C_{MEMS} ، C_{MAM-1} و C_{MAM-2} به ترتیب برابر 43fF، 73fF و 110fF به دست می‌آیند.

با توجه به امپدانس مشخصه $Z_0 = 99 \Omega$ و به منظور نیل به ولتاژ تحریک مناسب برای هر سه پل و همچنین جایابی مناسب برای پل MAM-1، ابعاد خط انتقال CPW به صورت $130\mu\text{m}/120\mu\text{m}/130\mu\text{m}$ انتخاب می‌شود که $120 \mu\text{m}$ طول خط سیگنال و $130 \mu\text{m}$ فاصله خط سیگنال و زمین است.

تحلیل ساختار پیشنهادی

در این بخش پارامترهای پراکندگی و میزان شیفته فاز سلول واحد پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و با کمک روابط ریاضی حاکم بر شیفته‌دهنده‌های فاز DMTL مورد محاسبه قرار می‌گیرد. یکی از ساده‌ترین و مهم‌ترین روش‌های محاسبه پارامترهای پراکندگی استفاده از ماتریس ABCD است. معمولاً برای یک خط انتقال دارای تلفات از شکل ۵ برای محاسبه پارامتر پراکندگی S_{11} استفاده می‌شود.

در شکل ۵، Z_{01} امپدانس مشخصه خط انتقال و Z_{02} امپدانس تطبیق یافته با خط انتقال است. برای یک خط انتقال تطبیق یافته مقدار S_{11} از رابطه (۱۶) به دست می‌آید [۱۸]:

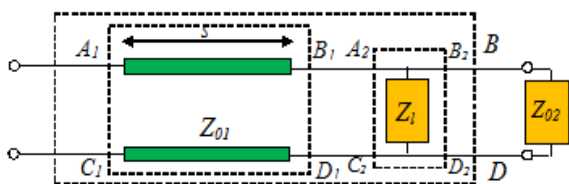
$$S_{11} = \frac{A + Y_{02}B - Z_{02}C + D}{A + Y_{02}B + Z_{02}C + D} \quad (16)$$

ماتریس ABCD خط انتقال دارای تلفات از رابطه (۱۷) قابل محاسبه است:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma s) & Z_{01} \sinh(\gamma s) \\ \frac{1}{Z_{01}} \sinh(\gamma s) & \cosh(\gamma s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_i} & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

در این رابطه، Z_i امپدانس بارگذاری و γ ثابت انتشار مختلط و برابر است با:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \frac{sR_t}{2Z_{01}} + j \frac{\omega}{v_p} \quad (18)$$



شکل ۵. مدل مداری محاسبه پارامتر پراکندگی S_{11}

در این رابطه، α میزان تضعیف، β ثابت انتشار، R_t مقاومت خط انتقال در واحد طول و v_p سرعت انتشار موج است که با رابطه (۱۹) بیان می‌شود:

$$v_p = \frac{s}{\sqrt{sL_t(sC_t + C_b)}} \quad (19)$$

اندوکتانس بر واحد طول و ظرفیت خازنی بر واحد طول خط انتقال و همچنین امپدانس بارگذاری خط انتقال به ترتیب از روابط (۲۰) تا (۲۲) محاسبه می‌شوند.

فرکانس کار ۳۰GHz، مقدار امپدانس مشخصه خط انتقال ۹۹ اهم به دست می‌آید. با استفاده از رابطه (۱)، امپدانس بارگذاری خط انتقال برای شیفته فازهای ۵/۶۲۵ و ۱۱/۲۵ درجه به ترتیب برابر ۵۴ و ۴۹ اهم است.

با استفاده از رابطه (۷) محدوده فرکانس براگ مشخص می‌شود.

$$\frac{f_{Bragg}}{f} = \frac{360}{\pi \Delta \varphi} \times \left(\frac{Z_{up} - Z_{down3}}{Z_{up}} \right) \quad (7)$$

برای شیفته فازهای ۲۲/۵، ۱۱/۲۵ و ۵/۶۲۵ درجه نسبت فرکانس براگ به فرکانس کار به ترتیب ۱/۷ برابر، ۳/۴ برابر و ۶/۸ برابر به دست می‌آید و این امر نشان دهنده فاصله مناسب از ناحیه کار غیرخطی شیفته‌دهنده می‌باشد. رابطه (۸)، معرف رابطه فرکانس براگ است.

$$f_{Bragg} = \frac{1}{\pi \sqrt{sL_t(sC_t + C_b)}} \quad (8)$$

که در این رابطه C_b ظرفیت خازن پل می‌باشد. با ترکیب روابط (۱) و (۸) برای یافتن مقادیر ظرفیت خازنی بارگذاری در چهار حالت بدون تحریک، شیفته فاز ۵/۶۲۵، شیفته فاز ۱۱/۲۵ و شیفته فاز ۲۲/۵ درجه استفاده می‌شود:

$$C_{up} = \frac{(Z_0^2 \times x^2 - Z_{up}^2) Z_{down3}}{Z_0^2 Z_{up}^2 \pi f_{Bragg}} \quad (9)$$

$$C_{down1} = \frac{(Z_0^2 \times x^2 - Z_{up}^2) Z_{down3}}{Z_0^2 Z_{down1}^2 \pi f_{Bragg}} \quad (10)$$

$$C_{down2} = \frac{(Z_0^2 \times x^2 - Z_{up}^2) Z_{down3}}{Z_0^2 Z_{down2}^2 \pi f_{Bragg}} \quad (11)$$

$$C_{down2} = \frac{Z_0^2 \times x^2 - Z_{down3}^2}{Z_0^2 Z_{down3}^2 \pi f_{Bragg}} \quad (12)$$

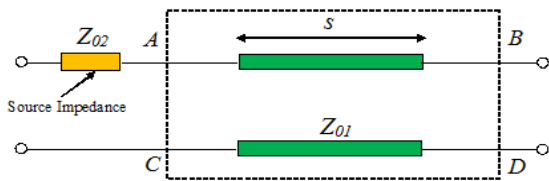
با توجه به روابط (۹) تا (۱۲) و انتخاب فرکانس براگ برای پایین‌ترین امپدانس (بالاترین حالت خازن بارگذاری) مقادیر خازن‌های قبل و بعد از بارگذاری به صورت $C_{up}=20\text{fF}$ ، $C_{down1}=31\text{fF}$ ، $C_{down2}=44\text{fF}$ و $C_{down3}=73\text{fF}$ به دست می‌آیند. در نتیجه می‌توان ظرفیت خازنی پل‌های MEMS و MAM را محاسبه کرد. با توجه به مکانیسم عملکرد ساختار پیشنهادی و روابط (۳) تا (۵)، از روابط (۱۳) تا (۱۵) برای محاسبه استفاده می‌شود.

$$\left(\frac{1}{C_{MEMS}} + \frac{1}{C_{MAM-1}} + \frac{1}{C_{MAM-2}} \right)^{-1} = 20\text{fF} \quad (13)$$

$$\left(\frac{1}{C_{MEMS}} + \frac{1}{C_{MAM-2}} \right)^{-1} = 31\text{fF} \quad (14)$$

$$\left(\frac{1}{C_{MAM-1}} + \frac{1}{C_{MAM-2}} \right)^{-1} = 44\text{fF} \quad (15)$$

با در نظر گرفتن معادلات (۱۳) تا (۱۵) و این نکته که در حالت سوم، خازن C_{MAM-1} به‌عنوان خازن بارگذاری می‌باشد.



شکل ۶. مدل مداری محاسبه پارامتر پراکندگی S_{21}

اختلاف فاز یا شیفت فاز در سلول واحد پیشنهادی از تفاضل فاز S_{21} بعد و قبل از تحریک سوئیچ به دست می‌آید. شکل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب نمودارهای تلفات بازگشتی، تلفات جای‌گزینی و فاز S_{21} سلول واحد سه‌حالتی حاصله از نتایج تحلیل را نشان می‌دهند.

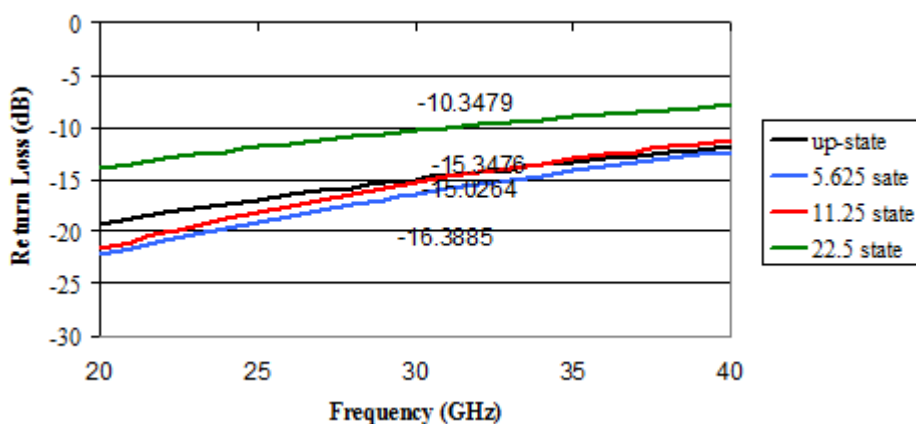
$$L_i = \frac{Z_0 \times \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}{c} \quad (20)$$

$$C_i = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}{Z_0 c} = \frac{L_i}{Z_0^2} \quad (21)$$

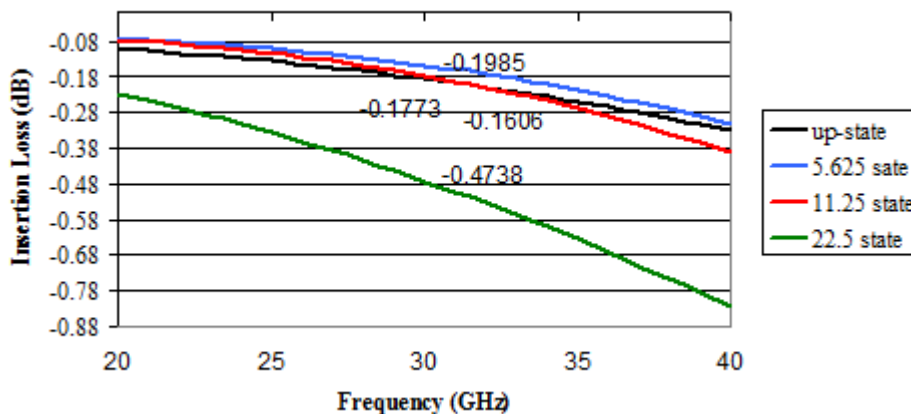
$$Z_{01} = Z_i = \sqrt{\frac{sL_i}{sC_i + C_{\text{load}}}} \quad (22)$$

برای محاسبه پارامتر پراکندگی S_{21} از شکل ۶ استفاده شده و رابطه (۲۳) نحوه محاسبه آن را نشان می‌دهد.

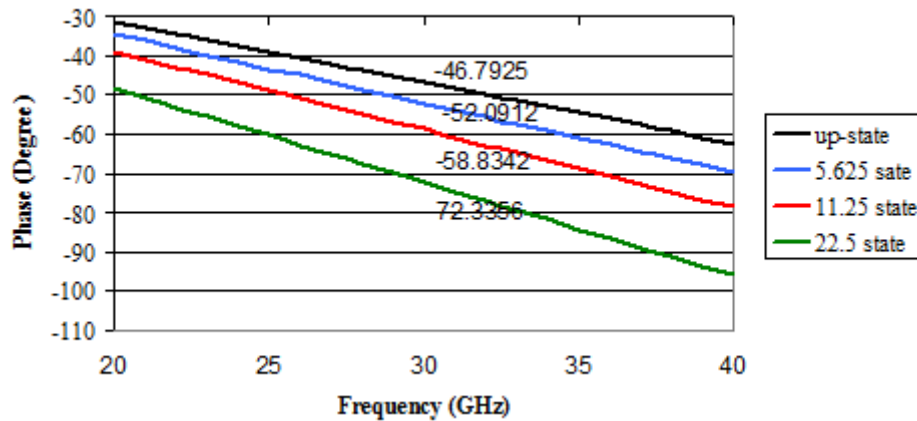
$$S_{21} = \frac{2}{A + Y_{02}.B + Z_{02}.C + D} \quad (23)$$



شکل ۷. نتایج تحلیل تلفات بازگشتی سلول واحد سه‌حالتی پیشنهادی



شکل ۸. نتایج تحلیل تلفات جای‌گزینی سلول واحد سه‌حالتی پیشنهادی



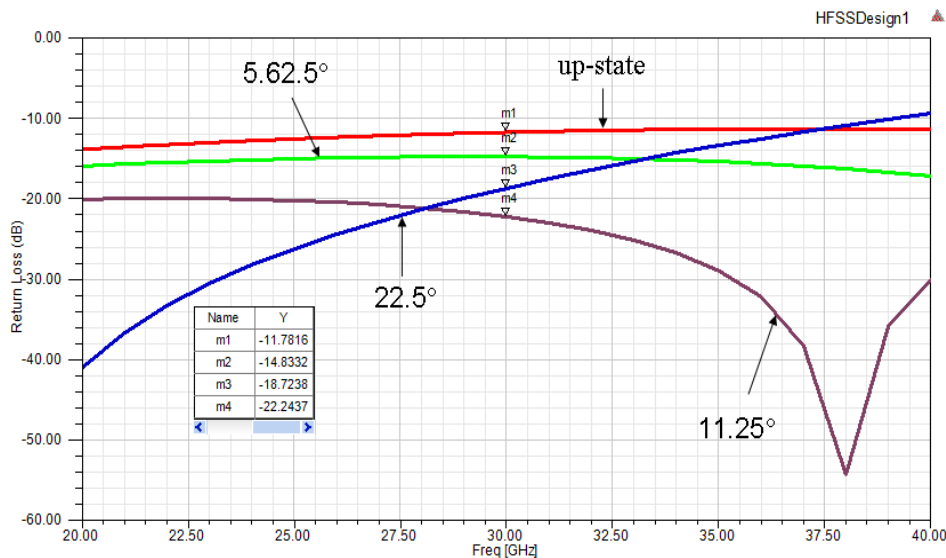
شکل ۹. نتایج تحلیل فاز S_{21} (برای محاسبه شیفت فاز) سلول واحد سه‌حالتی پیشنهادی

گرفت. نتایج شبیه‌سازی برای تلفات بازگشتی، تلفات جای‌گزینی و فاز S_{21} سلول واحد سه‌حالتی به ترتیب در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، تلفات بازگشتی برای سلول واحد پیشنهادی در تمامی حالات از -10 dB پایین‌تر بوده و لذا مشخصه تطبیق امپدانس خوبی دارد. شکل ۱۲ میزان شیفت فاز $5/23$ و $11/15$ و 22 درجه را نشان می‌دهد که اختلاف بسیار کمی با مقادیر ایده‌آل ($5/25$ ، $11/25$ و $22/5$ درجه) و تحلیل ساختار پیشنهادی دارد.

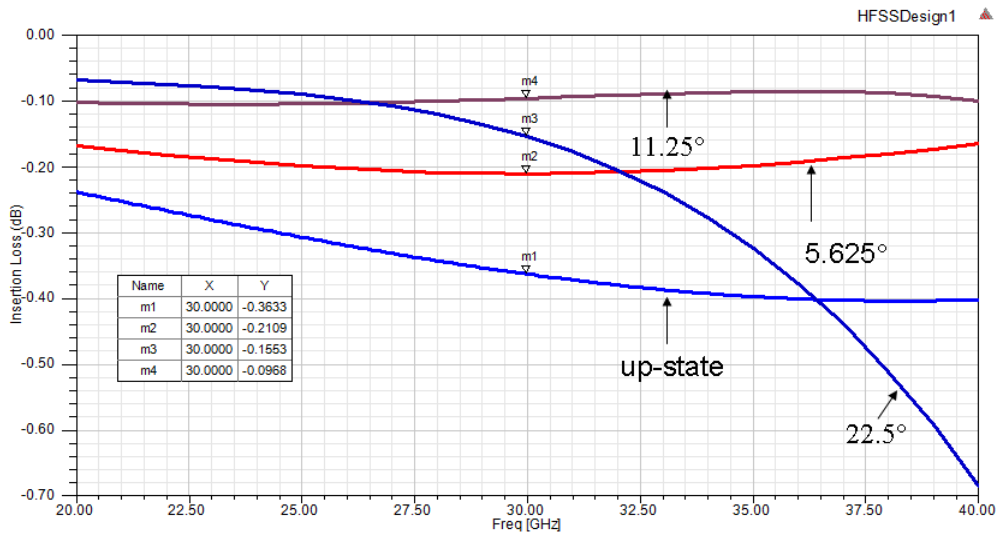
همان‌طور که در اشکال ۷ و ۸ دیده می‌شود، سلول واحد پیشنهادی دارای پاسخ‌های منطقی در فرکانس کار 30 GHz ، برای تلفات بازگشتی (کمتر از -10 dB) و تلفات جای‌گزینی بوده و با توجه به شکل ۹ شیفت فازهای $5/3$ ، $12/04$ و $25/5$ درجه به دست می‌آید.

شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی

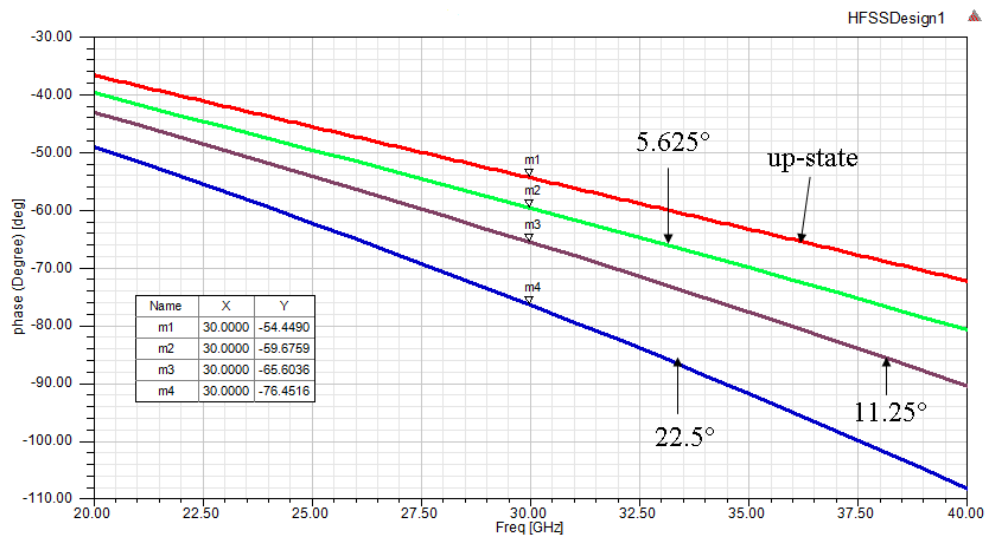
برای بررسی دقیق‌تر و همچنین جهت صحت‌سنجی نتایج تحلیل، ساختار سلول واحد سه‌حالتی پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار ANSOFT HFSS مورد شبیه‌سازی فرکانسی قرار



شکل ۱۰. نتایج شبیه‌سازی تلفات بازگشتی سلول واحد سه‌حالتی پیشنهادی



شکل ۱۱. نتایج شبیه‌سازی تلفات جای‌گزینی سلول واحد سه‌حالتی پیشنهادی

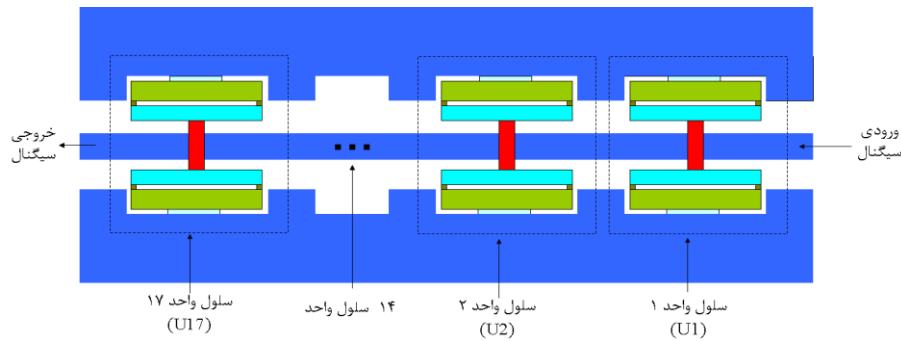
شکل ۱۲. نتایج شبیه‌سازی فاز S_{21} سلول واحد سه‌حالتی پیشنهادی

هریک از حالات ۶۴ گانه براساس وزن بیت ایجاد می‌شود. شش بلوک سازنده شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی شامل بلوک‌های ۵/۶۲۵، ۱۱/۲۵، ۲۲/۵، ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه می‌باشد که هر یک از بلوک‌ها براساس وزن بیت حالت موردنظر فعال می‌شود. به عنوان مثال برای تولید حالت ۷ (وزن ۰۰۰۱۱۰ یعنی حالت ۳۳/۷۵ درجه) بلوک‌های ۱۱/۲۵ و ۲۲/۵ درجه فعال می‌شوند. در روش مبتنی بر سلول واحد، هریک از حالات‌های ۶۴ گانه با شروع از سلول واحد اول و با تحریک تک‌تک آن‌ها تا رسیدن به حالت موردنظر حاصل می‌شود.

شبیه‌سازی شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی

با استفاده از اتصال چندین سلول واحد می‌توان شیفت‌دهنده فاز با تعداد بیت بالا طراحی کرد. در این مقاله، ساختار شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی در باند فرکانسی Ka (۳۰GHz) با اندازه بسیار کوچک و تلفات پایین را پیشنهاد می‌دهیم. شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی پیشنهادی از اتصال ۱۷ سلول واحد تشکیل شده و قادر است ۶۴ حالت ممکن را تولید کند. شکل ۱۳ ساختار نهایی شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی را نمایش می‌دهد. روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش وزن-بیتی^۸ و روش مبتنی بر سلول واحد اشاره کرد. در روش وزن-بیتی

⁸ bit-weight



شکل ۱۳. ساختار نهایی شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی

۶۴ام، سلول‌های واحد ۱ تا ۱۵ در حالت سوم خود یعنی ۲۲/۵ درجه، سلول واحد ۱۶م در حالت دوم خود یعنی ۱۱/۲۵ درجه و سلول واحد ۱۷م در حالت اول خود یعنی ۵/۶۲۵ درجه تحریک شده‌اند.

در این مقاله با توجه به سه‌حالتی بودن سلول واحد برای دستیابی به هر یک از حالات ۶۴گانه، کافی است سلول‌های واحد مناسب انتخاب و از هر سلول واحد حالت موردنظر برگزیده شده و سوئیچ‌های موردنظر تحریک شوند. جدول ۱ نحوه انجام این کار را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال برای حالت

جدول ۱. نحوه تحریک سلول‌های واحد برای هر یک از ۶۴ حالت شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی

شماره حالت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۶۲	۶۳	۶۴
U1	-	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۳
U2	-	-	-	۲	۲	۲	۲	۲	۳
U3	-	-	-	-	-	۲	۳	۳	۳
U4	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U5	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U6	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U7	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U8	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U9	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U10	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U11	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U12	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U13	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U14	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U15	-	-	-	-	-	-	۳	۳	۳
U16	-	-	-	-	-	-	۲	۲	۲
U17	-	-	-	-	-	-	۱	۲	۱

نتایج ولتاژ تحریک لازم برای اتصال پل (الکتروود بالا) به دی‌الکتریک در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده است. براساس این شکل‌ها، ولتاژ تحریک پل MEMS برابر ۳/۸ ولت و ولتاژ تحریک پل‌های MAM-1 و MAM-2 به ترتیب برابر ۳/۲ و ۲/۸ ولت می‌باشد. به‌منظور ارزیابی کارایی پل‌ها میزان تنش وارده به آنها هنگام اتصال در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ آمده است. مطابق این اشکال، حداکثر میزان تنش وارد شده به هر سه پل برابر ۴۰ MPa است که خیلی کمتر از حداکثر تنش قابل تحمل طلا یعنی ۲۰۰ MPa می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی در جدول ۲ آمده است. با توجه به این جدول، حداکثر تلفات بازگشتی برابر $10/57\text{dB}$ ، متوسط تلفات بازگشتی برابر $17/5\text{dB}$ و متوسط تلفات جای‌گزینی برابر $1/197\text{dB}$ است. همچنین خطای فاز مؤثر برابر $1/35$ درجه هست.

شبیه‌سازی الکترواستاتیک

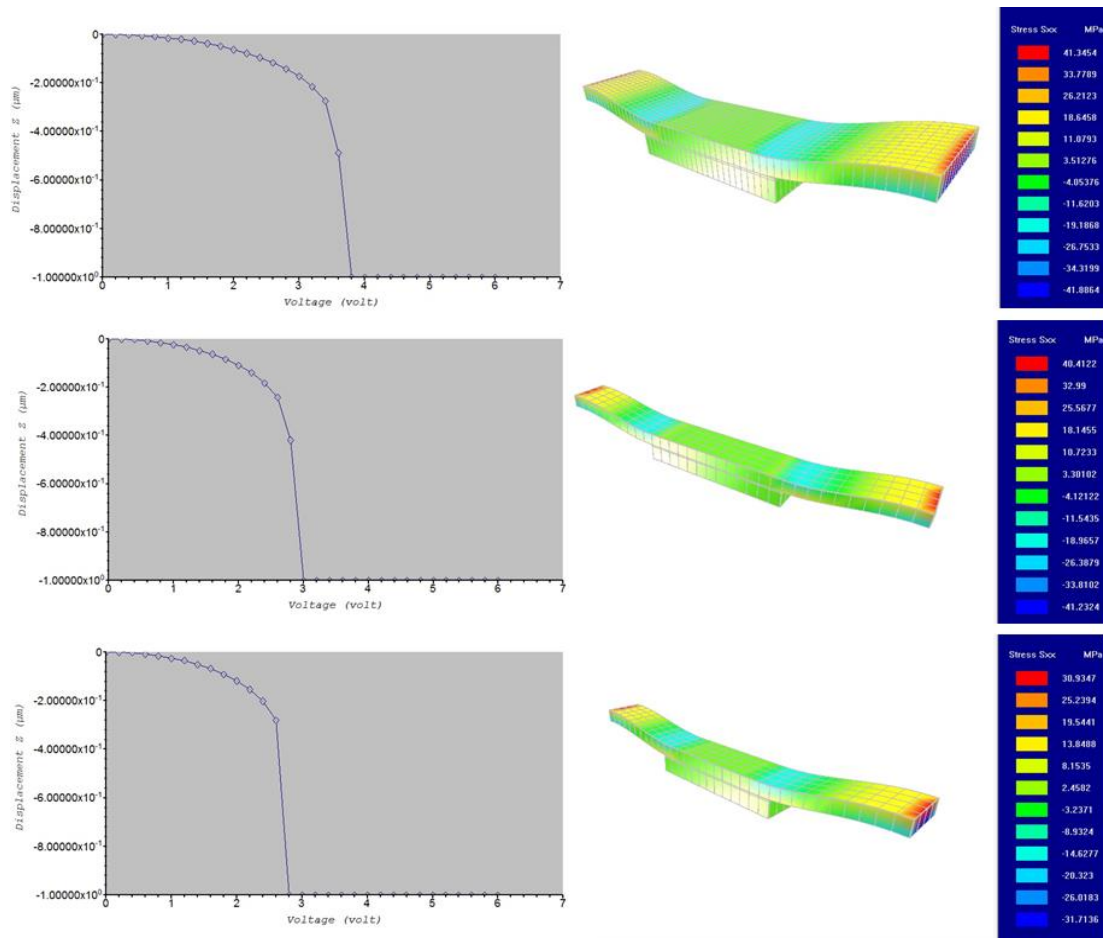
برای به‌دست آوردن ولتاژ تحریک هرکدام از سه پل MEMS و MAM از نرم‌افزار Intellisuite استفاده می‌شود. ابعاد و مشخصات پل‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تلفات بازگشتی، تلفات جای‌گزینی و شیفت فاز ۶۴ حالت شیفت‌دهنده فاز ۶ بیتی پیشنهادی

تلفات جای‌گزینی (dB)	تلفات بازگشتی (dB)	شیفت فاز (درجه)	حالت فاز (درجه)	تلفات جای‌گزینی (dB)	تلفات بازگشتی (dB)	شیفت فاز (درجه)	حالت فاز (درجه)
-۱/۳۴	-۱۲/۵۳	۱۸۲/۲۴	۱۸۰	-۰/۸	-۲۳/۴	۰	۰ (پایه)
-۱/۲۱۵	-۱۴/۷۰	۱۸۸/۲۵	۱۸۵/۶۲۵	-۰/۸۱	-۲۲/۶۵	۴/۱۷	۵/۶۲۵
-۱/۱	-۱۷/۹۵	۱۹۱/۷۳	۱۹۱/۲۵	-۰/۹۳	-۱۵/۵۴	۱۱/۷۵	۱۱/۲۵
-۱/۵۱	-۱۰/۸۰	۱۹۶/۳۶	۱۹۶/۸۷۵	-۱/۰۳	-۱۳/۲۳	۱۷/۳۷	۱۶/۸۷۵
-۱/۳	-۱۳/۷۱	۲۰۴/۶۱	۲۰۲/۵	-۱/۲۴۵	-۱۰/۵۷	۲۴/۰۹	۲۲/۵
-۱/۲۵	-۱۵/۱۴	۲۰۷/۶۶	۲۰۸/۱۲۵	-۱/۱۵	-۱۱/۷۰	۲۹/۵۱	۲۸/۱۲۵
-۱/۱۰	-۲۰/۱۵	۲۱۲/۳۳	۲۱۳/۷۵	-۱/۱۴۵	-۱۱/۷۸	۳۴/۲۷	۳۳/۷۵
-۱/۳۲	-۱۳/۸۰	۲۲۱/۲۵	۲۱۹/۳۷۵	-۰/۹۸	-۱۵/۱۳	۴۰/۴۱	۳۹/۳۷۵
-۱/۱۸	-۱۸/۳۲	۲۲۵/۹۵	۲۲۵	-۰/۸۷	-۲۱/۷۶	۴۶/۱	۴۵
-۱/۶۲	-۱۰/۴	۲۳۰/۹۵	۲۳۰/۶۲۵	-۰/۹۰	-۱۹/۴۵	۵۲/۲۹	۵۰/۶۲۵
-۱/۳۶	-۱۲/۸۷	۲۳۴/۸۱	۲۳۶/۲۵	-۱/۰۱	-۱۴/۹۸	۵۷/۷۳	۵۶/۲۵
-۱/۲۸	-۱۶/۱۵	۲۴۰/۶۱	۲۴۱/۸۷۵	-۱/۱۰	-۱۳/۲۴	۶۲/۱۴	۶۱/۸۷۵
-۱/۱۹	-۱۸/۲۲	۲۴۷/۸	۲۴۷/۵	-۱/۲۶	-۱۱/۳۸	۶۸/۸۵	۶۷/۵
-۱/۳	-۱۵/۲	۲۵۳/۴	۲۵۳/۱۲۵	-۱/۱۵	-۱۲/۹۷	۷۴/۳۱	۷۳/۱۲۵
-۱/۱۵	-۲۱/۲۵	۲۵۹/۳	۲۵۸/۷۵	-۱/۱۳	-۱۳/۷۳	۸۰/۶۶	۷۸/۷۵
-۱/۵۱	-۱۲/۳	۲۶۳/۴۵	۲۶۴/۳۷۵	-۰/۹۸	-۱۷/۹۵	۸۴/۶۷	۸۴/۳۷۵
-۱/۳۴	-۱۴/۳۶	۲۶۸/۷۵	۲۷۰	-۰/۹۳	-۲۸	۹۱/۶۶	۹۰
-۱/۲۳	-۲۱/۷۵	۲۷۴/۲۵	۲۷۵/۶۲۵	-۰/۹۱	-۲۸/۵۵	۹۶/۵	۹۵/۶۲۵
-۱/۲۳	-۱۸/۵۶	۲۸۱/۱	۲۸۱/۲۵	-۰/۹۷	-۱۸/۲۵	۹۹/۶۷	۱۰۱/۲۵
-۱/۳۲	-۱۶/۸۰	۲۸۷/۲۵	۲۸۶/۸۷۵	-۱/۰۱	-۱۸/۱۳	۱۰۶/۲۷	۱۰۶/۸۷۵
-۱/۲	-۲۴	۲۹۲/۲	۲۹۲/۵	-۱/۱۱	-۱۴/۹۰	۱۱۰/۶۱	۱۱۲/۵
-۱/۳۸	-۱۶/۰۵	۲۹۷/۲۵	۲۹۸/۱۲۵	-۱/۰۷	-۱۸/۵۵	۱۱۹	۱۱۸/۱۲۵
-۱/۳۰	-۱۸/۱۶	۳۰۴/۴	۳۰۳/۷۵	-۱/۱۲	-۱۶/۱۸	۱۲۴/۰۱	۱۲۳/۷۵
-۱/۲۵	-۲۸/۸۴	۳۰۸/۲۵	۳۰۹/۳۷۵	-۱/۰۶	-۱۸/۹۸	۱۳۱/۱۱	۱۲۹/۳۷۵
-۱/۲۹	-۱۸/۶۷	۳۱۶/۳	۳۱۵	-۱/۰۷	-۱۷/۳۵	۱۳۶/۴۱	۱۳۵
-۱/۴۸	-۱۴/۱۶	۳۲۲/۲۵	۳۲۰/۶۲۵	-۱/۰۱	-۲۱/۱۵	۱۴۱/۱۶	۱۴۰/۶۲۵
-۱/۳۵	-۱۸/۷۹	۳۲۸	۳۲۶/۲۵	-۱	-۲۲/۴۸	۱۴۸/۰۱	۱۴۶/۲۵
-۱/۴۳	-۱۹/۰۵	۳۳۱/۲۵	۳۳۱/۸۷۵	-۱	-۴۰/۷۵	۱۵۳/۹۱	۱۵۱/۸۷۵
-۱/۳۰	-۲۳/۲۶	۳۳۵/۵	۳۳۷/۵	-۱/۰۴	-۲۲/۱۳	۱۵۷/۷۵	۱۵۷/۵
-۱/۴۸	-۱۶/۲۵	۳۴۴/۷۵	۳۴۳/۱۲۵	-۱/۱۳	-۱۸/۱۰	۱۶۴/۱	۱۶۳/۱۲۵
-۱/۳۸	-۱۷/۶۳	۳۴۸/۹۵	۳۴۸/۷۵	-۱/۳	-۱۳/۵۸	۱۷۱/۵۱	۱۶۸/۷۵
-۱/۶۵	-۱۱/۵۷	۳۵۴/۲۵	۳۵۴/۳۷۵	-۱/۲۹	-۱۳/۵۵	۱۷۶/۷۶	۱۷۴/۳۷۵

جدول ۳. ابعاد و مشخصات پل‌های MEMS و MAM

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ماده پل MAM و MEMS	طلا	طول پل MEMS (μm)	۲۸۰
فاصله هوایی پل‌ها (μm)	۱	عرض پل MEMS (μm)	۵۰
ماده دی‌الکتریک	Si ₃ N ₄	ضخامت پل MEMS (μm)	۰/۸
ضخامت دی‌الکتریک (nm)	100	طول پل MAM-1 (μm)	۳۲۰
ضریب دی‌الکتریک نسبی	۷/۱	عرض پل MAM-1 (μm)	۳۵
مدول ینگ طلا (GPa)	۷۹	ضخامت پل MAM-1 (μm)	۰/۸
ضریب پواسون طلا	۰/۴۲	طول پل MAM-2 (μm)	۳۲۰
چگالی طلا (kg/m ³)	۱۹۰۰۰	عرض پل MAM-2 (μm)	۵۰
		ضخامت پل MAM-2 (μm)	۰/۸



شکل ۱۴. ولتاژ تحریک و میزان تنش وارده به پل MEMS (بالا) و MAM-1 (وسط) و MAM-2 (پایین)

جدول ۴ مقایسه‌ای بین پارامترهای مختلف چند نمونه از شیفتهنده‌های فاز موجود با ساختار پیشنهادی در این مقاله انجام می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار جدید برای سلول واحد به عنوان جزء اصلی یک شیفتهنده فاز ۶ بیتی دیجیتال پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی سلولی با قابلیت تولید سه شیفتهنده فاز و با هدف کاهش قابل توجه در اندازه طولی و تلفات می‌باشد. این سلول واحد شامل یک پل MEMS و دو پل MAM بوده و حالت اول (۵/۶۲۵ درجه) با تحریک پل MAM-1، حالت دوم (۱۱/۲۵ درجه) با تحریک پل MEMS و حالت سوم (۲۲/۵ درجه) با تحریک همزمان دو پل MEMS و MAM-2 تولید می‌شود. کاهش تعداد سلول‌های مورد نیاز برای پیاده‌سازی یک شیفتهنده فاز ۶ بیتی از ۶۴ سلول به ۱۷ سلول باعث کاهش اندازه کلی ساختار تا ۳۵٪ نسبت به آخرین نمونه ۶ بیتی موجود می‌شود [۱۷]. با توجه به کاهش تعداد سلول‌ها، تلفات کلی نیز تا ۲۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. ساختار با اندازه خیلی کوچک ۸/۵mm، تلفات بازگشتی کمتر از ۱۰dB- در تمامی ۶۴ حالت، میانگین تلفات پایین و ولتاژ تحریک کمتر از ۵ ولت در هر سه حالت از ویژگی‌های طراحی ارائه شده در این مقاله است.

جدول ۴. مقایسه مشخصات چند نمونه شیفت‌دهنده فاز با ساختار پیشنهادی

سال انتشار	خطای فاز مؤثر	حداکثر تلفات بازگشتی (dB)	حداقل تلفات جای‌گزینی (dB)	ولتاژ تحریک (ولت)	فرکانس کار (GHz)	تعداد حالات سلول واحد	اندازه کلی شیفت‌دهنده (mm)	تعداد سلول	تعداد بیت	سلول واحد (μm)	مرجع
۲۰۰۳	۱	-۱۱/۵	-۱/۵	۲۰	۳۷/۷	۱	۸/۴	۲۱	۲	۴۰۰	[۱۰]
۲۰۰۰	۸/۵	-۷	-۱/۷	۶۰	۲۶	۱	۱۱	۱۴	۳	۷۸۰	[۱۱]
۲۰۱۳	۳/۹۸	-۱۰	-۱/۷۳	-	۳۰	۱	۱۲	۱۵	۴	۴۰۰	[۹]
۲۰۱۳	۱/۷۳	-۱۳/۶	-۱/۷	۳۰/۱	۱۰	۱	۲۰/۴۶	۳۱	۵	۱۳۰۰	[۱۲]
۲۰۱۷	۲/۱	-۱۱	-	۳/۴ و ۶/۸	۳۰	۲	۱۲/۸	۳۲	۶	۴۰۰	[۱۷]
۲۰۱۸	۱/۴	-۱۰/۵	-۱/۸	۱۳	۱۸	۱	۱۸/۵	۳۲	۶	۵۸۶	[۱۶]
۲۰۱۹	۱/۳۵	-۱۰/۵۷	-۱/۶	۳/۲ و ۳/۸ و ۲/۸	۳۰	۳	۸/۵	۱۷	۶	۵۰۰	ساختار پیشنهادی

phase shifter”, Rzeglad Elektrotechniczny, vol.7, pp.77-81, 2013.

[10] J. S. Hayden and G. M. Rebeiz, “Very low loss distributed X-band and Ka-band MEMS phase shifters using metal-air-metal capacitors”, IEEE trans. Microwave Theory Tech., vol.51 pp. 309-314, 2003.

[11] A. Borgioli, Y. Liu, A. Nagra, R. York, “K-band 3-bit low-loss distributed MEMS phase shifter”, IEEE Microw Guided Wave Lett., vol.10, pp. 7-9, 2000.

[12] Y. J. Du, J. F. Bao and J. W. Jiang, “A new design of multi-bit RF MEMS distributed phase shifters for phase error reduction”, Microsyst. Technol., vol.19, pp.237-244, 2013.

[13] H. T. Kim, J. H. Park, S. Lee, S. Kim, J. M. Kim, Y. K. Kim, and Y. Kwon, “V-band 2-b and 4-b low-loss and low-voltage distributed MEMS digital phase shifter using metal-air-metal capacitors,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, no. 12, pp. 2918-2923, 2002.

[14] S. Afrang and B. Y. Majlis, “Distributed transmission line phase shifter using MEMS switches and inductors”, Microsyst. Technol., vol. 4, no. 8. pp. 1173-1183, 2008.

[15] S. Afrang, “Small and low loss Resonator Type DMTL Phase Shifter”, Microelectronics Journal, vol.44, pp. 442-453, 2013.

[16] A. Gharekhani, E. Abbaspour-Sani, “A new structure for 6 bit distributed MEMS transmission line phase shifter in Ku band”, IJE Transactions B: Applications, vol.31, pp. 315-321, 2018.

[17] S. Afrang, K. Samandari and G. Reza zadeh, “A small size Ka band six-bit DMTL phase shifter using new design of MEMS switch”, Microsyst. Technol., vol. 4, no. 8. pp. 1173-1183, 2016.

[18] Wolff E A, “Microwave engineering and systems application”, New York, 1988.

مراجع

[1] G.Rebeiz, “RF MEMS Theory, Design, and Technology”, John Wiley and Sons, 2003, New Jersey.

[2] B. Menbari, M. Dousti, “Low insertion loss, high power handling and good performance 90° phase shifter for X-band radar application”, Analog Integr Circ S, vol.82, pp.181-187, 2014

[3] B. Menbari, M. Dousti and H. Hajghassem, “A wide range, high yield and good performance pHEMT switch for MMIC phase shifter”, Int. j. Electron., vol.101, pp.1467-1477, 2013.

[4] Amrita Chakraborty etal, “Paradigm Phase Shift”, IEEE Microwave Magazine, pp.22-41, Feb.2017.

[5] H. T. Kim, J. H. Park, J. Yim, Y. K. Kim, and Y. Kwon, “A compact V-band 2-bit reflection-type MEMS phase shifter,” IEEE Microwave Compon. Lett., vol. 12, no. 9, pp. 324-326, 2002.

[6] S. Gong, H. Shen, and N. S. Barker, “A 60 GHz 2-bit switched-line phase shifter using SP4T RF-MEMS switches”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 59, no. 4, pp. 894-900, 2011.

[7] H. Zhang, A. Laws, K. C. Gupta, Y. C. Lee, and V. M. Bright, “MEMS variable-capacitor phase shifters part I: Loaded-line phase shifter”, Int. J. RF Microwave Computer Aided Eng., vol. 13, no. 4, pp. 321-337, 2003.

[8] N. Scott Barker and Gabriel M. Rebeiz, “Distributed MEMS True-Time Delay Phase Shifters and Wide-Band Switches”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 46, pp. 1881-1890, November 1998.

[9] A. Chen, W. Jiang, Z. Chen and Y Li, “A low-loss Ka-band distributed metal-air-metal MEMS

Design, Analysis and Simulation of a Low Loss and Compact Size 6-bit DMTL Phase Shifter with a Three-State Unit Cell

M. M. Teymoori, M. Dousti, S. Afrang

Abstract

Phase shifter is one of the main components of the radar and phased array systems. In this paper, a six bit small size low loss MEMS phase shifter is designed, analyzed and simulated. The proposed phase shifter consists of 17 unit cells and each unit can generate three different phase shifts e.g. 5.625, 11.25 and 22.5 degree. The designed unit cell structure includes a co-planar waveguide transmission line, one MEMS bridge and two metal air metal bridges. The bridge capacitors are electrically in series. The bridges are actuated in three different modes, in each mode the distributed capacitance on transmission line and the phase velocity are changed so that a phase shift is achieved. This design reduces the unit cell numbers from 64 in classic 6-bit phase shifter and 32 in two-state one to only 17 unit cells. Therefore, the overall size of the 6-bit phase shifter is reduced. The designed structure is simulated using ANSOFT HFSS and Intellisuite software. Based on the simulation results, the phase shifter is only 11.2mm in size, the roots mean square (RMS) phase error is 1.35 and average loss is 1.2dB. The compact size, low RMS phase error, low loss and low actuation voltage are the main advantages of the designed MEMS phase shifter.

Keywords:

Phase Shifter, MEMS, Unit Cell, Insertion Loss, Return Loss