

Original Research Paper

Technology Development of a High-Power Low-Cost Waveguide Switch for Satellite Transponder Applications

Elham Sharifi Moghaddam* , Mohsen Shafeghati, and Behzad Ahmadi 

Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 17 September 2024

Revised 04 December 2024

Accepted 08 December 2024

Available Online 24 December 2024

Keywords:

DPDT switch

Glide symmetric holey structure

Waveguide switch

Gap waveguide

Transponder

Ku band

High power

ABSTRACT

This article presents a double pole double throw (DPDT) waveguide switch in the *Ku* band with significantly lower manufacturing costs than competing switches. The switch structure consists of a fixed ring and a rotating cylinder at its center, separated by an unavoidable narrow air gap. An electromagnetic band gap (EBG) structure minimises leakage in this gap. Gap waveguide technology effectively mitigates leakage waves by incorporating a perfect magnetic conductor (PMC), restricting wave propagation within a specific frequency range. For cost-effective implementation of the EBG region, a glide-symmetric holey structure (GSHS) is proposed. This structure consists of two parallel perforated conductor plates with a narrow air gap, where the holes are arranged alternately in a triangular grid. In the proposed switch, the holes in the inner cylinder are offset from those in the outer ring by half a period, minimizing leakage effectively. Design and simulation results demonstrate that the switch achieves a transmission loss of 0.05 dB and a return loss of less than -35 dB at its ports. Additionally, the port isolation exceeds 80 dB, and the switch offers a relative bandwidth of more than 50%, outperforming similar designs.

*Corresponding Author's E-mail: e.sharifimoghadam@isrc.ac.ir**How to Cite this Article:**


E. Sharifi Moghaddam, M. Shafeghati, and B. Ahmadi, "Technology development of a high-power low-cost waveguide switch for satellite transponder applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 40-48, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1501>.

**COPYRIGHTS**

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



توسعه فناوری یک سویچ موجبری توان بالای کم هزینه برای کاربرد در ترانسپوندر باند Ku ماهواره‌های مخابراتی

الهام شریفی مقدم^{۱*}  محسن شفقتی^۲، و بهزاد احمدی^۳ 

۱ و ۳- استادیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله یک سویچ موجبری دو ورودی-دو خروجی در باند Ku ابداع شده است که نسبت به سویچ‌های مشابه، ساخت آن بسیار کم هزینه‌تر است. ساختار سویچ موجبری متشکل از حلقه‌ای ثابت و یک استوانه چرخان در میان آن است، در نتیجه تشکیل یک فاصله هوایی بین این دو قسمت سویچ اجتناب‌ناپذیر است. برای محدود کردن نشتی موج از فاصله هوایی بین استوانه داخلی گردان و حلقه خارجی، از ساختار EBG جدیدی در سویچ پیشنهادی این مقاله استفاده شده است. فناوری موجبر شکاف‌دار یکی از روش‌هایی است که برای کاهش این موج نشتی استفاده می‌شود. در این روش با طراحی یک هادی مغناطیسی کامل (PMC) در ناحیه فاصله هوایی، انتشار موج در یک باند فرکانسی مشخص محدود می‌شود. راه‌حلی که در این مقاله برای پیاده‌سازی ناحیه محدود کننده انتشار موج پیشنهاد شده است، ساختار سوراخ‌دار متقارن است. چینش سوراخ‌ها در این ساختار به نحوی است که سوراخ‌های استوانه داخلی به نسبت حلقه خارجی به اندازه نصف دوره تناوب سوراخ‌ها شیف‌ت پیدا کرده‌اند. طبق نتایج طراحی و تحلیل، با استفاده از ساختار EBG پیشنهادی، میزان نشتی موج در فاصله هوایی به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و در نتیجه پارامترهای الکتریکی بهبود می‌یابند. نتایج طراحی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تلف عبوری سویچ طراحی شده کمتر از 0.05 dB و ضریب انعکاس پورت‌های آن کمتر از 35 dB- است. همچنین ایزولاسیون بین پورت‌ها بیشتر از 80 dB و پهنای باند نسبی این سویچ بیشتر از 50٪ به دست آمد که نسبت به سویچ‌های مشابه وضعیت بهتری دارد.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۷ شهریور ۱۴۰۳
بازنگری ۱۴ آذر ۱۴۰۳
پذیرش ۱۸ آذر ۱۴۰۳
اولین انتشار ۰۴ دی ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

سویچ دو ورودی-دو خروجی
ساختار سوراخ‌دار متقارن
سویچ موجبری
موجبر شکاف‌دار
ترانسپوندر
باند Ku
توان بالا

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: e.sharifimoghdam@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

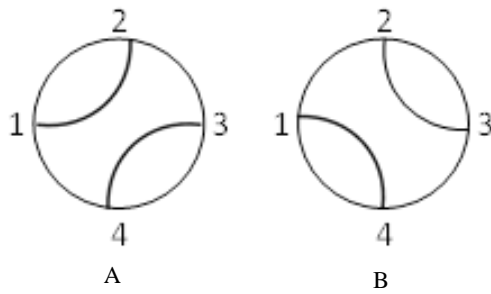
E. Sharifi Moghaddam, M. Shafeghati, and B. Ahmadi, "Technology development of a high-power low-cost waveguide switch for satellite transponder applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 40-48, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1501>.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





شکل ۱- سویچ DPDT: (الف) وضعیت ۱ و (ب) وضعیت ۲.

Fig. 1. DPDT switch: (a) first state, (b) second state.

در این گونه سویچ‌ها، به دلیل وجود قسمت چرخنده میانی، وجود فاصله هوایی بین قسمت چرخنده و ثابت اجتناب‌ناپذیر است. این فاصله موجب نشتی موج و افزایش تلف عبوری و همچنین باعث تداخل ناخواسته با ماژول‌های مخابراتی مجاور می‌گردد، لذا باید اثر این فاصله هوایی به نحوی خنثی شود. فناوری موج‌بر شکافدار [۳] یکی از روش‌های کاهش این موج نشتی است و در سویچ‌های موج‌بری نیز به کار رفته است [۴، ۵]. در این روش با طراحی یک هادی مغناطیسی کامل (PMC) در ناحیه فاصله هوایی، انتشار موج در بازه فرکانسی خاصی محدود می‌شود (EBG) روشی که معمولاً برای پیاده‌سازی هادی کامل مغناطیسی استفاده می‌شود، سطحی پوشیده شده با برجستگی‌های میخ مانند است که با پرپود خاصی در کنار هم قرار گرفته‌اند [۴، ۵]. ساخت سطح مذکور به دلیل نیاز به تراشکاری دقیق به ویژه در فرکانس‌های بالا بسیار گران است. راه‌کار دیگری که برای پیاده‌سازی ناحیه EBG پیشنهاد می‌شود، استفاده از ساختار سوراخ‌دار متقارن (GSHS) است که ساخت آن بسیار ارزان قیمت‌تر است [۶، ۷].

در این مقاله برای اولین بار در سویچ میکروویوی DPDT از تکنیک ساختار سوراخ‌دار متقارن استفاده شده است. در این طرح، سطوح چرخنده داخلی و استوانه بیرونی یک سویچ موج‌بری باند Ku را به صورت خاص و متقارنی سوراخ‌دار کرده و ناحیه EBG ایجاد نموده‌ایم. در بخشی از مقاله، فناوری موج‌بر شکافدار به صورت خلاصه توضیح داده شده و سپس یک سلول واحد از ساختار GSHS، طراحی و تحلیل شده است. در ادامه، یک ساختار کامل از سویچ DPDT موج‌بری که از تکنیک GSHS استفاده نموده است، طراحی و تحلیل شده است.

نقش سویچ موج‌بری در ترانسپوندر یک ماهواره

مخابراتی

ماهواره‌های مخابراتی نقش یک تکرارکننده یا رله فضایی را دارند که دیتای مورد نظر را از ایستگاه زمینی مرکزی یا کاربر دریافت کرده و پس از کاهش فرکانس و تقویت^۱، آن را به کاربران یا ایستگاه زمینی

علائم و اختصارات

DPDT	سویچ دو ورودی-دو خروجی Double Pole Double Through
PMC	هادی مغناطیسی کامل Perfect Magnetic Conductor
EBG	شکاف باند الکترومغناطیسی Electromagnetic Band Gap
GSHS	ساختار سوراخ‌دار متقارن Glide Symmetric Holey Structure
GW	موج‌بر شکاف‌دار Gap Waveguide

مقدمه

سویچ‌های میکروویوی وظیفه مسیریابی موج در مدارات میکروویوی را به عهده دارند. عمده‌ترین کاربرد سویچ‌های میکروویوی، انتخاب مسیر برای استفاده از المان‌های اصلی یا افزونه در ترانسپوندرهای ماهواره‌ای است. از کاربردهای دیگر این سویچ می‌توان به انتخاب یک یا چند فیلتر از یک بانک فیلتری، و انتخاب مسیر آنتنی مورد نظر (آنتن با پرتو همه جهته یا تک جهته) در زیرسیستم تله‌متری/تله‌کامند برای فازهای مختلف مأموریتی ماهواره اشاره نمود.

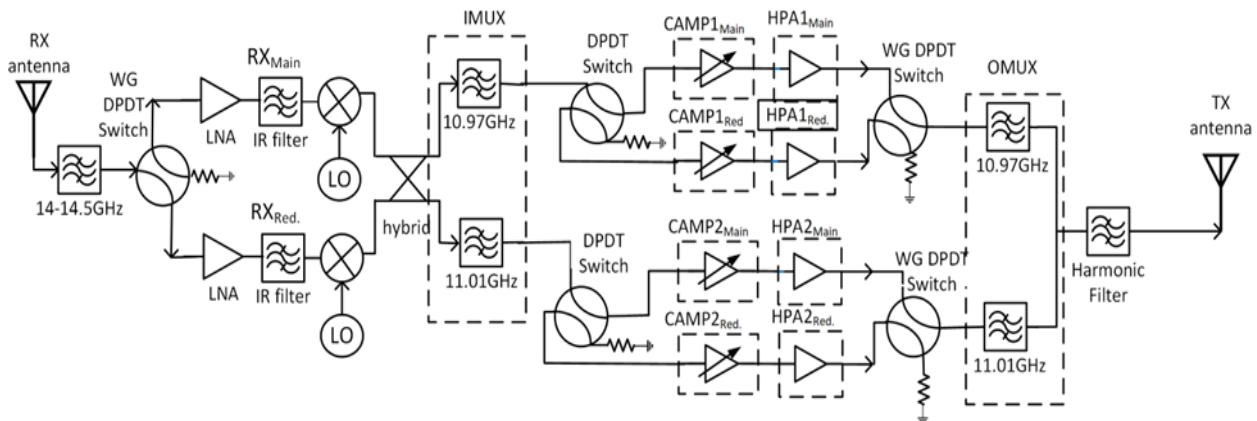
عملگرهای مختلفی از جمله الکترومکانیکی، فرتی، حالت جامد (PIN دیود، GaAs/FET) و سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) برای کنترل سویچ‌های میکروویوی به کار گرفته می‌شوند که از لحاظ تحمل توان میکروویوی، تلف عبوری، ایزولاسیون و مدت زمان سویچ کردن با هم متفاوتند [۱، ۲].

سویچ‌های موج‌بری در رده الکترومکانیکی جای می‌گیرند و نسبت به انواع دیگر سویچ‌ها تحمل توان میکروویوی بالاتری دارند، تلف عبوری آن‌ها بسیار پایین است و خروجی‌های آن‌ها ایزولاسیون بالایی با هم دارند، لذا برای سویچینگ خروجی تقویت‌کننده‌های پر قدرت اصلی/افزونه مناسب هستند. یک سویچ چرخنده مکانیکی دو ورودی-دو خروجی (DPDT) از یک قسمت ثابت و یک قسمت چرخنده در وسط آن تشکیل شده است. با چرخش قسمت چرخنده میانی، مسیر انتقال سیگنال مطابق شکل ۱ تغییر می‌کند. در شکل ۱ (الف) مسیر بین پورت‌های ۱ و ۲ و همچنین بین پورت‌های ۳ و ۴ برقرار می‌شود. در شکل ۱ (ب) قسمت چرخنده میانی طوری قرار گرفته که مسیر موج میکروویوی بین پورت‌های ۲ و ۳ و همچنین ۱ و ۴ برقرار می‌شود.

۱- در مورد ترانسپوندر پردازشی regenerative، علاوه بر دریافت سیگنال و کاهش فرکانس و ارسال، استخراج داده، کانال‌بندی و مدولاسیون مجدد نیز صورت می‌گیرد.

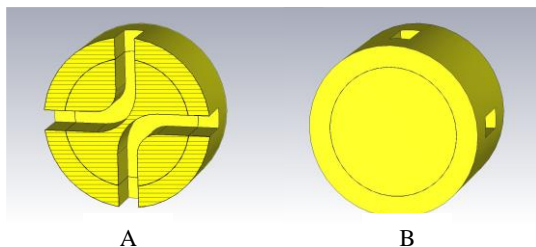
مطابق شکل ۲، یک افزونه برای گیرنده و یک افزونه برای بلوک‌های تقویت هر یک از کانال‌ها در نظر گرفته شده‌است. انتخاب بین بلوک‌های اصلی و افزونه توسط سویچ‌های ورودی و خروجی آن بلوک صورت می‌پذیرد. در خروجی تقویت‌کننده‌های پر قدرت و ورودی تقویت‌کننده کم نویز، نیاز به سویچ‌هایی با افت عبوری بسیار کم وجود دارد، لذا استفاده از سویچ‌های موج‌بری اجتناب‌ناپذیر است.

در ناحیه جغرافیایی دیگری ارسال می‌کنند. یکی از عناصر کلیدی محموله‌های مخابراتی، ترانسپوندر است که مطابق بلوک شکل ۲ اجزای اصلی آن شامل فیلتر ورودی، گیرنده، کاهنده فرکانس، مالتی پلکسر ورودی، تقویت‌کننده کانال، تقویت‌کننده پر قدرت، مالتی پلکسر و فیلتر خروجی است. برای افزایش قابلیت اطمینان محموله، باید برای هر یک از بلوک‌های آسیب‌پذیر محموله، افزونه‌ای در نظر گرفته شود.



شکل ۲- ترانسپوندر bentpipe باند Ku دو کاناله.

Fig. 2. Ku-band 2-channel bent pipe transponder.



شکل ۳- مدل شبیه‌سازی شده سویچ موج‌بری ساده DPDT: (الف) نمای از سویچ که به صورت عرضی برش داده شده، (ب) نمای سویچ کامل.

Fig. 3. The simulated model of a simple DPDT waveguide switch: (a) cross section view of the switch, (b) whole view of the switch.

طراحی EBG با استفاده از ساختار سوراخ‌دار مقارن

یک ساختار EBG با هدف ممانعت از انتشار موج در بازه فرکانسی خاصی طراحی و بهینه می‌شود و از المان‌هایی تشکیل شده که به صورت متناوب در کنار هم چیده شده‌اند [۸، ۹]. این ساختار، کاربرد گسترده‌ای در موج‌برهای شکاف‌دار دارد [۱۰-۱۲]. یکی از ساختارهای EBG معمول، از سطحی هادی پوشیده شده با برجستگی‌های میخی شکل متناوب تشکیل شده‌است [۱۳].

ساختار سویچ موج‌بری DPDT

ساختار سویچ DPDT مورد نظر در این مقاله از یک حلقه ثابت و یک استوانه چرخان در میان حلقه تشکیل شده‌است و به ناچار یک فاصله هوایی باریک بین این دو بخش سویچ وجود خواهد داشت. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، دو مسیر موج‌بری خم شده که هر یک به دو پورت ختم می‌شود در سویچ وجود دارد. با چرخش استوانه میانی مسیر موج تغییر می‌کند. وقتی استوانه چرخنده میانی در وضعیت ۱ قرار دارد، مسیر موج ۱ به ۲ و ۳ به ۴ است، و وقتی استوانه میانی چرخیده و در موقعیت ۲ قرار می‌گیرد، مسیر ۱ به ۴ و ۲ به ۳ برقرار می‌گردد. در این مسیرها، موج باید از فاصله هوایی مذکور نیز عبور کند، لذا مقداری از آن نشت می‌کند. به همین دلیل سویچ ساده مدل شده در شکل ۳ تمامی نیازمندی‌های الکتریکی یک سویچ موج‌بری را نمی‌تواند برآورده سازد. نتایج شبیه‌سازی یک سویچ موج‌بری ساده نشان داد که ضریب انعکاس پورت‌ها در فرکانس ۱۵-۱۰ GHz به ۶- dB نیز می‌رسد که عدد مطلوبی نیست.

راه کار مناسبی که برای رفع مشکل نشتی از فاصله هوایی ایجاد شده در مسیر موج‌بری پیشنهاد می‌شود، طراحی یک ناحیه محدود کننده انتشار موج در بازه فرکانسی مورد نظر (EBG) در فاصله هوایی مذکور است که در ادامه مقاله به آن خواهیم پرداخت.

[۶] نشان داد که مرکز باند توقف^۱ به دوره تناوب (ابعاد سلول واحد) بستگی دارد. با کاهش p ، فرکانس مرکزی باند توقف افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش r ، باند توقف به فرکانس‌های بالاتر انتقال می‌یابد. عمق سلول‌ها از حدی باید بیشتر باشد تا به پهنای باند توقف مورد نظر برسیم، البته بیشتر از این مقدار، پهنای باند توقف تغییر نمی‌کند. افزایش g پهنای باند توقف را کاهش می‌دهد، و برای مقادیر بزرگتر r/p اثر g کاهش می‌یابد.

در [۶] پارامترهای هندسی یک سلول GSHS در باند Ka بهینه شده‌است. در مقاله حاضر، مطابق جدول ۱، مقادیر اولیه پارامترهای هندسی GSHS بر اساس مقیاس کردن مقادیر مندرج در مرجع مذکور، به باند فرکانسی Ku (از مرکز باند توقف ۳۵ GHz به ۱۶ GHz)، در نظر گرفته شده و بعد از آن بهینه‌سازی پارامترها با هدف رسیدن به باند توقف ۲۲-۱۰ GHz صورت پذیرفت. پارامترهای بهینه‌سازی، h, g, r, p هستند. ساختار در نرم‌افزار CST MWS شبیه‌سازی و با استفاده از Eigenmode Solver تحلیل شده‌است. در این شبیه‌سازی از شرط مرزی پرودیگ استفاده شده‌است. بیشترین حساسیت به تغییر، روی پارامتر p (ابعاد سلول واحد) وجود داشت. لذا با کاهش p با پله‌های ۱ mm به باند توقف مورد نظر نزدیک شده و پس از آن با تیون کردن دقیق سایر پارامترها با پله‌های ۰/۱ mm، نتیجه مورد نظر حاصل شد.

با توجه به اینکه نیاز به تکرار زیادی برای بهینه‌سازی وجود نداشت و با چند بار تغییر پارامترها به نتیجه مطلوبی رسیدیم، روش بهینه‌سازی همان روش تکرار^۲ محسوب می‌شود. کلیه بهینه‌سازی‌ها در نرم‌افزار CST MWS صورت گرفت. مقادیر تیون شده نهایی پارامترهای هندسی سلول GSHS پس از این شبیه‌سازی‌ها و بهینه‌سازی در جدول ۱ درج شده‌اند.

نمودار پاشندگی EBG طراحی شده در شکل ۵ نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشخص است GSHS طراحی شده، باند توقف مورد نظر را محقق کرده است.

جدول ۱- پارامترهای یک سلول GSHS طراحی شده.

Table 1. The unit cell parameters of the designed GSHS.

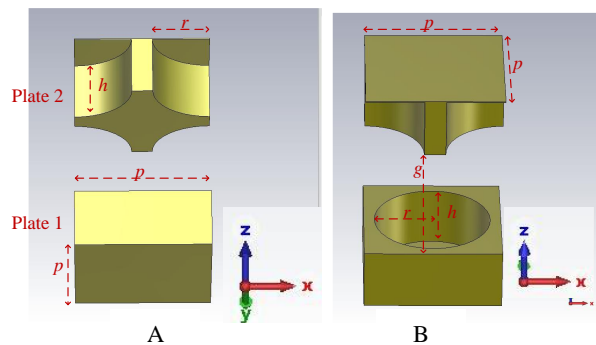
Parameter	First value (mm)	Tuned value (mm)
h	4.4	5
g	0.1	0.1
r	4.9	5
p	18	13

پیاده‌سازی این ساختار، بالاخص در فرکانس‌های بالا به دلیل نیاز به استفاده از ماشین CNC با ابزار بسیار دقیق، بسیار پرهزینه است. روش معمول دیگر برای طراحی EBG استفاده از ساختار قارچی است که از زیر لایه‌ای پوشیده شده از پچ‌های با چیدمان متناوب تشکیل شده‌است [۱۴]. این روش برای سطوح صاف کم‌هزینه است ولی برای سطوح انحنا دار روش گران قیمتی است.

ساختار GSHS جایگزین مناسبی برای روش‌های مذکور است [۶، ۱۵] و با توجه به اینکه سوییچ ساختار استوانه‌ای و منحنی دارد، بسیار کم هزینه‌تر از روش قارچی است. همچنین با توجه به ساده‌تر و ارزان قیمت‌تر بودن سوراخ‌کاری نسبت به ماشین‌کاری، نسبت به ساختار پوشیده از برجستگی‌های میخی شکل، بسیار کم هزینه‌تر است. به علاوه، فاصله تناوب سوراخ‌ها در GSHS از فاصله تناوب میخ‌ها بیشتر بوده و این موضوع ساخت را ساده‌تر می‌کند.

ساختار GSHS از دو صفحه هادی سوراخ‌دار موازی با هم تشکیل شده و فاصله هوایی باریکی بین آن‌ها وجود دارد. سوراخ‌ها متناوب هستند و در یک شبکه مثلثی چیده شده‌اند. سوراخ‌های صفحه دوم نسبت به صفحه اول به اندازه نصف دوره تناوب سوراخ‌کاری‌ها، چرخیده‌اند و شیفت پیدا کرده‌اند.

شکل ۴ سلول واحد ساختار GSHS را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، شیفت سوراخ‌ها در صفحه دوم در دو راستای x و y صورت گرفته است.

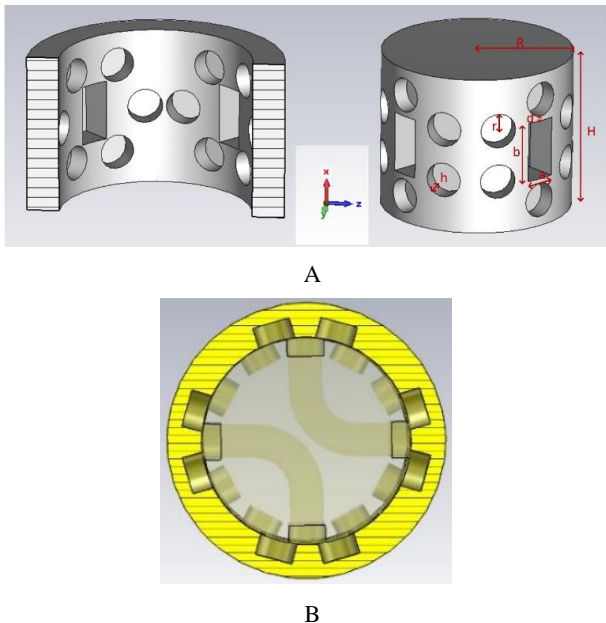


شکل ۴- سلول واحد ساختار GSHS: (الف) نمای که در آن یک چهارم سوراخ‌های صفحه بالایی دیده می‌شوند، (ب) نمای که در آن یک چهارم سوراخ‌های صفحه پایینی دیده می‌شوند.

Fig. 4. Unit cell of GSHS: (a) a quarter view of the upper side holes, (b) a quarter view of the lower side holes.

طراحی GSHS با تنظیم چهار پارامتر هندسی صورت می‌گیرد: عمق سوراخ‌ها (h)، فاصله هوایی بین دو لایه (g)، شعاع سوراخ‌ها (r)، و ابعاد سلول واحد (p). مطالعات در خصوص این پارامترها در

مقایسه ضریب انعکاس یک سویچ ساده و سویچی که با استفاده از تکنیک GSHS طراحی شده است در شکل ۸ آمده است. برای سویچ ساده، ضریب انعکاس در بعضی فرکانسها به بالاتر از -10 dB نیز می‌رسد. اما در سویچ بهینه شده با استفاده از تکنیک GSHS، ضریب انعکاس در بازه فرکانسی مورد نظر کمتر از -35 dB است که برای یک سویچ موجبری عدد ایده‌آلی است.



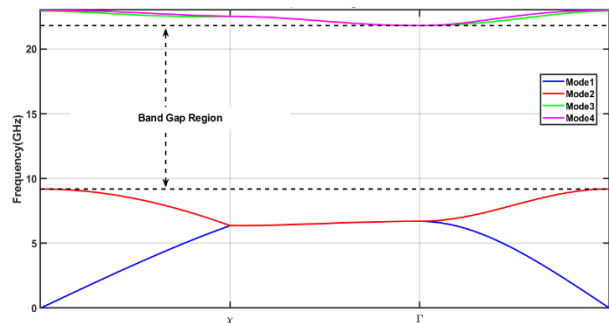
شکل ۶- سویچ DPDT موجبری با استفاده از تکنیک GSHS: (الف) استوانه گردان داخلی سویچ در سمت راست و حلقه بیرونی سویچ در سمت چپ، (ب) سطح مقطع سویچ.

Fig. 6. DPDT waveguide switch by using GSHS: (a) inner rotating cylinder of the switch in the right figure and outer ring of the switch in the left figure, (b) cross section of the switch.

جدول ۲- پارامترهای هندسی سویچ موجبری پیشنهاد شده.

Table 2. The geometrical parameters of the proposed switch.

Parameter	Value (mm)
h	5.5
g	0.1
r	5.5
p	13
R	30
d	1.5
a	19.05
b	9.52
H	50



شکل ۵- نمودار پاشندگی GSHS طراحی شده.

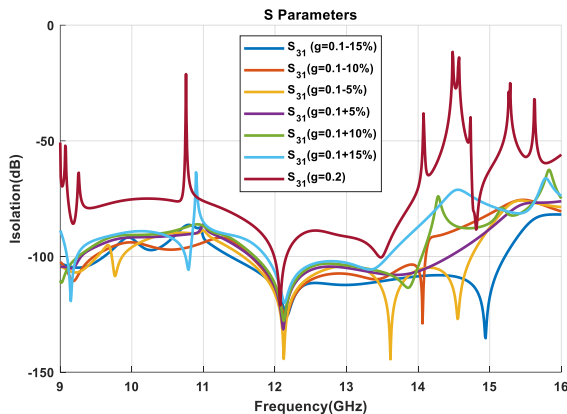
Fig. 5. Dispersion diagram of the designed GSHS.

سویچ موجبری DPDT با استفاده از GSHS طراحی شده

در این بخش از مقاله یک سویچ موجبری DPDT با استفاده از GSHS طراحی شده است. شکل ۵ ساختار شبیه‌سازی شده این سویچ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، در ساختار طراحی شده، چیدمان سوراخ‌ها دایروی است و مسیرهای موجبری با سوراخ‌ها احاطه شده‌اند [۱۵]. پارامترهای هندسی سویچ در شکل ۶ (الف) نشان داده شده‌اند. شکل ۶ (ب) سطح مقطع سویچ را نشان می‌دهد. صفحه برش موازی با صفحه $y-z$ است و 15 mm بالاتر از صفحه تقارن سویچ قرار گرفته است.

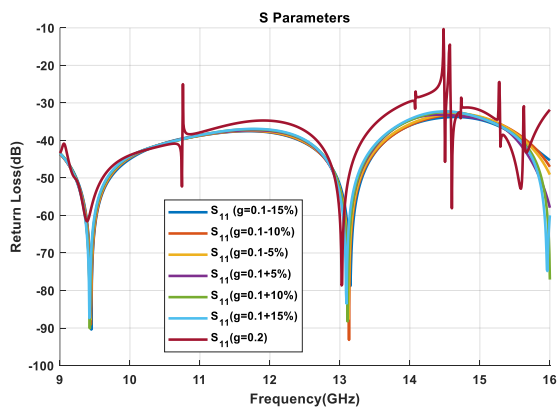
سویچ در نرم‌افزار CST-MWS مدل گشته است. از پارامترهای p, g, r, h مندرج در جدول ۱ به‌عنوان مقادیر اولیه سلول GSHS استفاده شده و مقادیر اولیه پارامترهای R و H نیز طوری انتخاب شدند که سویچ قابل ساخت بوده و در ضمن جرم زیادی نداشته باشد. پارامترهای a و b که ابعاد موجبر هستند و به فرکانس قطع موجبر مربوط هستند. بهینه‌سازی پارامتر d نیز با اولین مقداری که سویچ استحکام مکانیکی کافی را داشته باشد، شروع شد و تا رسیدن به نتیجه مطلوب، مقدار آن تغییر یافت. همانند بهینه‌سازی پارامترهای یک سلول GSHS در بخش قبل، برای کل سویچ نیز از روش تکرار استفاده شد و پارامترهای هندسی تا رسیدن به پاسخ بهینه مکرراً تغییر داده شدند. این پارامترها با هدف رسیدن به ماکزیمم پهنای باند و ایزولاسیون و همچنین کمترین مقدار ضریب انعکاس بهینه شدند. نتایج بهینه‌سازی سویچ در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نیز در نمودارهای شکل‌های ۷ تا ۱۰ رسم شده است.

شکل ۷ اثر استفاده از GSHS را روی یک سویچ موجبری ساده نشان می‌دهد. در این نتایج، بهبود قابل ملاحظه ایزولاسیون پورتهای سویچ پس از استفاده از ساختار GSHS مشهود است. این شکل نشان می‌دهد که ایزولاسیون پورتهای برای یک سویچ موجبری ساده قابل قبول نیست.



شکل ۹- اثر تolerانس ساخت روی ایزولاسیون سویچ طراحی شده با استفاده از تکنیک GSHS برای مقادیر مختلف فاصله هوایی.

Fig. 9. Effects of manufacturing tolerances (different air gaps) on the isolation of the designed GSHS switch.



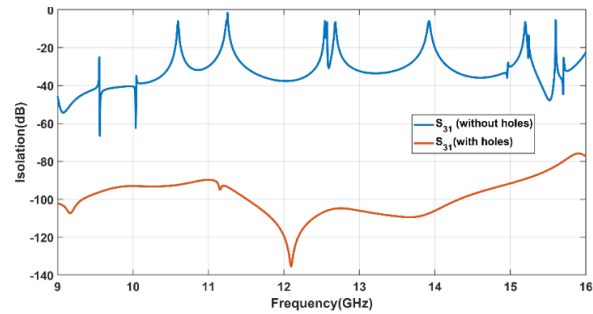
شکل ۱۰- اثر تolerانس ساخت و طول شکاف هوایی بر تلف بازگشتی سویچ طراحی شده.

Fig. 10. Effects of manufacturing tolerances (different air gaps) on the reflection coefficient.

محدوده توان

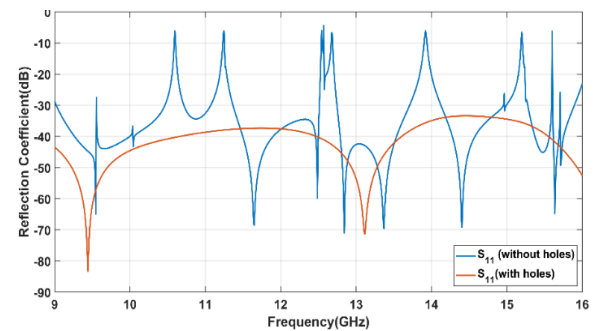
برای محاسبه محدوده توان قابل تحمل توسط سویچ طراحی شده، شبیه‌سازی دیگری در نرم‌افزار CST MWS با توان ورودی ۱ w در پورت انجام شد. در شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده و بیشینه میدان الکتریکی مشخص است.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین دامنه میدان الکتریکی ۳۷۵۰ V/m است که در فاصله شکاف هوایی ایجاد شده است. با توجه به اینکه میدان شکست هوا ۳ Mv/m است ظرفیت توانی سویچ در هوا ۶۴۰ kw به دست می‌آید. برای محاسبه توان قابل حمل یک قطعه مایکروویو علاوه بر شکست الکتریکی در هوا معیارهای دیگری مانند میزان افزایش دمای قطعه نیز بایستی در نظر گرفته شوند. از این رو بهتر است قطعه تا توان‌های بسیار کمتری از توان شکست



شکل ۷- مقایسه ایزولاسیون بین پورت‌های سویچ موج‌بری ساده و سویچ با استفاده از GSHS در حالت خاموش.

Fig. 7. Comparing the isolation between ports in the simple waveguide switch with GSHS switch in off-state.



شکل ۸- مقایسه ضریب انعکاس سویچ ساده و سویچ با استفاده از GSHS.

Fig. 8. Comparing the reflection coefficient in the simple waveguide switch with GSHS switch.

تأثیر تolerانس ساخت روی پارامترهای الکتریکی

یکی از پارامترهایی که بیشترین تأثیر را روی عملکرد سویچ دارد، طول شکاف هوایی (g) است. در شبیه‌سازی‌های دیگری که انجام شد، اثر تolerانس ساخت و تغییر این پارامتر از مقدار نامی ۰/۱ mm تا ۰/۱ ± ۱۵٪ و همچنین تغییر آن به ۰/۲ mm، روی پارامترهای الکتریکی بررسی شد.

نتایج در شکل ۹ نشان می‌دهند که با افزایش فاصله هوایی، ایزولاسیون کاهش می‌یابد. برای فاصله هوایی ۰/۲ mm ایزولاسیون در بعضی بازه‌های فرکانسی به ۲۰ dB نیز می‌رسد. ولی وقتی فاصله هوایی به ۰/۱ mm کاهش می‌یابد، ایزولاسیون پورت‌ها در بازه فرکانسی مورد نظر بیشتر از ۸۰ dB خواهد بود.

اثر تolerانس ساخت روی پارامتر تلف بازگشتی سویچ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر این تغییرات تا ۱۵٪ بر عملکرد سویچ ناچیز است. با تغییر مقدار g به ۰/۲ mm وضعیت تلف خروجی بدتر شده و در بعضی فرکانس‌ها به ۱۰ dB- نیز می‌رسد.

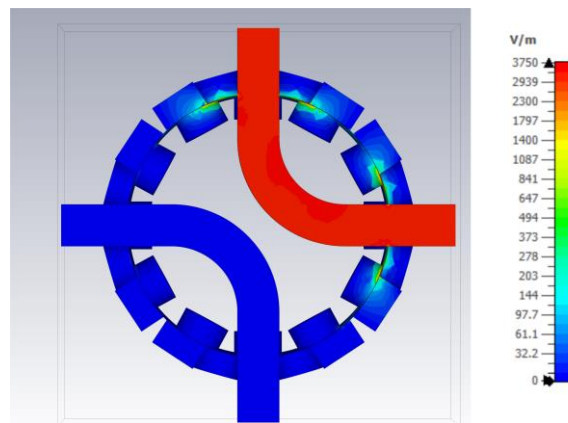
بحث و مقایسه

در این بخش از مقاله، سویچ موج‌بری طراحی شده با سویچ‌های طراحی شده در سه مرجع [۱۶، ۵، ۴] مقایسه می‌شود و نتایج این مقایسه در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

در مقایسه، هزینه ساخت سویچ‌های دیگر به دلیل نیاز به ماشین کاری دقیق بسیار بالاتر است. پهنای باند سویچ طراحی شده در این مقاله از کارهای دیگر بیشتر است. همچنین ایزولاسیون بین پورت‌های سویچ در وضعیت خاموش در طرح پیشنهاد شده در این مقاله به نسبت سویچ‌های طراحی شده در مراجع دیگر بیشتر است.

به دلیل هزینه ساخت کمتر و بهبود پارامترهای الکتریکی سویچ طراحی شده با استفاده از تکنیک GSHS، استفاده از این سویچ موج‌بری در ترانسپوندرهای Ku ماهواره‌ای پیشنهاد می‌شود.

الکتریکی (حدود یک‌دهم) مورد استفاده قرار گیرد. در ترانسپوندرهای مخابراتی توان اعمالی به سویچ در حد چند صد وات است که مقادیر فوق نشان دهنده عملکرد مناسب این سویچ در این کاربردها است.



شکل ۱۱- بیشینه میدان الکتریکی در سویچ برای توان ورودی یک وات در پورت ورودی.

Fig. 11. The maximum electric field in the switch for the input power of 1w.

جدول ۳- مقایسه پارامترهای سویچ طراحی شده با مراجع دیگر.

Table 3. Comparing the parameters of the designed switch with other references.

Parameter	Technology	Frequency band	Relative frequency band (%)	Reflection Coefficient (dB)	Isolation (dB)	Insertion loss (dB)	Manufacturing cost
[4]	Conductors covered by bed of nails	Ku-band (11-13.5GHz)	25	-30	60	0.1	High
[5]	Conductors covered by bed of nails	Ku-band (10.6-16GHz)	40	-20	75	0.1	High
[18]	Waveguide based on multiple short-circuit loads	Ku-band (13-14.5GHz)	10	-22	30	0.5	High
Present paper	Glide-symmetric holey structure	Ku-band (9-15GHz)	50	-35	80	0.05	Low

بهتری نسبت به سویچ‌های دیگری که از فناوری‌های دیگر استفاده می‌کنند، دارد. ایزولاسیون بین پورت‌های این سویچ بیشتر از ۸۰ dB، پهنای باند نسبی آن بیشتر از ۵۰٪ در باند Ku است. تلف عبوری سویچ کمتر از ۰/۰۵ dB و ضریب انعکاس آن کمتر از ۳۵- است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سویچ موج‌بری DPDT با استفاده از یک EBG جدید، پیشنهاد و طراحی شده‌است. ساختار EBG پیشنهاد شده در این مقاله به صورت سوراخ‌دار متقارن است و هیچگونه برجستگی که منجر به نیاز به تراشکاری دقیق و افزایش هزینه شود، روی آن وجود ندارد. نتایج طراحی و شبیه‌سازی نشان داد که سویچ ابداعی در این مقاله وضعیت ایزولاسیون، ضریب انعکاس و افت عبوری

مراجع

- link diplexer application," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 5, pp. 870–879, 2013, <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2012.2231140>.
- [10] B. Ahmadi and A. Banai, "Direct coupled resonator filters realized by gap waveguide technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 10, pp. 3445–3452, 2015, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2457916>.
- [11] B. Ahmadi and A. Banai, "Substrateless amplifier module realized by ridge gap waveguide technology for millimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 11, pp. 3623–3630, 2016, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2607177>.
- [12] B. Ahmadi and A. Banai, "Substrate-less oscillator module realized by gap waveguide technology for millimeter wave applications," in *47th European Microwave Conference (EuMC)*, Nuremberg, Germany, 2017, pp. 1116–1119, <https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231043>.
- [13] M. G. Silveirinha, C. A. Fernandes, and J. R. Costa, "Electromagnetic characterization of textured surfaces formed by metallic pins," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 2, pp. 405–415, 2008, <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.915442>.
- [14] E. Rajo Iglesias and P. S. Kildal, "Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realised by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides," *IET Microwaves, Antennas Propagation*, vol. 5, no. 3, pp. 282–289, 2011, <https://doi.org/10.1049/iet-map.2010.0073>.
- [15] M. Ebrahimpouri, A. A. Brazalez, L. Manholm, and O. Quevedo Teruel, "Using glide-symmetric holes to reduce leakage between waveguide flanges," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 6, pp. 473–475, 2018, <https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2824563>.
- [16] J. A. Ruiz Cruz, M. M. Fahmi, and R. R. Mansour, "Generalized multiport waveguide switches based on multiple short-circuit loads in power-divider junctions," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 12, pp. 3347–3355, 2011, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2170089>.
- [1] V. K. Varadan, K. J. Vinoy, and K. A. Jos, *RF MEMS & Their Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, <https://doi.org/10.1002/0470856602>.
- [2] L. A. Belov, S. M. Smolskiy, and V. N. Kochemarov, *Handbook of RF, Microwave & Millimeter Wave Components*, Artech house, 2012, <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS2010035>.
- [3] Z. N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing, and T. Zwick, *Handbook of Antenna Technologies*, Singapore: Springer, 2016, <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-44-3>.
- [4] J. Tayebpour, B. Ahmadi, M. Fallahzadeh, O. Shekoofa, and A. Torabi, "A waveguide switch based on contactless gap waveguide technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, No. 12, pp. 771–774, 2019, <https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2950164>.
- [5] A. J. Alazemi, D. Zarifi, and A. Farahbakhsh, "A broadband contactless gap waveguide microwave switch for X- and Ku-bands applications," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 139, 2021, Art. no. 153929, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153929>.
- [6] M. Ebrahimpouri, O. Quevedo-Teruel, and E. Rajo-Iglesias, "Design guidelines for gap waveguide technology based on glide-symmetric holey structures," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 27, no. 6, pp. 542–544, 2017, <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2701308>.
- [7] M. Ebrahimpouri, E. Rajo-Iglesias, Z. Sipus, and O. Quevedo-Teruel, "Cost-effective gap waveguide technology based on glide-symmetric holey EBG structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 2, pp. 927–934, 2018, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2764091>.
- [8] E. Alfonso, A. U. Zaman, E. Pucci, and P. S. Kildal, "Gap waveguide components for millimetre-wave systems: Couplers, filters, antennas, MMIC packaging," in *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Nagoya, Japan 2012, pp. 243–246.
- [9] E. A. Alós, A. U. Zaman, and P. S. Kildal, "Ka-band gap waveguide coupled-resonator filter for radio