

Original Research Paper

Design of an S-Band Diplexer for Telemetry and Telecommand Subsystems in LEO Satellites

Behzad Ahmadi*, Razieh Narimani , and Elham Hosseini 

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

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 01 May 2024

Revised 22 September 2024

Accepted 25 September 2024

Available Online 13 October 2024

Keywords:

Diplexer

LEO satellites

S-band

Telemetry and telecommand subsystem

Filter

ABSTRACT

This study investigates the design requirements for telemetry and telecommand subsystems in satellites operating in low Earth orbit (LEO) and outlines the specifications for a diplexer suited for the S-band frequency range. The analysis emphasizes the critical impact of transmitter signal leakage and noise floor levels on diplexer performance. The proposed diplexer incorporates two bandpass filters operating at distinct frequency bands, enabling simultaneous transmission and reception through a single antenna in two-way communication systems. One of the primary design challenges stems from satellites' limited power generation capabilities, necessitating a strong focus on minimizing power consumption across all subsystems. In this context, reducing power loss in the telemetry and telecommand subsystem is crucial, as the diplexer directly influences transmitter power consumption and receiver sensitivity. Therefore, achieving minimal transmission loss is a critical design objective, which requires employing high-quality factor (Q-factor) technologies in the design of the filters. While waveguides provide superior Q-factors, their large dimensions and high mass render them unsuitable for S-band applications in satellite systems. Similarly, due to sublayer losses, ceramic substrate technologies, such as microstrip and stripline, fall short of the required Q-factor. To overcome these limitations, this study introduces a diplexer designed using coaxial technology, which offers an optimal balance of high Q-factor, compact dimensions, and low mass. The designed diplexer achieves a return loss greater than 20 dB, a transmission loss of less than 0.5 dB, and an isolation exceeding 50 dB, meeting the stringent requirements of LEO satellite subsystems.

*Corresponding Author's E-mail: b.ahmadi@isrc.ac.ir**How to Cite this Article:**B. Ahmadi, R. Narimani, and E. Hosseini, "Design of an S-Band diplexer for telemetry and telecommand subsystems in LEO satellites," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 14-27, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1485>.**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/).

طراحی دیپلکسر باند S برای زیرسیستم تله متری و تله کامند ماهواره های LEO

بهزاد احمدی^{۱*}، راضیه نریمانی^۲، و الهام حسینی^۳

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

۲- مربی، پژوهشکده سامانه های ماهواره پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله ضمن بررسی الزامات موجود در زیرسیستم تله متری و تله کامند یک ماهواره در مدار LEO، مشخصات مورد نیاز دیپلکسر جهت استفاده در این زیرسیستم در باند فرکانسی S استخراج شده و تاثیر نشت سیگنال فرستنده و کف نویز فرستنده بر روی مشخصات دیپلکسر، مورد مطالعه قرار گرفته است. دیپلکسر دارای دو فیلتر میان گذر با فرکانس های گذر متفاوت است که در سیستم های مخابراتی دوطرفه هم زمان، ارسال و دریافت را از طریق یک آنتن امکان پذیر می کند. به دلیل سختی تولید توان در ماهواره ها یکی از قیود اصلی طراحی مربوط به توان مصرفی هر زیرسیستم است و به همین دلیل تا حد امکان می بایست از اتلاف توان جلوگیری شود. از آن جا که در زیرسیستم تله متری و تله کامند وجود دیپلکسر هم در مسیر ارسال و هم در مسیر دریافت باعث تاثیر قابل توجه بر توان مصرفی فرستنده و حساسیت گیرنده می شود، الزام اولیه در طراحی این قطعه کمینه کردن تلف عبوری آن است که این مهم به معنای استفاده از فناوری هایی با ضریب کیفیت بالا در طراحی فیلتر است. استفاده از موجبرهای توخالی با وجود در اختیار گذاشتن ضریب کیفیت بسیار بالا، در باند S به دلیل ابعاد و جرم بالا مرسوم نیست. فناوری های مبتنی بر زیرلایه های سرمایی مانند مایکرواستریپ و استریپ لاین نیز به دلیل تلفات زیر لایه ها ضریب کیفیت مورد نیاز را برآورده نمی کند. با توجه به این مسائل، در این مقاله با استفاده از فناوری کابل های هم محور با سطح مقطع مربعی که هم ضریب کیفیت مناسب و هم ابعاد و جرم کمی دارند، طراحی دیپلکسر انجام شده است. دیپلکسر طراحی شده دارای تلف بازگشتی بهتر از 20 dB، تلف عبوری کمتر از 0.5 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB است.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۳
بازنگری ۰۱ مهر ۱۴۰۳
پذیرش ۰۴ مهر ۱۴۰۳
اولین انتشار ۲۲ مهر ۱۴۰۳

واژه های کلیدی:

دیپلکسر
ماهواره های LEO
باند S
زیرسیستم تله متری و تله کامند
فیلتر

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.ahmadi@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

B. Ahmadi, R. Narimani, and E. Hosseini, "Design of an S-Band diplexer for telemetry and telecommand subsystems in LEO satellites," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 14-27, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1485>.



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/).



علائم و اختصارات

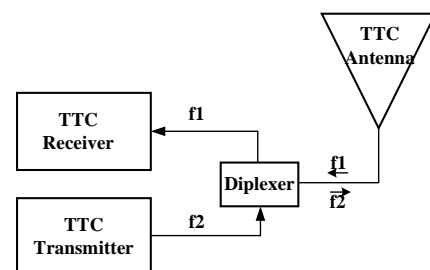
BPF	فیلتر میان گذر
Diplexer	دیپلکسر
LEO	مدار پایین زمین
LNA	تقویت کننده کم نویز
TT&C	زیرسیستم تله متری و تله کامند

مقدمه

مالتی پلکس‌های مایکروویوی با داشتن ویژگی‌های مهمی مانند انتخابی بودن باند فرکانسی، تحمل توان بالا و ایزولاسیون بالا، نقش مهمی در مخابرات ماهواره‌ای ایفا می‌کنند. یکی از کاربردی‌ترین آن‌ها، دیپلکسرها هستند. دیپلکسر یک باند فرکانسی را به دو زیرباند فرکانسی باریک‌تر تقسیم می‌کند و از دو فیلتر میان‌گذر با فرکانس‌های گذر متفاوت تشکیل شده است. در سیستم‌های مخابراتی دوطرفه هم‌زمان، ارسال و دریافت از طریق یک آنتن به کمک این تجهیزات امکان‌پذیر می‌شود.

در این قطعه که عموماً به شکل سه دهانه طراحی می‌شود، یک دهانه آن به‌عنوان دهانه مشترک در نظر گرفته شده و دو دهانه دیگر مربوط به فیلترهای میان‌گذر است [۶-۱]. اکثر دیپلکسرها طراحی شده بر اساس فیلترهای میان‌گذر با استفاده از خواص سلفی یا خازنی [۸، ۷] و یا تیغه‌های فلزی [۹، ۱۰] هستند.

زیرسیستم تله متری و تله کامند یک ماهواره LEO در باند فرکانسی S دارای یک فرستنده تله متری و یک گیرنده تله کامند است که با توجه به قوانین ITU باند ارسال داده‌های تله متری 2110-2025 MHz و باند دریافت کامند 2290-2200 MHz است. محدودیت جرم و ابعاد در ماهواره‌ها موجب تمایل طراحان در استفاده از یک آنتن برای ارسال و دریافت شده است و از آن‌جا که نوع این لینک ارتباطی، دوطرفه هم‌زمان است و هنگام ارسال داده‌های تله متری، باید امکان دریافت کامندهای زمینی در ماهواره نیز وجود داشته باشد، استفاده از دیپلکسر جهت اتصال فرستنده و گیرنده به آنتن ضروری است. بلوک دیاگرام این زیرسیستم و اتصالات مربوطه در شکل ۱ آمده است [۱۱].



شکل ۱- بلوک دیاگرام زیرسیستم تله متری و تله کامند [۱۱].

Fig. 1. TT&C subsystem block diagram [11].

گام نخست در طراحی، تعیین الزامات و مشخصات فنی مورد نیاز است. با توجه به پیشرفت ارتباطات فضایی در ماهواره‌های LEO، چالش‌های طراحی دیپلکسر در افت عبوری پایین، توان قابل تحمل بالا و ایزولاسیون محدود نشده و توجه به محدودیت‌های جرمی و ابعادی و تحمل شرایط محیطی سخت مانند شوک و لرزه بالا در کنار این مشخصات الکتریکی بسیار حائز اهمیت است [۱۲]. مطالعات بسیاری در خصوص ساختارهای مختلف دیپلکسر جهت استفاده در ماهواره و ایستگاه‌های زمینی در [۱۷-۱۳] انجام شده است.

در این مقاله ابتدا الزامات طراحی دیپلکسر تعیین شده و مشخصات مورد نیاز جهت طراحی به دست می‌آید. سپس با استفاده از فناوری خط انتقال کواکسیال با سطح مقطع مربعی، طراحی دیپلکسرهایی جهت استفاده در زیرسیستم TT&C در باند S یک ماهواره LEO در فرکانس‌های مرکزی 2097 MHz و 2221 MHz ارائه شده است.

تعیین الزامات دیپلکسر

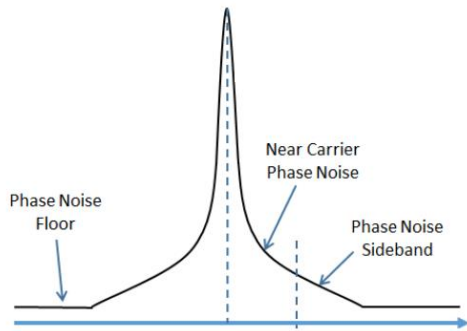
تعیین الزامات و مشخصات فنی هر قطعه در یک سیستم ماهواره‌ای گام اول برای ساخت و پیاده‌سازی آن به‌شمار می‌رود. در ماهواره‌ها به دلیل سختی تولید توان، یکی از اصلی‌ترین قیدهای طراحی مربوط به توان مصرفی هر زیرسیستم است. بنابراین بایستی تا حد امکان از اتلاف توان جلوگیری شود. در زیرسیستم تله متری و تله کامند وجود دیپلکسر هم در مسیر ارسال و هم در مسیر دریافت باعث تأثیر قابل توجه بر توان مصرفی فرستنده و حساسیت گیرنده می‌شود. از این‌رو الزام اولیه در طراحی این عنصر کمینه کردن تلف عبوری برای آن است. این امر باعث می‌شود توان تولید شده در فرستنده تله متری با کمترین تلف به آنتن منتقل شده و همچنین عدد نویز سیستم نیز پایین بماند.

محاسبه تلف عبوری مورد نیاز در یک سیستم بر اساس محاسبات بودجه لینک است که در این مقاله تلف عبوری بهتر از 1 dB به‌عنوان معیار طراحی در نظر گرفته شده است. پایین بودن این افت در یک فیلتر نیز به معنای استفاده از فناوری‌هایی با ضریب کیفیت بالا است. استفاده از موجبرهای توخالی هر چند که ضریب کیفیت بسیار بالا را در اختیار ما قرار می‌دهند، به دلیل ابعاد و وزن بالا در باند S مرسوم نیست [۳].

الزام مهم دیگری که در طراحی دیپلکسر بایستی در نظر گرفته شود مربوط به ایزولاسیون میان فرستنده و گیرنده است. در ادامه به محاسبات مورد نیاز برای تخمین میزان این الزام می‌پردازیم.

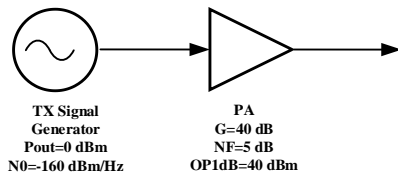
محاسبه ایزولاسیون مورد نیاز

همانطور که در بلوک دیاگرام شکل ۱ نشان داده شده است، فرستنده



شکل ۳- طیف سیگنال خروجی یک فرستنده.

Fig. 3. A typical transmitter output signal spectrum.



شکل ۴- بلوک دیاگرام یک فرستنده.

Fig. 4. A typical transmitter block diagram.

با توجه به بلوک دیاگرام فرستنده نشان داده شده در شکل ۴ و با در نظر گرفتن کف نویز تولید کننده سیگنال (-170 dBm/Hz)، با داشتن یک تقویت کننده توان با بهره 40 dB و عدد نویز 5 dB، کف نویز خروجی فرستنده در محدوده 125 dBm/Hz قرار خواهد گرفت.

یک گیرنده با عدد نویز 3 dB دارای کف نویز معادل 171 dBm/Hz در ورودی است. بنابراین برای این که فرستنده کاهش حساسیت قابل توجهی را بر گیرنده تحمیل نکند با در نظر گرفتن حاشیه 3 dB، ایزولاسیون دیپلکسر باید از 49 dB بیشتر باشد.

با قرار دادن یک فیلتر در خروجی تقویت کننده توان، می توان ایزولاسیون کمتری را در طراحی دیپلکسر در نظر گرفت ولی افزودن این فیلتر علاوه بر افزایش وزن باعث ایجاد تلفات عبوری در خروجی تقویت کننده توان شده و توصیه نمی شود.

در نهایت با در نظر گرفتن این دو شرط، و مقادیر فرض شده برای فرستنده و گیرنده تله متری و گیرنده تله کامند که از الزامات سیستمی به دست آمده بودند، الزام ایزولاسیون مورد نیاز دیپلکسر در سطح طراحی سیستمی 50 dB تعیین شد.

محاسبه مرتبه فیلترها

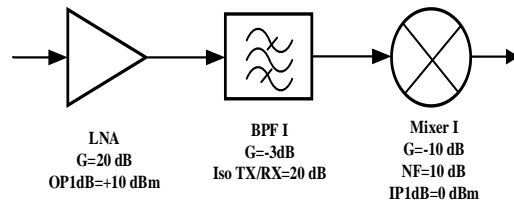
هر یک از کانال های دیپلکسر شامل یک فیلتر میان گذر است که تعیین مرتبه آن ها بر اساس ایزولاسیون مورد نیاز در دیپلکسر و تلف عبوری

و گیرنده از طریق دیپلکسر به یکدیگر و در نهایت به آنتن متصل شده اند.

در صورت امکان نشت سیگنال فرستنده به گیرنده در عملکرد آن اختلال از دو طریق ایجاد می شود:

- نشت سیگنال فرستنده در باند ارسال موجب اشباع طبقات ورودی گیرنده شود.
- نشت کف نویز فرستنده در باند دریافت به گیرنده، حساسیت آن را کاهش دهد.

شکل ۲ طبقه ورودی یک گیرنده را نشان می دهد. در صورت اتصال این گیرنده به دیپلکسری که کانال دیگر آن یک فرستنده 10 وات قرار دارد، و از آن جا که تقویت کننده های کم نویز ورودی گیرنده عموماً پهن باند هستند، نشتی سیگنال فرستنده وارد ورودی گیرنده می شود.

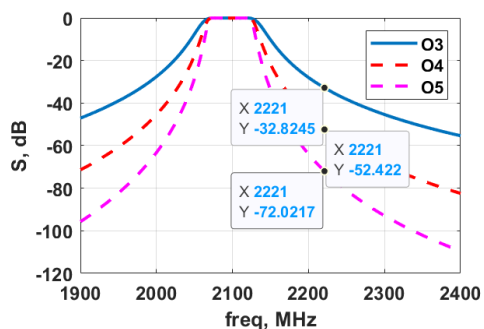


شکل ۲- طبقه ورودی یک گیرنده.

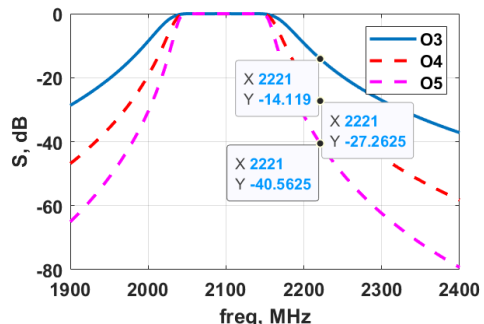
Fig. 2. A typical receiver front-end.

بر اساس مشخصات قطعات به کار رفته در شکل ۲، سیگنالی با سطح توان 10 dBm موجب اشباع گیرنده می شود. با داشتن توان سیگنال ارسالی (40dBm)، می توان الزام اولیه ایزولاسیون بین فرستنده و گیرنده یعنی 50 dB را به دست آورد.

در گام بعد نشت کف نویز و کاهش حساسیت گیرنده می بایست مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۲، فیلتر میان گذری که بعد از LNA قرار دارد، به ایزولاسیون بیشتر میان گیرنده و فرستنده کمک می کند؛ ولی در صورت نشت کف نویز از دیپلکسر، با توجه به این که این نویز در باند کاری گیرنده قرار دارد، این فیلتر دیگر کمکی به حل مشکل نکرده و این مسئله باید توسط دیپلکسر حل شود. شکل ۳ طیف سیگنال خروجی یک فرستنده را نشان می دهد. در فرکانس های نزدیک فرکانس حامل، نویز فاز زیاد بوده و با افزایش فاصله از حامل، کف نویز فرستنده را خواهیم داشت. از آن جا که عموماً در انتخاب فرکانس زیرسیستم TT&C، فاصله فرکانسی میان فرستنده و گیرنده زیاد در نظر گرفته می شود، فرکانس کاری گیرنده در محدوده کف نویز فرکانس کاری فرستنده قرار می گیرد.



(C)



(D)

شکل ۵- پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه ۳ تا ۵ و پهنای باند الف) 10MHz، ب) 20MHz، ج) 50MHz، د) 100MHz.

Fig. 5. Frequency response of the 3 to 5 order filters and bandwidth a) 10MHz, b) 20MHz, c) 50MHz, d) 100MHz.

جدول ۱- ایزولاسیون فیلترهای شکل ۵.

Table 1. Isolation of filters presented in Fig.5.

O/BW(MHz)	10	20	50	100
3	75	57	32	14
4	105	84	52	27
5	142	112	72	40

جدول ۲- تلف عبوری فیلترهای شکل ۵.

Table 2. Insertion loss of filters presented in Fig.5.

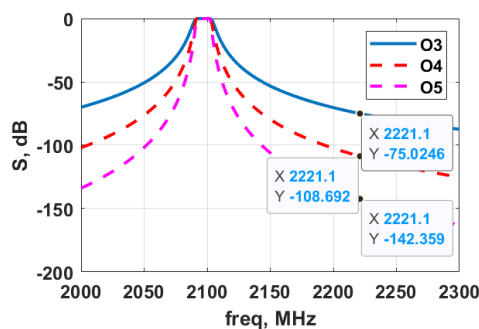
O/BW(MHz)	10	20	50	100
3	2.5	1.4	0.5	0.25
4	4.1	2.1	0.85	0.45
5	5.9	2.9	1.2	0.6

علاوه بر فیلترهای اشاره شده، دو روش دیگر نیز در طراحی فیلترها می‌تواند در نظر گرفته شود. دسته اول استفاده از فیلترهای دارای صفر انتقال

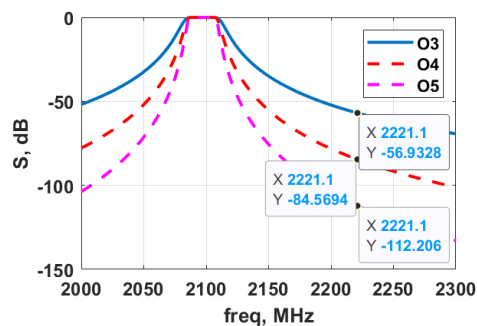
مورد قبول تعیین می‌شود. شکل ۵، پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه ۳ تا ۵ را برای پهنای باندهای مختلف نشان می‌دهد. و در جداول ۱ و ۲ جمع‌بندی این شبیه‌سازی‌ها از منظر ایزولاسیون و تلف عبوری بیان شده است. در جدول ۲ تلف عبوری برای فیلترهای با ضریب کیفیت رزانتور ۱۰۰۰ ارائه شده است. این ضریب کیفیت معادل با ساخت رزانتورها با فلزی مانند آلومینیوم است. در صورتی که از نقره برای پوشش آن استفاده کنیم می‌توان ضریب کیفیت بالاتری را نیز به دست آورد. اما مشکلات نگه داری نقره در محیط غیر خلا مانند اکسیداسیون آن باعث شده است که در این مقاله از آلومینیوم در شبیه‌سازی‌ها استفاده شود. محاسبات این بخش با کدهای نرم افزاری توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب و بر مبنای روش طراحی فیلترها با روش ماتریس تزویج ارائه شده در [۲] انجام شده است.

بررسی نتایج شبیه‌سازی فیلترها در کنار الزام ایزولاسیون و افت عبوری، درجه فیلتر مورد نیاز را تعیین خواهد کرد. از سوی دیگر با توجه به نرخ بیت لینک‌های TT&C، پهنای باندهای مورد نیاز در این لینک‌ها عموماً در حد چند کیلو یا چند صد کیلوهرتز است. از آنجایی که پیاده‌سازی عناصر فیزیکی مانند فیلترها با این پهنای باند در باند فرکانسی S مقدور نیست، در طراحی سخت‌افزار کمترین پهنای باند قابل پیاده‌سازی، در نظر گرفته می‌شود.

به‌عنوان مثال در صورت نیاز به ایزولاسیون بهتر از 50dB در کنار افت عبوری بهتر از 1dB، فیلتری با مرتبه ۴ و پهنای باند 50MHz مناسب است.



(A)



(B)

طراحی فیلترهای مایکروویو

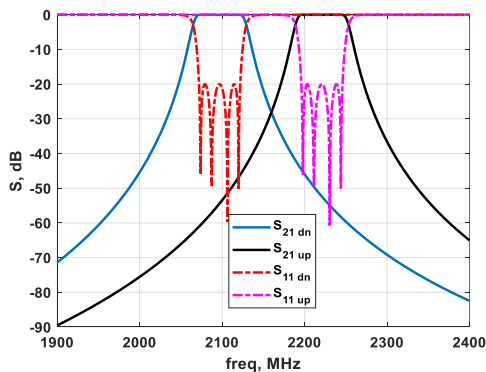
پس از تعیین الزامات و مشخصات دیپلکسر، گام نخست جهت طراحی و ساخت دیپلکسر، طراحی فیلترهای میان‌گذر آن است. روش طراحی و پیاده سازی فیلترها در این مقاله روش ماتریس تزویج است که در [۳] ارایه شده است. کدهای نرم افزاری مورد نیاز برای استفاده از این روش در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده و محاسبه ماتریس‌ها با استفاده از این کدها صورت گرفته است. پاسخ‌های فرکانسی ارایه شده در این بخش نیز با استفاده از نرم‌افزار CST به‌دست آمده‌اند. در این روش ابتدا برای طراحی فیلتر بایستی ساختار آن انتخاب شود سپس ماتریس تزویج متناسب با آن فیلتر محاسبه می‌شود. هر یک از عناصر ماتریس تزویج نشان دهنده یک کمیت فیزیکی در فیلتر هستند. به‌عنوان مثال عناصر روی قطر اصلی نشان دهنده‌ی میزان انحراف فرکانس رزونانس رزنا توره‌های فیلتر از فرکانس مرکزی فیلتر هستند. سایر عناصر نیز نشان‌دهنده میزان تزویج میان رزنا توره‌های مختلف هستند. تزویج‌های مغناطیسی مقداری مثبت دارند و تزویج‌های الکتریکی دارای مقداری منفی هستند [۳]. مزیت طراحی با این روش قدرت بالای آن در مرحله تنظیم پاسخ فرکانسی فیلترها است. با استفاده از روش استخراج پارامتر [۳] می‌توان پاسخ‌های اولیه فیلترها را به‌خوبی تنظیم کرد و مراحل بهینه‌سازی را به کمترین حد رساند. در این روش برای بهینه‌سازی نیازی به استفاده از بهینه‌سازهای کور مانند الگوریتم‌های جستجوی کور و ژنتیک و غیره نیست [۴].

فیلترهای مرتبه ۴

ماتریس تزویج مورد نیاز فیلترهای مرتبه ۴ به‌صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.035154 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.035154 & 0 & 0.91058 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.91058 & 0 & 0.699925 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.699925 & 0 & 0.91058 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.91058 & 0 & 1.035154 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.035154 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

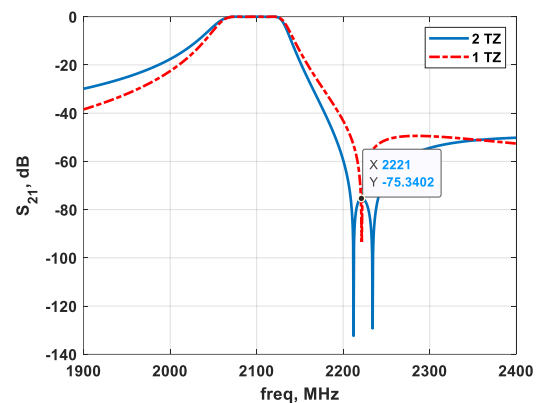
شکل ۸ پاسخ فرکانسی این ماتریس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، این فیلترها الزامات مورد نیاز را برآورده می‌نمایند.



شکل ۸- پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه چهار با پهنای باند 50MHz.

Fig. 8. Frequency response of the 4-order filter with 50MHz bandwidth.

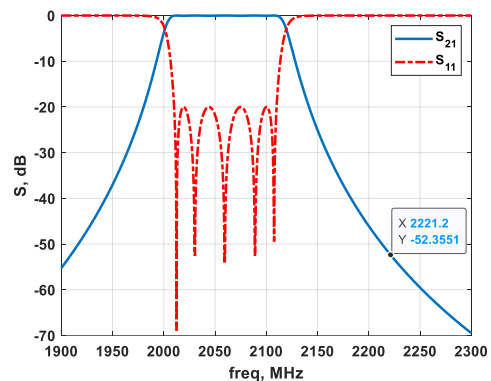
و دسته دوم استفاده از شیفت فرکانسی در پاسخ فیلترهای با پهنای باند بالاتر است. استفاده از صف‌های انتقال برای افزایش شیب ناحیه گذر فیلترها امری متداول است. شکل ۶ یک فیلتر مرتبه ۳ با پهنای باند 50MHz و یک و دو صفر انتقال را نشان داده است. بر اساس نتیجه مشاهده شده، در این نوع فیلتر همزمان الزام ایزولاسیون و تلف عبوری را برآورده می‌شود. هر چند استفاده از صف‌های انتقال نتایج را بهبود می‌بخشد، اما با توجه به مشکلات پیاده سازی و نیاز به فناوری بالاتر، در این مقاله به پیاده‌سازی آنها پرداخته نشده است ولی این فیلترها می‌توانند به‌عنوان پاسخی بالقوه در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۶- پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه سه با یک و دو صفر انتقال و پهنای باند 50MHz.

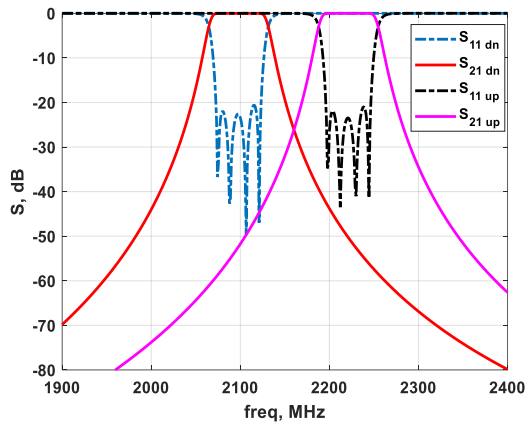
Fig. 6. Frequency response of the 3 order filters with one and two transmission zeros and 50MHz bandwidth.

برای داشتن تلف عبوری کمتر می‌توان از فیلترهایی با پهنای باند بیشتر استفاده کرده و الزام ایزولاسیون را با شیفت فرکانس مرکزی فیلتر برآورده نمود. شکل ۷ با تغییر فرکانس مرکزی یک فیلتر مرتبه ۵ با پهنای باند 100MHz را نشان می‌دهد که همزمان الزام ایزولاسیون و تلف عبوری را برآورده نموده است.

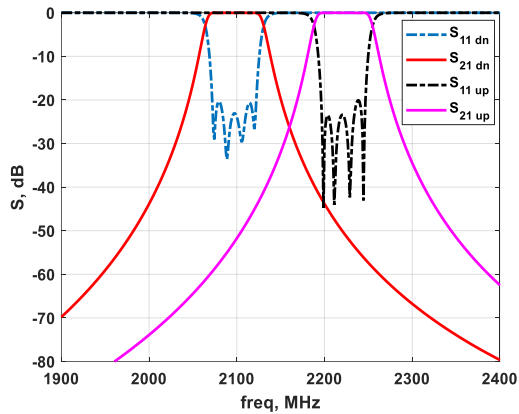


شکل ۷- پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه پنج با پهنای باند 100MHz.

Fig. 7. Frequency response of the 5-order filter with 100MHz bandwidth.



(A)



(B)

شکل ۱۱- پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۴ با پورت های (الف) دایروی و (ب) مربعی.

Fig. 11. Frequency response of 4 order filter with a) circular b) square coaxial ports.

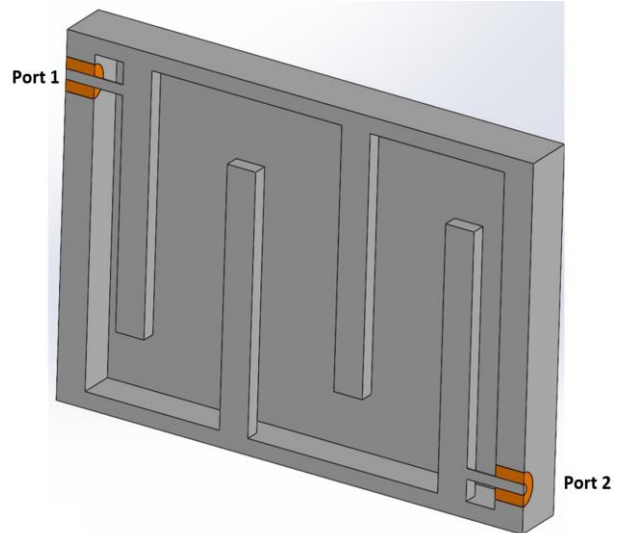
فیلترهای مرتبه ۵

دسته دیگر فیلترها که برای پیاده‌سازی دیپلکسر استفاده خواهیم کرد فیلترهای مرتبه ۵ شیفت یافته هستند. ماتریس تزویج مورد نیاز برای این فیلترها به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.07842 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.07842 & 0 & 0.928502 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.928502 & 0 & 0.662687 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.662687 & 0 & 0.662687 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.662687 & 0 & 0.928502 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.928502 & 0 & 1.07842 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.07842 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

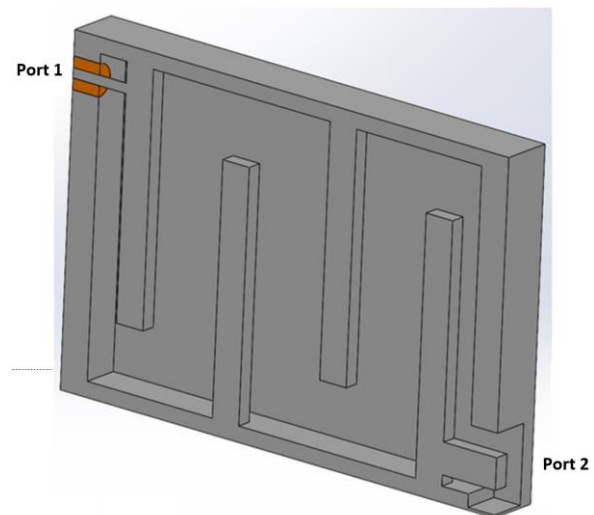
شکل ۱۲ پاسخ فرکانسی این ماتریس را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود، این فیلترها الزامات مورد نیاز را برآورده می‌نمایند.

همان طور که پیش تر هم اشاره شد، استفاده از تشدیدگرهای کواکسیال و فناوری کابل‌های هم‌محور به دلیل دارا بودن ضریب کیفیت مناسب و ابعاد و جرم پایین، در پیاده‌سازی فیلترها متداول است. جهت ماشین‌کاری راحت‌تر و دقیق‌تر نیز سطح مقطع مربعی برای این تشدیدگرها در نظر گرفته شده است. شکل ۹ نمای کلی این فیلترها را نشان داده است.



شکل ۹- نمای فیلتر مرتبه چهار با پورت‌های ورودی و خروجی کواکس دایروی.

Fig. 9. The 4-order filter with circular coaxial input and output ports.



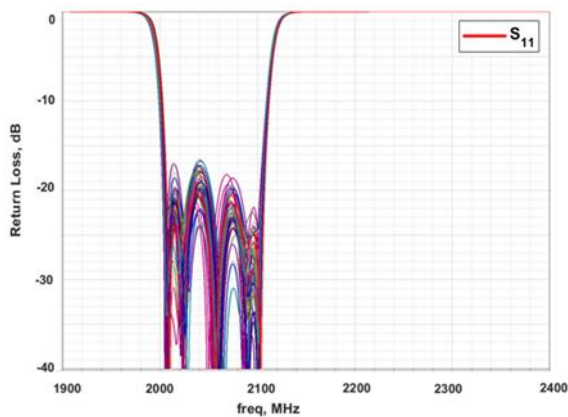
شکل ۱۰- نمای فیلتر مرتبه چهار با پورت ورودی مربعی و خروجی دایروی.

Fig. 10. The 4-order filter with square coaxial input and circular coaxial output ports.

تحلیل حساسیت

برای پیاده‌سازی و ساخت فیلترهایی که پیش‌تر اشاره شد، معمولاً از ماشین‌کاری بلوک‌های فلزی استفاده می‌شود که در حالت عادی، دقتی در حد ۵۰ میکرومتر و در حالت دقیق، دقتی در حد ۲۰ میکرومتر دارند. معمولاً برای بررسی خطاهای تصادفی ساخت از تحلیل حساسیت ساختار استفاده می‌شود. در این روش به ابعاد ساختار، خطاهایی با دامنه کنترل شده و به‌صورت تصادفی اعمال شده و پاسخ به‌دست آمده بررسی شده و در صورتی که پاسخ حساسیت بالایی به تolerانس‌های اعمالی نداشته باشد می‌توان انتظار داشت که نتایج ساخت با نتایج شبیه‌سازی مطابقت قابل‌قبولی داشته باشد.

شکل زیر پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۵ شیفت یافته را با اعمال تolerانس‌های ساخت تا ۱۰۰ میکرومتر نشان داده‌است. در این شبیه‌سازی هر بار یکی از ابعاد به‌صورت تصادفی تغییر کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تلف بازگشتی کماکان بهتر از ۱۷ dB است که نشان‌دهنده عدم حساسیت فیلتر به این میزان تolerانس در ساخت است. از آنجایی که سایر فیلترها نیز مشابه هستند می‌توان این نتیجه را به سایر فیلترها تعمیم داد و نیازی به بررسی حساسیت آن‌ها نیست.

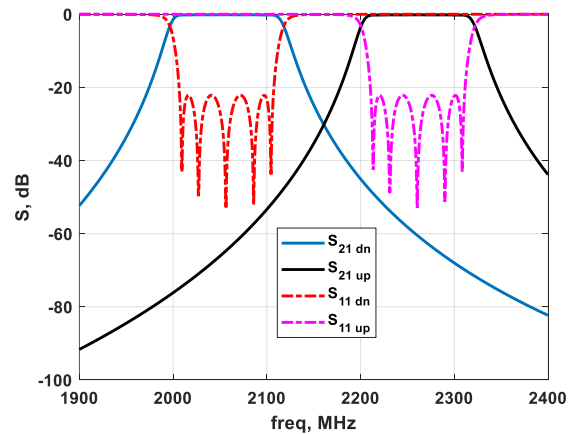


شکل ۱۴- تحلیل حساسیت فیلتر به تغییرات ابعادی تا ۱۰۰ میکرومتر.

Fig. 14. Sensitivity analysis of the 4-order filter.

طراحی دیپلکسر

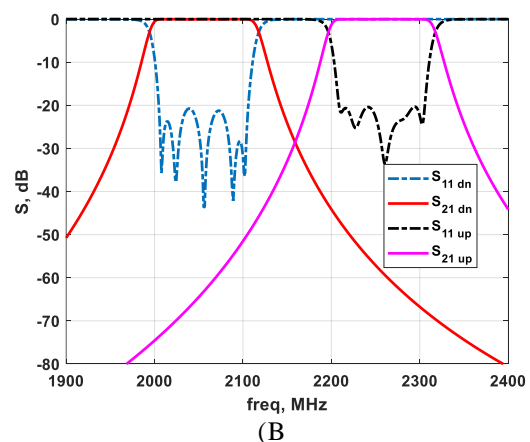
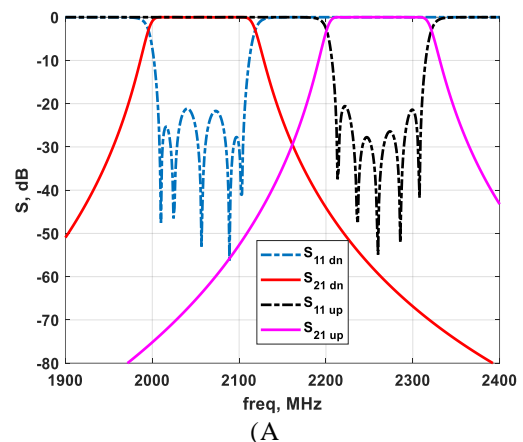
در طراحی دیپلکسر، دو فیلتر میان‌گذر در دو باند فرکانسی مختلف باید طوری کنار یکدیگر قرار گیرند که یا پاسخ فرکانسی فیلترها دچار کمترین تغییرات شود و یا بتوان با روشی تغییرات ناشی از کنار هم قرارگرفتن فیلترها را جبران نمود. در ادامه مقاله دو روش برای پیاده‌سازی دیپلکسر ارائه می‌شود. در روش اول تنها از فیلتر باند دریافت استفاده می‌شود و دیپلکسر با استفاده از مقسم‌های توان ۹۰ درجه‌ای طوری پیاده‌سازی می‌شود که سیگنال‌های ارسالی با کمترین تلف به آنتن



شکل ۱۲- پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه پنج با پهنای باند 100MHz و شیفت فرکانسی.

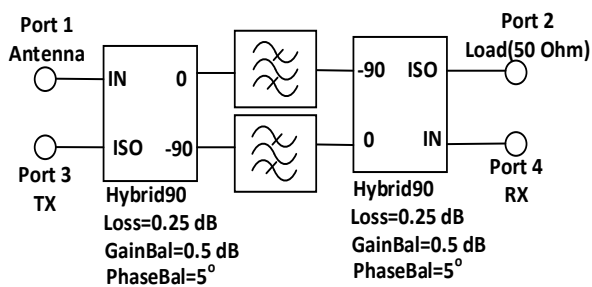
Fig. 12. Frequency response of the shifted frequency 5-order filter with 100MHz.

به منظور پیاده‌سازی این فیلتر، از تشدیدگرهای کوکسیال با سطح مقطع مربعی استفاده می‌کنیم.



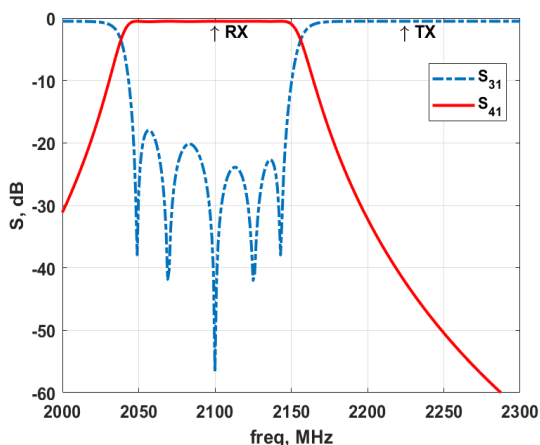
شکل ۱۳- پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۵ با پورت‌های (الف) دایروی و (ب) مربعی.

Fig. 13. Frequency response of the 5-order filter with a) circular b) square coaxial ports.



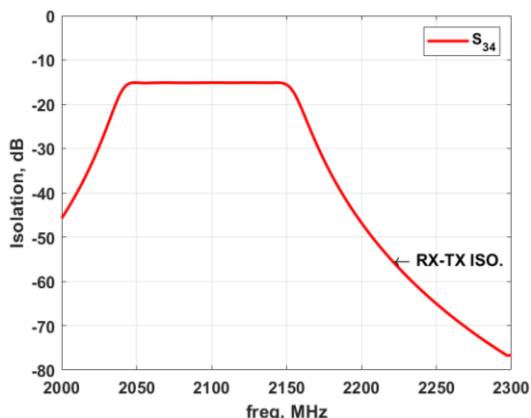
شکل ۱۶- نمای مداری دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان و فیلتر شکل ۱۴.

Fig. 16. The proposed combline diplexer using branch line power divider.



شکل ۱۷- پاسخ فرکانسی دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان.

Fig. 17. Frequency response of the proposed combline diplexer using branch line power divider.



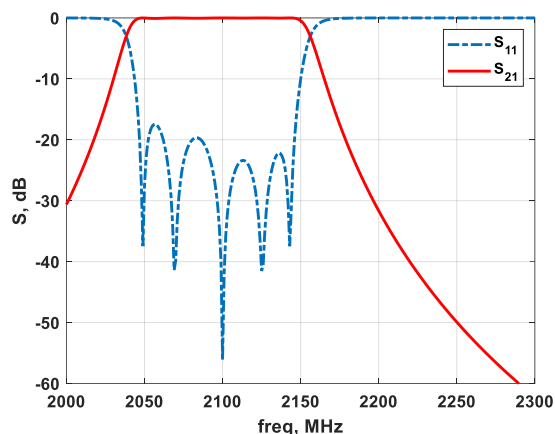
شکل ۱۸- ایزولاسیون دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان.

Fig. 18. Isolation of the proposed combline diplexer using branch line power divider.

منتقل شود و از نشت آن به گیرنده جلوگیری می‌شود. این دیپلکسر، دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان نامگذاری شده است. دسته دیگر که متداول تر هستند استفاده از یک تی (T) در ورودی و اتصال فیلترها به آن است [۲۰-۱۸] و سپس با اضافه کردن خطوط تاخیری در ورودی فیلترها و تی، اثر فیلترها روی همدیگر جبران می‌شود. این دیپلکسر را دیپلکسر با تزویج ستاره‌ای می‌نامند.

دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان

این دیپلکسر به یک فیلتر در باند دریافت نیاز دارد و با توجه به ساختار این دیپلکسر، سیگنال گیرنده از طریق پاسخ انتقال همان فیلتر از آنتن دریافت می‌شود و سیگنال فرستنده از طریق پاسخ انعکاسی فیلتر به آنتن می‌رود. ایزولاسیون مورد نیاز بین فرستنده و گیرنده از طریق همان یک فیلتر ایجاد می‌گردد. شکل ۱۵ پاسخ یک فیلتر مرتبه ۵ در فرکانس دریافت را نشان می‌دهد که از آن برای پیاده‌سازی دیپلکسر استفاده شده است.



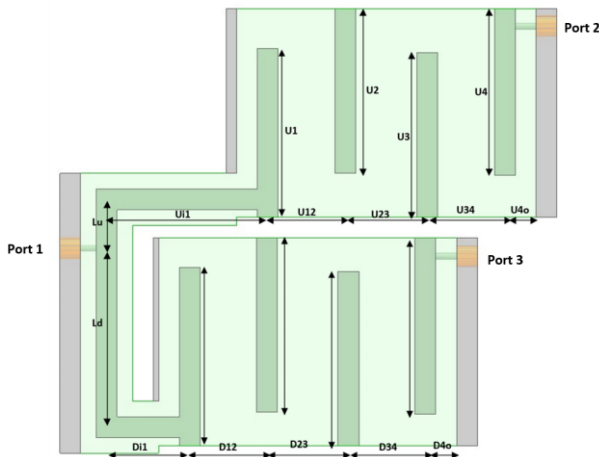
شکل ۱۵- پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۵ در فرکانس مرکزی گیرنده.

Fig. 15. Frequency response of the 5-order filter tuned to the center frequency of the receiver.

در شکل ۱۶ اتصال هیبریدها، فیلترها و دهانه‌های آنتن این دیپلکسر نشان داده شده است. در این شکل، در پورت شماره ۲، بار تطبیق قرار می‌گیرد. پورت شماره ۱ به آنتن متصل شده و پورت شماره ۳، فرستنده و پورت شماره ۴ به گیرنده متصل می‌شود. در شکل‌های ۱۷-۲۰ پاسخ فرکانسی این دیپلکسر نشان داده شده است که تلف بازگشتی بهتر از 20 dB و تلف عبوری کمتر از 1 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB دارد. این دیپلکسر هرچند طراحی و پیاده سازی ساده تری دارد اما به علت استفاده از هیبریدها، حجیم و سنگین است، بنابراین بهتر است از دیپلکسرهای ستاره‌ای برای ماهواره استفاده شود.

۱- دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار

در این بخش دیپلکسر نهایی با استفاده از فیلترهای مرتبه ۴ ارائه شده در بخش قبل مورد بررسی قرار می‌گیرد. شمای این دیپلکسر در شکل زیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ساختار این دیپلکسر کوچک و سبک است.



شکل ۲۱- نمای دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار به همراه پارامترهای طراحی آن.

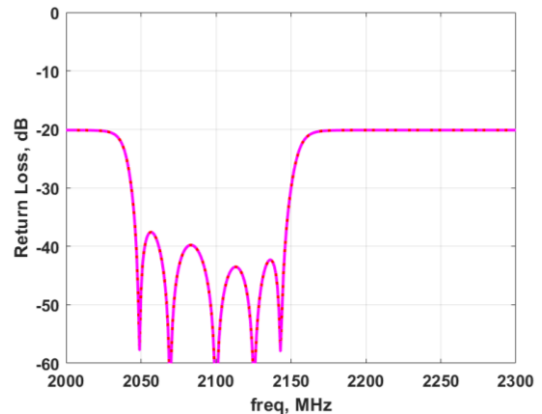
Fig. 21. The proposed 4 order combline diplexer using star junction.

در جدول ۳ ابعاد نهایی این دیپلکسر ارائه شده است. همانطور که در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ نشان داده شده است تلف بازگشتی بهتر از 20 dB، تلف عبوری کمتر از 1 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB به دست آمده است.

جدول ۳- ابعاد نهایی دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

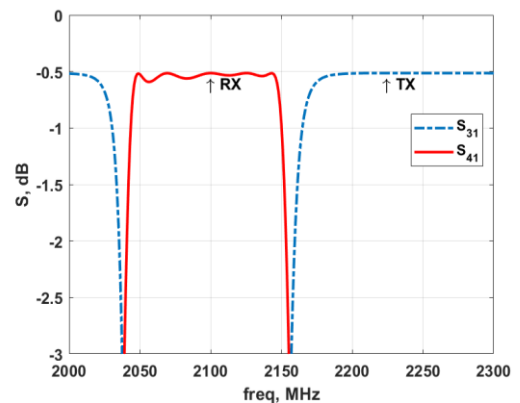
Table 3. Final dimension of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.

Dimension unit: Millimeter			
D1	31.24	U1	32.23
D2	33.39	U2	31.42
D3	33.52	U3	31.42
D4	33.93	U4	31.8
D12	14.65	U12	14.9
D23	15.71	U23	15.81
D34	14.8	U34	14.9
Di1	15.35	Ui1	29.7
D4o	3.5	U4o	5.35
Ld	34.24	Lu	8.86



شکل ۱۹- تلف بازگشتی دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان.

Fig. 19. Return loss of the proposed combline diplexer using branch line power divider.

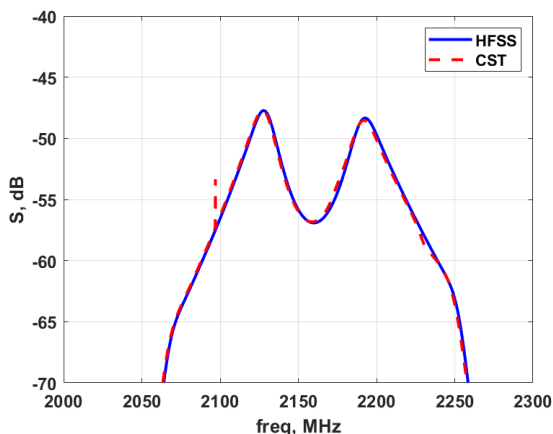


شکل ۲۰- تلف عبوری دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان.

Fig. 20. Insertion loss of the proposed combline diplexer using branch line power divider.

دیپلکسر با تزویج ستاره‌ای

این دسته از دیپلکسرها که متداول تر هستند، با استفاده از یک تی (T) در ورودی و اتصال فیلترها به آن پیاده‌سازی می‌شوند. اضافه کردن خطوط تاخیری در ورودی فیلترها برای جبران‌سازی اثر فیلترها روی همدیگر مورد نیاز است. در ادامه دو دیپلکسر از این دسته ارائه شده است. روش طراحی دیپلکسرهای ارائه شده در این بخش به این صورت است که ابتدا فیلترهای مورد نیاز با استفاده از روش ماتریس تزویج [۳] طراحی و با استفاده از روش استخراج پارامتر [۳] تنظیم شده‌اند. سپس با کنار هم قرار دادن آن‌ها در ساختار دیپلکسر ابعاد اضافه شده به‌همراه برخی از ابعاد ورودی و خروجی فیلترها با استفاده از بهینه‌سازی نرم‌افزاری تنظیم می‌شوند. برای بهینه‌سازی از CST استفاده شده است و پاسخ نهایی برای مقایسه با HFSS نیز شبیه‌سازی شده است.

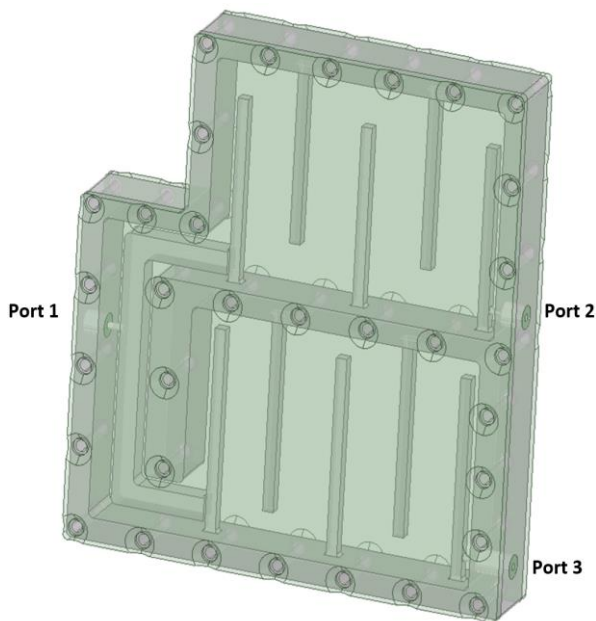


شکل ۲۵- ایزولاسیون دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

Fig. 25. Isolation of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.

۲- دیپلکسر با فیلترهای مرتبه ۵

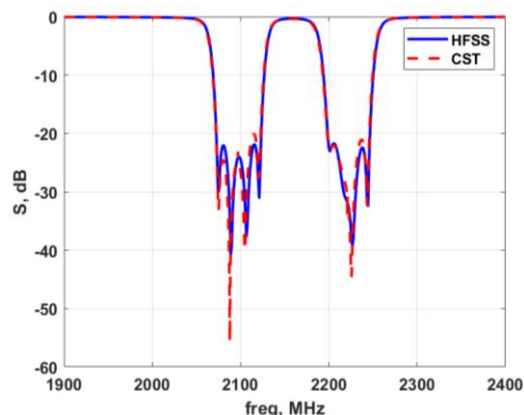
در این بخش دیپلکسر با استفاده از فیلترهای مرتبه ۵ شیفته یافته ارائه شده است. شمای این دیپلکسر در شکل ۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۲۶- نمای دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج

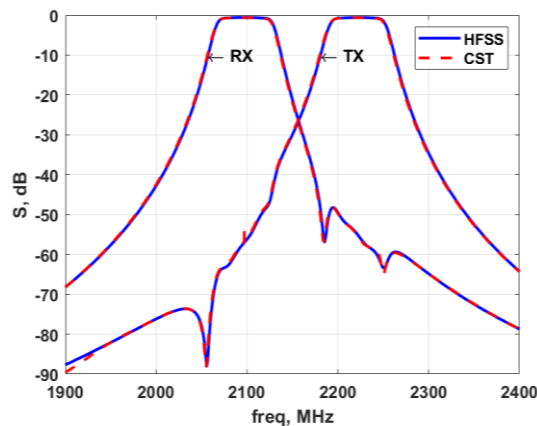
Fig. 26. The proposed 5-order combline diplexer using star junction.

ابعاد نهایی این دیپلکسر نیز در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که در شکل‌های ۲۷ تا ۳۰ نشان داده شده است تلف بازگشتی بهتر از 20 dB، تلف عبوری کمتر از 0.5 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB به دست آمده است.



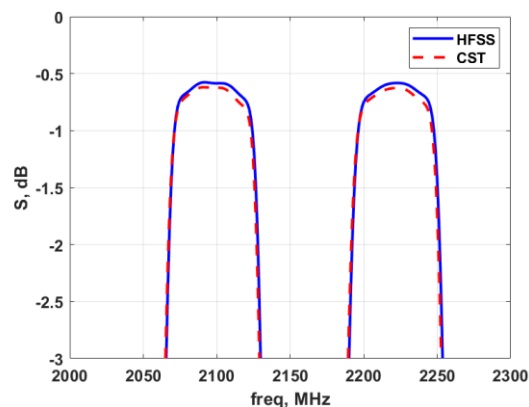
شکل ۲۲- تلف بازگشتی در دهانه مجموع دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

Fig. 22. Input return loss of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.



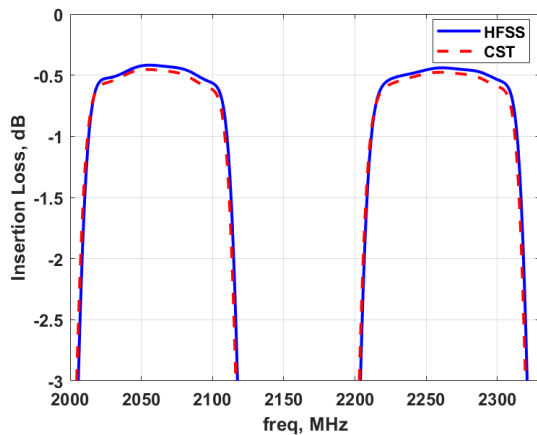
شکل ۲۳- پاسخ انتقال دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

Fig. 23. Frequency response of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.



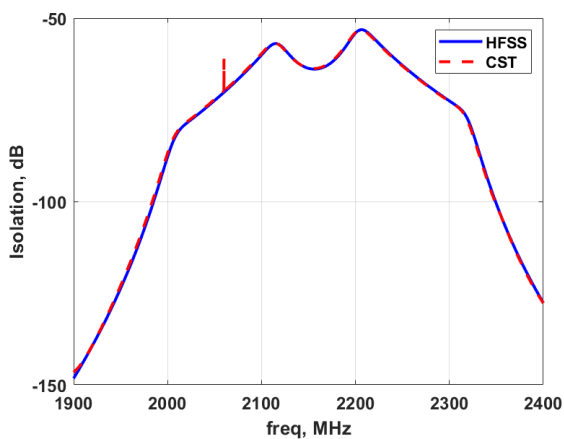
شکل ۲۴- تلف عبوری دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

Fig. 24. Insertion loss of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.



شکل ۲۹- تلف عبوری دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

Fig. 29. Insertion loss of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.



شکل ۳۰- ایزولاسیون دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

Fig. 30. Isolation of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.

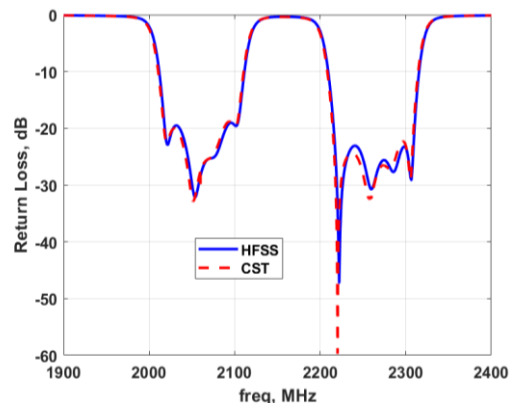
نتیجه گیری

دیپلکسر دارای دو فیلتر میان گذر با فرکانس‌های گذر متفاوت است که در سیستم‌های مخابراتی دوطرفه هم‌زمان، ارسال و دریافت را از طریق یک آنتن امکان‌پذیر می‌نماید و به علت محدودیت فضای موجود در ماهواره‌ها استفاده از آن‌ها به جهت کاهش تعداد آنتن مورد استفاده، رایج است. در این مقاله ابتدا الزامات موجود در زیرسیستم تله متری و تله کامند یک ماهواره در مدار LEO اشاره شده و مشخصات مورد نیاز دیپلکسر جهت استفاده در این زیرسیستم در باند فرکانسی S استخراج شده است. به دلیل محدودیت توان مصرفی ماهواره و اهمیت جلوگیری از اتلاف توان تولیدی، در طراحی این قطعه، تلف عبوری بسیار کم و استفاده از فناوری‌هایی با ضریب کیفیت بالا در طراحی فیلتر مورد توجه است. در این

جدول ۴- ابعاد نهایی دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

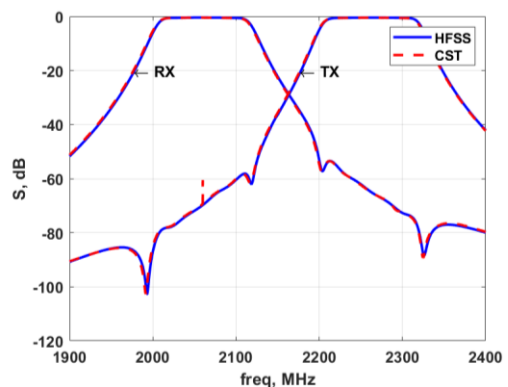
Table 4. Final dimension of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.

Dimension unit: Millimeter			
D1	35.14	U1	31.82
D2	34.21	U2	30.99
D3	34.22	U3	31
D4	34.21	U4	30.99
D5	34.96	U5	31.72
D12	12.74	U12	12.89
D23	13.76	U23	13.96
D34	13.76	U34	13.96
D45	12.64	U45	12.89
Di1	16.01	Ui1	33.02
D5o	4.03	U5o	5.02
Ld	36.3	Lu	11.12



شکل ۲۷- تلف بازگشتی در دهانه مجموع دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

Fig. 27. Input return loss of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.



شکل ۲۸- پاسخ انتقال دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

Fig. 28. Frequency response of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.

plane T-junction and its application to waveguide diplexer design," in *German Microwave Conference-GEMIC*, Karlsruhe, Germany, 2006.

- [9] J. Dittloff and F. Arndt, "Computer-aided design of slit-coupled H-plane T-junction diplexers with E-plane metal-insert filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 36, no. 12, pp. 1833-1840, 1988, <https://doi.org/10.1109/22.17420>.
- [10] E. Ofli, R. Vahldieck, and S. Amari, "Novel E-plane filters and diplexers with elliptic response for millimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 3, pp. 843-851, 2005, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.842506>.
- [11] A. V. G. Subramanyam, D. Sivareddy, V. V. Srinivasan, and V. K. Hariharan, "Multipaction-free combline diplexer for deep space applications," in *International Microwave and RF Conference (IMaRC)*, Bangalore, India, 2014, pp. 217-220, <https://doi.org/10.1109/IMaRC.2014.7039011>.
- [12] M. Fallahzadeh, B. Ahmadi, and A. Kheirdoost, "A low-profile interdigital diplexer for LEO satellites applications," in *31st International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tehran, Iran, 2023, pp. 32-35, [10.1109/ICEE59167.2023.10334910](https://doi.org/10.1109/ICEE59167.2023.10334910).
- [13] K. Kobrin, V. Rudakov, V. Sledkov, L. Zimeng, and M. Manuilov, "A novel design of wideband diplexer for base station applications," in *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, Russia, 2019, pp. 148-151, <https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792810>.
- [14] M. B. Manuilov and K. V. Kobrin, "Small-size waveguide diplexer based on E-plane quasi-planar filters," *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 59, no. 4, pp. 301-309, 2016, <https://doi.org/10.1007/s11141-016-9698-2>.
- [15] K. Kobrin, V. Rudakov, and M. Manuilov, "Compact design of diplexer for base stations operating within frequency bands 2.3–2.4/2.49–2.69GHz," in *29th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2019)*, (ITM Web of Conferences), vol. 30, 2019, Art. no. 06002, <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193006002>.
- [16] F. Teberio, I. Arregui, P. Soto, M. A. G. Laso, V. E. Boria and M. Guglielmi, "High-performance compact diplexer for Ku/K-band satellite applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 10, pp. 3866-3876, 2017, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2691773>.
- [17] E. M. Eldesouki, Kh. M. Ibrahim, and A. M. Attiya, "Analysis and design of a diplexer for satellite communication system," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*

مقاله با استفاده از فناوری کابل‌های هم محور با سطح مقطع مربعی که هم ضریب کیفیت مناسب و هم ابعاد و جرم کمی دارند، دیپلکسری با تلف بازگشتی بهتر از 20 dB، تلف عبوری کمتر از 0.5 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB طراحی شده است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] J. Uher, J. Bornemann, and U. Rosenberg, *Waveguide Components for Antenna Feed Systems: Theory and CAD*, Artech House, 1993.
- [2] A. Morini and T. Rozzi, "Analysis of compact E-plane diplexers in rectangular waveguide," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 8, pp. 1834-1839, 1995, <https://doi.org/10.1109/22.402268>.
- [3] R. J. Cameron, C. M. Kudisa, and R. R. Mansour, *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications*, 2nd ed., Wiley, 2018.
- [4] A. García Lampérez, S. Llorente Romano, M. Salazar Palma, and T. K. Sarkar, "Efficient electromagnetic optimization of microwave filters and multiplexers using rational models," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 2, pp. 508-521, 2004, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.822021>.
- [5] F. M. Vanin, D. Schmitt, and R. Levy, "Dimensional synthesis for wide-band waveguide filters and diplexers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 11, pp. 2488-2495, 2004, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.837146>.
- [6] U. Rosenberg, M. Knipp, and S. Amari, "Compact diplexer design using different E-plane triplets to serve contiguous passbands with high interband selectivity," in *European Microwave Conference*, Manchester, UK, 2006, pp. 133-136, <https://doi.org/10.1109/EUMC.2006.281218>.
- [7] J. M. Rebollar, J. R. Montejo Garai, and A. Ohoro, "Asymmetric H-plane T-junction for broadband diplexer applications," in *Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (C)*, Salt Lake City, UT, USA, 2000, pp. 2032-2035 vol.4, <https://doi.org/10.1109/APS.2000.874892>.
- [8] J. Bornemann and M. Mokhtaari, "The bifurcated E-

- Theory and Techniques*, vol. 58, no. 12, pp. 3732–3741, 2010, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2086570>.
- [20] P. Zhao and K. L. Wu, "An iterative and analytical approach to optimal synthesis of a multiplexer with a star-junction," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 12, pp. 3362–3369, 2014, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2364222>.
- [18] G. Macchiarella and S. Tamiazzo, "Novel approach to the synthesis of microwave diplexers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 12, pp. 4281–4290, 2006, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.885909>.
- [19] G. Macchiarella and S. Tamiazzo, "Synthesis of star-junction multiplexers," *IEEE Transactions on Microwave*