

طراحی و مدل‌سازی فیلتر تمام نوری بر اساس اتصال سری پنج تشدید کننده ریز حلقه

محمد رزاقی^۱ و محمد سیفی لاله^۲

۱) استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه کردستان، m.razaghi@uok.ac.ir

۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه کردستان

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۲۷

چکیده

در این مقاله اتصال سری پنج تشدید کننده ریز حلقه جهت ایجاد فیلتری نوری با مشخصه‌های مناسب با روش تحلیلی SFG مبتنی بر قاعده میسون شبیه‌سازی شده است. فیلتر طراحی شده، نسبت به فیلترهای سه و چهار حلقه‌ای رایج، دارای خصوصیات بهبود یافته‌ای است. از آن جمله می‌توان به بهبود ضریب شکل پاسخ فرکانسی، بازه طیفی آزاد و نرخ حذف تشدیدهای بینابینی آن اشاره کرد. همانطور که نشان داده خواهد شد توسط اتصال سری ۵ ریز حلقه مشابه، فیلتر را می‌توان بگونه‌ای طراحی کرد که به ضریب شکل پاسخ ۰/۸۴، و بازه طیفی آزاد ۱۰۰ گیگاهرتز دست یافت. جهت افزایش بازه طیفی آزاد می‌توان از اتصال سری ۵ ریز حلقه غیر یکسان استفاده کرد. با استفاده از این ساختار می‌توان فیلتری با ضریب شکل پاسخ ۰/۸، پهنای فرکانسی بسیار باریک و بازه طیفی آزادی ۱۰۰۰ گیگاهرتز طراحی کرد.

کلیدواژه

تشدید کننده ریز حلقه، فیلتر تمام نوری، اثر ورنیر، بازه طیفی آزاد، شبکه DWDM، روش SFG.

مقدمه

آزاد^۹ گسترده‌ای برای جا دادن شمار زیادی کانال نیاز دارند [۲]. بازه طیفی آزاد، فاصله فرکانسی یا طول موجی میان دو قله تشدید است. برای افزایش بازه طیفی آزاد این نوع فیلترها در کاربردهای مالتی‌پلکس تخصیص طول موج متراکم و بهبود عملکرد آنها، از فیلترهایی نوری بر پایه ترکیبی از تشدیدکننده‌های چند ریز حلقه استفاده می‌شود. این نوع فیلترها باید دارای پاسخ فرکانسی بالا مسطح و دارای قابلیت حذف فرکانس‌های خارج از باند در اطراف فرکانس تشدید باشند [۲-۴]. در این مقاله فیلتری نوری با استفاده از ترکیب پنج تشدیدکننده ریز حلقه با شعاع یکسان و سپس غیر یکسان طراحی شده است. با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی بین انواع فیلترهای نوری رایج، نشان داده خواهد شد که خصوصیات این فیلتر به گونه‌ای در طراحی در نظر گرفته شده که بتوان از آن در شبکه‌های مالتی‌پلکس تخصیص طول موج متراکم استفاده کرد. علاوه بر دستیابی به پاسخ فرکانسی بالا مسطح با ضریب شکل پاسخ^{۱۰} ۰/۸۴ توسط این فیلتر، بازه طیفی آزاد ۱۰۰۰ گیگاهرتز و پهنای باند فرکانسی مناسب نیز قابل دستیابی است. در این تحقیق ابتدا پارامترهای مهم اتصال چندین تشدیدکننده ریز حلقه بررسی می‌شود. در ادامه اثر ورنیر^{۱۱} بررسی می‌شود. سپس روش SFG^{۱۲} مبتنی بر قاعده میسون^{۱۳} ارائه می‌شود و در انتها نتایج مقاله مورد بحث قرار خواهد گرفت.

ساختار تشدید کننده‌های ریز حلقه، قابلیت استفاده در شبکه‌های نوری به عنوان فیلتر حذف/افزافه، پردازشگر سیگنال، سوئیچ، مدولاتور و مبدل طول موج را دارند. از ویژگی‌های آنها، ضریب کیفیت^۱ و قابلیت مجتمع‌سازی بالا است. در این ساختارها یک موجبر حلقوی در مجاورت دو موجبر مستقیم که اغلب به نام درگاه موجبر شناخته می‌شوند، قرار می‌گیرد. این گونه تشدیدکننده‌ها از مؤلفه‌های کلیدی در تولید ابزارهای مورد نیاز شبکه‌های مالتی‌پلکس تخصیص طول موج متراکم^۲ هستند. از مشخصات بارز این نوع ساختارها، قابلیت حذف باند توقف^۳ مناسب جهت تضمین هم‌نشویی^۴ بسیار کم میان کانال‌ها، پاسخ فرکانسی بالا مسطح^۵ و تلفات الحاقی^۶ کم است [۱].

با استفاده از تشدیدکننده‌های تک حلقه‌ای می‌توان فیلترهای نوری شبه لورنتزین^۷ ساده‌ای تولید کرد. اما این نوع پاسخ لورنتزین توانایی کمینه کردن هم‌نشویی میان کانال‌ها را ندارد. همچنین دارای قله تیزی است در حالی که یک فیلتر مناسب باید قله‌ای مسطح داشته باشد. به علاوه سیستم مالتی‌پلکس تخصیص طول موج متراکم، به فیلتری نوری با گزینندگی^۸ مناسب و بازه طیفی

1. Quality factor (QF)
2. Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)
3. Stopband rejection
4. Cross-talk
5. Flatter top
6. Insertion loss
7. Lorentzian
8. Selectivity

9. Free spectral range (FSR)

10. Shape factor

11. Vernier

12. Signal flow graph (SFG)

13. Mason's rule

پارامترهای مهم اتصال چندین تشدیدکننده ریزحلقه

پارامترهایی که در بررسی فیلترهای نوری براساس چندین تشدیدکننده ریزحلقه به کار می‌روند، پهنای باند، نرخ روشن-خاموش، ضریب شکل پاسخ و بازه طیفی آزاد است. در این نوع فیلترها پهنای باند، عمدتاً به ضریب تزویج و طول دور کامل نوری^{۱۴} بستگی دارد. نرخ روشن-خاموش برابر نسبت شدت تشدید در حالت روشن به شدت تشدید در حالت خاموش است. شکل جعبه‌ای پاسخ فرکانسی فیلتر نوری برای درگاه حذف/اضافه توسط رابطه ۱ مشخص می‌شود.

$$\text{Shape Factor (SF)} = \frac{-1 \text{ dB Bandwidth}}{-10 \text{ dB Bandwidth}} \quad (1)$$

بررسی اثر ورنیر

یکی از پارامترهای مهم فیلتر نوری مبتنی بر تشدیدکننده‌های ریزحلقه بازه طیفی آزاد است که به فاصله فرکانسی یا طول موجی میان دو قله تشدید اطلاق می‌شود. رابطه ۲ معادله بازه طیفی آزاد برای یک فیلتر تشدیدکننده ریزحلقه را نشان می‌دهد.

$$FSR = \frac{c}{2\pi R n_g} \quad (2)$$

در این رابطه c سرعت نور در خلا، n_g ضریب شکست گروه و R شعاع حلقه به کار رفته در ساختار است. با توجه به رابطه ۲ به دو روش می‌توان بازه طیفی آزاد را افزایش داد. روش اول کاهش L که ناشی از کاهش شعاع تشدیدکننده ریزحلقه است. با کاهش شعاع می‌توان بازه طیفی آزاد را افزایش داد اما این کاهش باعث ایجاد تلفات بیشتر ناشی از خمیدگی حلقه می‌شود. راه دیگر برای افزایش بازه طیفی آزاد، کاهش ضریب شکست گروه است. برای داشتن تلفات تابشی متعادل و خصوصیات مواد به کار گرفته شده در ساختار ریزحلقه‌ها این مولفه نیز نمی‌تواند تغییرات زیادی را داشته باشد. روش دیگر افزایش نسبی شعاع تشدیدکننده‌های ریزحلقه متصل به هم است به گونه‌ای که بازه طیفی آزاد، برابر کوچکترین مضرب مشترک بازه طیفی آزاد ریزحلقه‌های موجود در ساختار باشد. این روش که بدون تغییر در ضریب شکست گروه تشدیدکننده‌ها و با تغییر تدریجی شعاع مجموعه‌ای از ریزحلقه-های سری، بازه طیفی آزاد بزرگتری را تولید می‌کند به عنوان اثر ورنیر شناخته می‌شود [۲-۳]. در این روش بازه طیفی آزاد برای دو حلقه سری متصل شده به هم از معادله ۳ بدست می‌آید.

$$FSR_{total} = M \cdot FSR_1 = N \cdot FSR_2 \quad (3)$$

در این رابطه FSR_1 بازه طیفی آزاد تشدیدکننده ریزحلقه اول، FSR_2 بازه طیفی آزاد ریزحلقه دوم و پارامترهای M و N اعداد

طبیعی هستند که وابسته به شعاع حلقه‌های موجود در ساختار می‌باشند و در شکل ۲ نشان داده شده‌اند [۲ و ۵ و ۶].

روش SFG مبتنی بر قاعده میسون

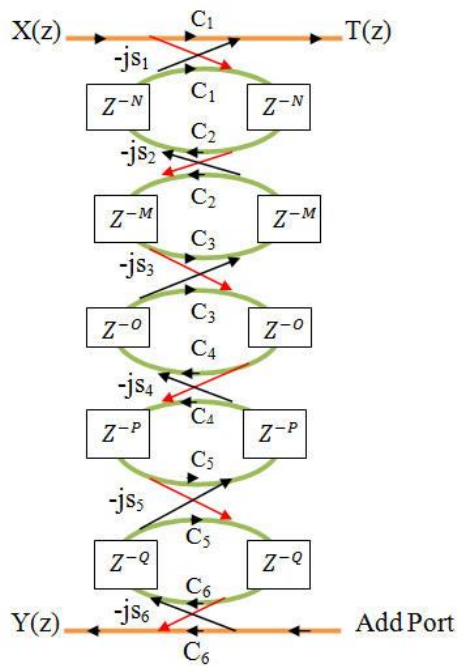
یکی از روش‌هایی که برای تحلیل مدارهای پیچیده نوری و محاسبه سریع تابع انتقال استفاده می‌شود روش SFG است [۲-۳]. این روش اولین بار توسط میسون در ۱۹۵۶ معرفی شد. این روش مبتنی بر انتخاب مسیری از گره مبداء به مقصد است بطوریکه از هر گره بیش از یک بار عبور نکنیم. این مسیر، مسیر پیشرو نامیده می‌شود. همچنین در این روش، حلقه به مسیری که گره ابتدا و انتهای آن یکی باشد اطلاق می‌شود. بهره حلقه به صورت حاصلضرب بهره تمام مسیرهای قرار گرفته در حلقه است. بنابراین تابع تبدیل H از گره ورودی X به گره مقصد Y از رابطه ۲ بدست می‌آید [۲ و ۵].

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \Delta_i}{\Delta} \quad (4)$$

در معادله ۴، Δ دلتای معین، n تعداد تشدیدکننده‌های ریزحلقه، T_i بهره مسیر i ام از ورودی به سمت مقصد و Δ_i برابر دلتای معین با حذف حلقه‌هایی است که با مسیر i ام تماس دارند. معادله ۳ رابطه دلتای معین را نشان می‌دهد [۴].

$$\Delta = 1 - \sum_i T_i + \sum_{i,j} T_i T_j - \sum_{i,j,k} T_i T_j T_k + \sum_{i,j,k,l} T_i T_j T_k T_l - \sum_{i,j,k,l,u} T_i T_j T_k T_l T_u \quad (5)$$

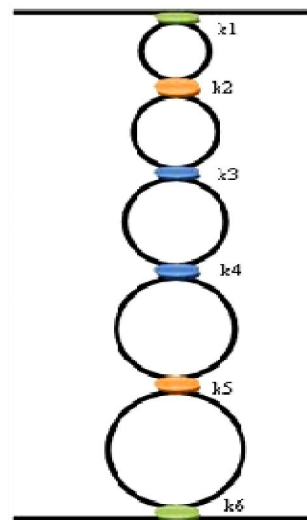
در هرکدام از حاصل جمع‌ها (سیگماها)، حاصلضرب برای حلقه‌های بدون تماس در نظر گرفته می‌شوند [۲ و ۳]. بهره مسیر i ام (T_i) حاصلضربی از ضریب عبور نور از میان درگاه‌های خروجی و حذف، ضریب عبور نور در مسیرهای متقاطع و ضرایب عبور نور در میان حلقه‌ها است. معماری فیلتر براساس اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است. ضریب تزویج برای i امین متصل کننده برابر k_i است. در کل ضرایب تزویج را به دو روش کنترل می‌کنند. این روش‌ها شامل کاهش فاصله میان موجبر مستقیم و حلقه تشدید تا حد ممکن و تغییر ساختار حلقه تشدید از حالت دایروی به میدان مسابقه است [۷ و ۸]. در حالت اول برای کنترل دقیق ضریب تزویج می‌توان نوع تزویج را به حالت تزویج عمودی تغییر داد. در این روش با استفاده از فرایندهایی همچون رشد همبافته می‌توان فاصله میان موجبرهای حلقه و مستقیم را به دقت تعیین کرد.



شکل ۲. دیاگرام SFG فیلتر نوری شکل ۱

مقایسه روش SFG با برخی روش‌های معمول عددی

روش تئوری مدهای تزویج شده^{۱۵} یکی از انواع روش‌های تحلیل تشدیدکننده‌های ریزحلقه در حوزه زمان است. در این روش پارامترهای مشخصه همچون ضرایب تزویج و ضریب کیفیت به صورت تئوری مورد تحلیل قرار می‌گیرند. همچنین در این روش تاثیر تغییر در ضریب شکست، پهنای موجبر، فاصله میان حلقه تشدید و موجبر مستقیم و شعاع حلقه تشدید بر مشخصه‌های سیگنال خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱۰]. این روش به همراه دیگر روش‌های عددی همچون FDTD^{۱۶} از دقت لازم در تحلیل تشدیدکننده‌های ریزحلقه برخوردار است. از آنجا که روش FDTD از تمامی پارامترهای موجبر و حلقه تشدید نظیر عرض موجبر، فاصله مابین حلقه تشدید و موجبر مستقیم، ضخامت حلقه تشدید استفاده می‌کند، دارای دقت بالایی است. این روش بر اساس گسسته کردن معادلات ماکسول در حوزه زمان است [۱۱]. برای بررسی رفتار تشدیدکننده‌های ریزحلقه در حوزه فرکانس می‌توان ساختار فیلتر را همانند شکل (۲) به حوزه Z برد و سپس با استفاده از روش SFG مبتنی بر قاعده میسون تابع انتقال درگاه خروجی به ورودی و درگاه حذف به ورودی را استخراج نمود. با این کار می‌توان مشخصه‌های حوزه فرکانس فیلتر همچون بازه طیفی آزاد و پهنای باند را مشاهده نمود. همچنین مشخصات باند عبور و حذف و هم‌نشایی برای فیلتر طراحی شده به این روش در حوزه فرکانس قابل مشاهده است. با توجه به تکنیک بکار گرفته شده در روش‌های FDTD و CMT با افزایش تعداد حلقه‌ها و در



شکل ۱. فیلتر نوری بر پایه اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه متفاوت

در ساختار میدان مسابقه قسمتی از تشدیدکننده که به موجبر مستقیم تزویج می‌شود بدون انحنا است. از این رو می‌توان فاصله بین موجبر حلقه و مستقیم را در تمام طول تزویج به صورت یکنواخت کاهش داد و تزویج را بهبود بخشید. می‌توان ضریب تزویج را به صورت رابطه‌ای بر حسب طول موج تشدید، ضریب شکست موثر، ضریب شکست پوسته (زیر لایه) و فاصله میان تشدیدکننده و موجبر مستقیم به صورت زیر نوشت [۸]:

$$k \approx \exp(-k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_0^2} \times g) \quad (6)$$

که در آن n_{eff} ضریب شکست موثر، n_0 ضریب شکست پوسته، g فاصله میان تشدیدکننده و موجبر مستقیم و $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ است. لازم به ذکر است با وجود استفاده ضرایب تزویج نزدیک به ۱ در بعضی مراجع همچون [۹ و ۲] تولید همچون ضرایبی در عمل بسیار دشوار است.

تلفات الحاقی برای هر اتصال دهنده برابر γ است. ضریب عبور نور از میان درگاه‌های خروجی و حذف $C_i = [(1-\gamma)(1-k_i)]^{1/2}$ است. ضریب عبور نور در مسیرهای متقاطع، $z^{-1} = -j[(1-\gamma)k_i]^{1/2}$ بیان می‌شود. گذر نور در میان تشدیدکننده‌های ریزحلقه با ضریب $(z^{-1} = xz^{-1})$ تعریف می‌شود که برابر تلفات نوری یک دور گردش کامل به دور حلقه است. $x = \exp(-\alpha L/2)$ و $z^{-1} = \exp(-j\beta L)$ است. در این معادلات L طول محیط تشدیدکننده ریزحلقه و β ثابت انتشار است. مقدار $\beta = Kn_{eff}$ که در آن K عدد موج و n_{eff} ضریب شکست مؤثر تشدیدکننده ریزحلقه است. در فیلتر نوری با ساختار پنج تشدیدکننده ریزحلقه مشابه، پارامترهای O, N, M, P و Q نشان داده شده در شکل ۲ برابر مقدار واحد در نظر گرفته شده است [۲]. نحوه محاسبه توابع عبوری در حلقه‌ها، توابع انتقال و تابع ورودی به خروجی در ضمیمه تشریح شده است.

15. Coupled Mode Theory (CMT)
16. Finite-Difference Time Domain (FDTD)

نتیجه آن افزایش مرتبه فیلتر، پیچیدگی حل بصورت ملموسی افزایش خواهد یافت. از این رو شبیه‌سازی فیلترهای مرتبه بالا و ساختارهای فیلتری دارای ترکیب پیچیده از حلقه‌ها با این روش‌ها مشکل و زمان‌بر است. این در حالی است که در روش SFG با استفاده از نظریه گراف و قاعده میسون سیستم را به صورت گره و شاخه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین بدست آوردن تابع انتقال برای سیستم‌های پیچیده با این روش ساده‌تر و سریعتر است.

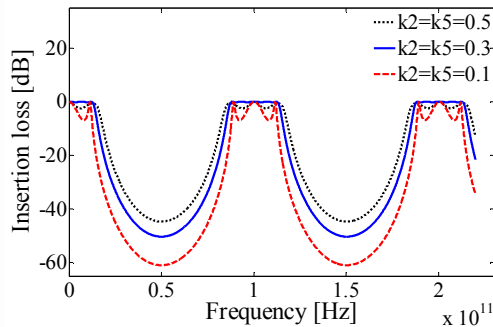
نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت ابتدا به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی تشدیدکننده‌های ریزحلقه با شعاع‌های مشابه پرداخته خواهد شد و سپس به مقایسه آنها با نتایج تشدیدکننده‌های ریزحلقه ورنیر (شعاع‌های غیر یکسان) پرداخته می‌شود. انتخاب پارامترهای ساختاری موجبر ریزحلقه و موجبر مستقیم براساس [۲] صورت گرفته است. از مشخصه‌های مهم فیلترهای نوری برپایه تشدیدکننده‌های ریزحلقه متقارن، ضریب شکل پاسخ مناسب (در حالت ایده‌آل مقدار واحد)، قله تشدید بالا مسطح، گذر از باند عبور به باند توقف سریع و پهنای باند 3 dB مناسب است. در فیلتر ساخته شده با اتصال سری تشدیدکننده‌های ریزحلقه، هر تشدیدکننده به موجبر باس و یا به تشدیدکننده دیگر متصل است. وقتی تشدیدکننده‌ها به بیش از یک موجبر تزویج بشوند میدان‌های داخلی در ورودی با هم تداخل می‌کند و شرایط تشدید تغییر می‌کند. اگر ضرایب تزویج داخلی از ضرایب تزویج خارجی بزرگتر باشند فوق تزویج رخ داده است [۱]. در این حالت قله طیف پاسخ در باند عبور به تعداد تشدیدکننده‌های ریزحلقه سری شده با هم، شکسته می‌شود یا به عبارتی دیگر باند عبور دارای ریپل است. در این حالت بازده تزویج بر تلفات یک دور گردش نور به دور حلقه غلبه می‌کند و دامنه شدت نور در حال گردش افزایش می‌یابد [۱]. اگر ضرایب تزویج داخلی از خارجی کمتر باشند حالت زیر تزویج رخ داده است. در این مورد باند عبور یک قله دارد و چون بازده تزویج از تلفات یک دور گردش نور به دور حلقه کمتر است، دامنه شدت تشدید کاهش می‌یابد [۱۲و۱]. بنابراین بهینه‌سازی ضرایب تزویج جهت دسترسی به طیف پاسخ جعبه‌ای مانند ضروری است. طبق شرایط انتقال بهینه، تابع انتقال فیلتر در درگاه خروجی باید صفر باشد [۱۲و۱]. جهت تخمین میزان تغییرات یک تابع از مشتق دوم آن تابع استفاده می‌شود. همچنین با توجه به روابط حاکم [۱] $\cos(BL)$ نشان دهنده دامنه توان انتقال یافته بروی درگاه حذف است. بنابراین اگر مشتق مرتبه دوم توان انتقالی بروی درگاه حذف نسبت به $\cos(BL)$ برابر صفر باشد یعنی انحنای طیف پاسخ در درگاه حذف صفر است. به عبارتی دیگر حداکثر تختی در باند عبور طیف انتقالی به درگاه حذف قابل دسترس است. این شرط برای درگاه حذف یکی از

شرایط تزویج بحرانی در تشدیدکننده‌های ریزحلقه است [۱]. اگر تشدیدکننده بدون تلف باشد شرایط تزویج بهینه برای درگاه حذف و خروجی برابر است. در این حالت پاسخ درگاه حذف جعبه‌ای مانند و طیف پاسخ درگاه خروجی تمام گذر عمیق، همزمان در دسترس است. یک تشدیدکننده واقعی دارای تلفات است پس ضرایب تزویج برای پاسخ درگاه حذف و خروجی برابر نیستند یا به عبارتی دیگر شکل جعبه‌ای مانند پاسخ درگاه حذف و پاسخ درگاه خروجی تمام گذر عمیق، همزمان در دسترس نیستند [۱۳]. بنابراین شرط اساسی $k_1 > k_2 > k_3$ برای دسترسی به شرایط زیر تزویج و در نتیجه طیف پاسخ با سطح بالایی مسطح و بدون ریپل در باند عبور و شیب تند گذر از باند عبور به باند حذف باید رعایت شود. معیاری که عموماً جهت تعیین میزان بهینه بودن پارامترهای انتخاب شده در یک فیلتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقایسه پاسخ طیفی آن با پاسخ طیفی فیلتر باتورث^{۱۷} یا چیبشف^{۱۸} است. با افزایش مرتبه فیلترهای باتورث، ریپل در باند عبور کاهش یافته و گذر از باند عبور به باند حذف سریعتر انجام می‌گیرد. بنابراین پاسخ فرکانسی فیلتر در باند عبور به شکل جعبه‌ای مانند نزدیکتر می‌شود. در این کار سعی شده که مخرج تابع انتقال از درگاه ورودی به درگاه حذف شبیه به مخرج تابع انتقال فیلتر باتورث هم مرتبه با فیلتر نوری طراحی شده، باشد [۱]. مرتبه فیلتر نوری، معادل تعداد ریز حلقه‌های تشدید بکار گرفته شده در آن است. جهت طراحی فیلتر مناسب برای سیستم‌های مالتی پلکس تخصیص طول موج متراکم، هدف دسترسی به فیلتری با ضریب شکل پاسخ بزرگتر از ۰/۸، ریپل در باند عبور کمتر از ۰/۲ دسیبل و افت دامنه سیگنال درگاه حذف در فاصله ۲۵ تا ۵۵ دسیبل است. با در نظر گرفتن شرایط بحرانی [۸] و [۹]، یکی از دسته جواب‌های مناسب، ضرایب تزویج $k_1=k_6=0.7$ ، $k_2=k_5=0.3$ و $k_3=k_4=0.21$ است. بررسی اثر تغییر ضرایب تزویج بیرونی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل ضرایب تزویج داخلی $k_2=k_5=0.3$ و $k_3=k_4=0.21$ هستند و تاثیر تغییر ضرایب تزویج بیرونی مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت مقادیر ۰/۷، ۰/۹، ۰/۴ برای ضرایب تزویج بیرونی قرار داده شده است. هدف اعمال ضریب تزویجی بیشتر و کمتر از مقدار معرفی شده برای ضرایب تزویج بیرونی و بررسی اثر آن بر نتایج شبیه‌سازی است. در نتایج بدست آمده در این حالت بازای شعاع ۱۳۶ میکرومتر برای هر ۵ ریز حلقه است. بازای $k_1=k_6=0.9$ مقدار ضریب شکل پاسخ ۰/۷۸۵ و پهنای باند فرکانسی ۴۱/۴۵ گیگاهرتز است. برای $k_1=k_6=0.7$ این ضرایب به ترتیب برابر با ۰/۸۴ و ۴۲/۵ گیگاهرتز است. با کاهش ضرایب تزویج بیرونی، مقدار تلفات قله نور حین عبور به سمت درگاه حذف بیش‌تر می‌شود که علت آن تلفات بیشتر حین اتصال

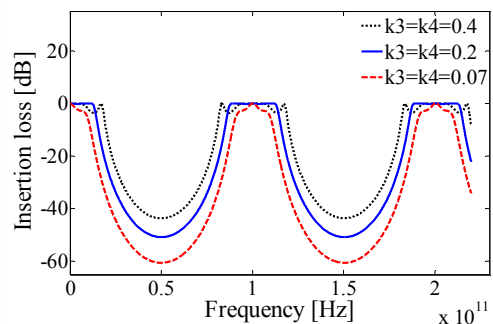
17. Butterworth

18. Chebyshev



شکل ۴. تغییر ضرایب اتصال داخلی $k_2=k_5$ بر مشخصه سیگنال درگاه حذف

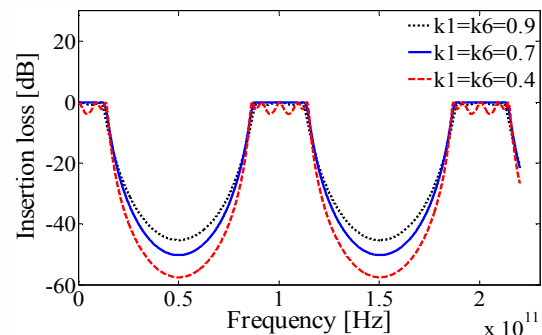
شکل ۵ اثر تغییر ضرایب تزویج داخلی $k_3=k_4$ بر مشخصه فیلتر را نشان می‌دهد. در این حالت ضرایب اتصال بیرونی $k_1=k_6=0.7$ و $k_2=k_5=0.3$ در نظر گرفته شده است. با تغییر ضرایب تزویج داخلی به مقادیر 0.4 ، 0.2 و 0.1 مقدار ضریب شکل پاسخ به ترتیب 0.189 ، 0.184 و 0.117 است. همچنین پهنای فرکانسی به ترتیب $44/47$ ، $5/42$ و $25/35$ گیگاهرتز است. در این مورد با تغییر ضرایب تزویج داخلی تلفات به دلیل عدم تزویج مناسب میان حلقه سوم با حلقه‌های دوم و چهارم رفتار فیلتر تغییر می‌کند. از طرفی با کاهش ضرایب اتصال داخلی k_3 و k_4 به علت عدم تطبیق حلقه سوم با حلقه‌های همسایه در فرکانس تشدید مرکزی، پدیده ناهمواری بیشتر در باند عبور و سطح بالا مسطح کمتر، را داریم. با افزایش ضریب داخلی به 0.4 هرچند مقدار مورد انتظار برای ضریب شکل پاسخ و پهنای فرکانسی مناسب را برآورد می‌کند، اما ریپل در باند عبور افزایش یافته و شیب گذر از باند عبور به توقف کاهش می‌یابد. نتیجه حاصله از تکرار شبیه‌سازی بازای ضرایب تزویج داخلی k_3 و k_4 مختلف جهت تولید فیلتری با مشخصه‌های مناسب، بازه 0.2 تا 0.25 است.



شکل ۵. تاثیر تغییر ضرایب داخلی $k_3=k_4$ بر مشخصه سیگنال درگاه حذف

در شکل ۶ اثر افزایش شعاع تشدیدکننده‌های ریزحلقه بر فیلتر اتصال سری متقارن بررسی می‌شوند. در حالتی که شعاع تمام تشدیدکننده‌های ریزحلقه 126 میکرومتر است، ضریب شکل پاسخ

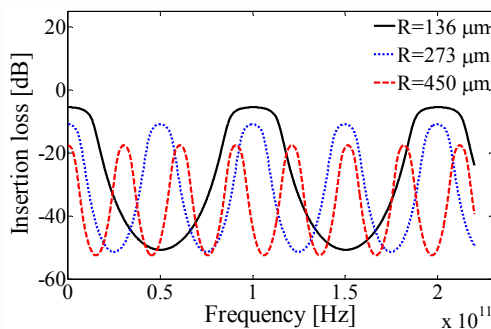
موجبر مستقیم به تشدیدکننده ریزحلقه است. بنابراین انتظار می‌رود با کاهش ضریب تشدید بیرونی 0.9 نسبت به 0.7 تلفات قله تشدید افزایش یابد. اما همانطور که در شکل ۳ نمایش داده شده این افزایش تلفات قابل اغماض است. با کاهش بیشتر ضریب تزویج بیرونی به 0.4 ، ضریب شکل پاسخ 0.1895 و پهنای فرکانسی برابر $38/40$ گیگاهرتز خواهد بود. در ضریب 0.4 و کمتر چون ضرایب تزویج بیرونی به ضرایب تزویج داخلی ($k_2=k_5=0.3$) نزدیکتر می‌شود به دلیل عدم تطبیق میان تشدیدکننده‌های ریزحلقه در فرکانس تشدید مرکزی باند عبور دارای ریپل بوده و سطح بالا مسطحی کاهش می‌یابد. نتیجه حاصله از تکرار شبیه‌سازی بازای ضرایب تزویج بیرونی k_1 و k_6 مختلف جهت تولید فیلتری با مشخصه‌های مناسب، بازه 0.7 تا 0.75 است.



شکل ۳. بررسی تغییر ضرایب تزویج بیرونی 0.9 ، 0.7 و 0.4

شکل ۴ اثر تغییر ضرایب تزویج داخلی $k_2=k_5$ بروی سیگنال درگاه حذف فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه‌ای متقارن را نشان می‌دهد. در این مورد ضرایب تزویج بیرونی $k_1=k_6=0.7$ و ضرایب تزویج داخلی $k_3=k_4=0.21$ در نظر گرفته شده است. بازای ضرایب 0.5 ، 0.3 و 0.1 ضرایب شکل پاسخ 0.1786 ، 0.184 و 0.191 هستند. همچنین پهنای فرکانسی $26/46$ ، $5/42$ و $4/35$ گیگاهرتز است. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، هرچند در ضرایب تزویج بزرگتر پهنای فرکانسی بیشتری حاصل می‌شود اما ضریب شکل پاسخ کمتر می‌شود. به طوریکه با نزدیک شدن این ضرایب تزویج به ضرایب تزویج بیرونی، سطح بالا مسطح تقریباً از بین رفته و باند عبور دچار ریپل خواهد شد. با کاهش این ضریب به 0.1 هرچند ضریب شکل پاسخ بهبود می‌یابد اما ریپل در باند عبور از مقدار تعریف شده بیشتر است. نتیجه حاصله از تکرار شبیه‌سازی بازای ضرایب تزویج داخلی k_2 و k_5 (جهت تولید ضریب شکل پاسخ بهینه و افزایش شیب گذر از باند عبور به باند توقف)، بازه 0.3 تا 0.35 است.

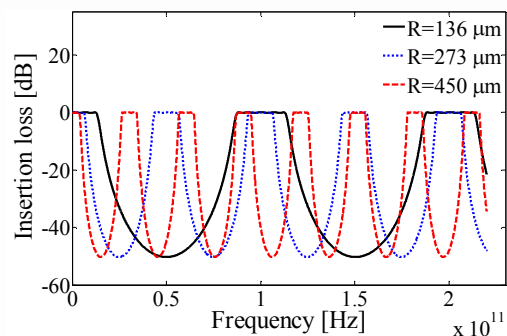
شعاع حلقه‌ها ۱۳۶ میکرومتر، ۲۷۳ میکرومتر و ۴۵۰ میکرومتر و ضرایب تزویج $k_1=k_6=0.7$ ، $k_2=k_5=0.3$ و $k_3=k_4=0.21$ انجام شده است. برای شعاع ۱۳۶ میکرومتر ضریب شکل پاسخ ۰/۵۶ و پهنای فرکانسی ۳۹/۸ گیگاهرتز است. از طرفی برای شعاع ۲۷۳ میکرومتر ضریب شکل پاسخ ۰/۴۷ و پهنای فرکانسی ۱۵/۹۶ گیگاهرتز است. همچنین برای ۴۵۰ میکرومتر ضریب شکل پاسخ ۰/۳۶۷ و پهنای فرکانسی ۱۳/۴۵ گیگاهرتز است. در این حالت به خوبی اثر افزایش شعاع بر تلفات حین گردش نور بدور حلقه دیده می‌شود. بازای شعاع‌های بزرگتر ضریب شکل پاسخ و پهنای فرکانسی کاهش می‌یابند. همچنین تلفات حلقه‌های تشدید بیشتر شده و سطح بالا مسطحی کاهش می‌یابد.



شکل ۳. تاثیر تغییر شعاع بر مشخصه درگاه حذف در تلفات ۳ dB/cm

شکل ۹ شعاع فیلترهای برپایه اتصال سری سه، چهار و پنج تشدیدکننده ریزحلقه متقارن با شعاع‌های ۱۳۶ میکرومتر را نشان می‌دهد. ضرایب تزویج در فیلتر سه حلقه‌ای $k_1=k_4=0.7$ و $k_2=k_3=0.3$ است. ضرایب تزویج برای فیلتر اتصال سری چهار تشدیدکننده ریزحلقه متقارن بصورت $k_1=k_5=0.7$ و $k_2=k_4=0.3$ و $k_3=0.21$ و برای فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه متقارن $k_1=k_6=0.7$ ، $k_2=k_5=0.3$ و $k_3=k_4=0.21$ است. با افزایش تعداد حلقه‌ها، ضریب شکل پاسخ افزایش یافته و در نتیجه پاسخ فرکانسی شکل جعبه‌ای مانند دارد و سطح بالا مسطح بیشتری خواهد داشت. ضریب شکل پاسخ برای فیلتر سه حلقه‌ای ۰/۶۳، در نوع چهار حلقه‌ای ۰/۷۶ و برای نوع پنج حلقه‌ای ۰/۸۴ است. فیلتر ساخته شده با پنج حلقه دارای سطح بالایی مسطح‌تر، شیب گذر از باند عبور به باند توقف بیشتر و ضریب شکل پاسخ بیشتری است. در نتیجه برای کاربرد در شبکه‌های مالتی‌پلکس تخصیص طول موج متراکم مناسب‌تر است.

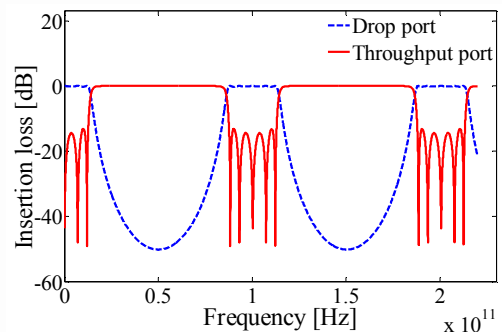
۰/۸۴ و پهنای فرکانسی ۴۲/۵ گیگاهرتز است. با افزایش شعاع تشدیدکننده‌های ریزحلقه به ۲۷۳ میکرومتر، ضریب شکل پاسخ ۰/۸۳ و پهنای فرکانسی ۲۰/۶۸ گیگاهرتز می‌شود. در حالت اول بازه طیفی آزاد از معادله ۲ برابر ۱۰۰ گیگاهرتز و برای حالت دوم برابر ۵۰ گیگاهرتز است. سیگنال درگاه حذف بازای شعاع ۴۵۰ میکرومتر دارای بازه طیفی آزاد ۳۰/۳ گیگاهرتز و ضریب شکل پاسخ ۰/۸۱۸ و پهنای فرکانسی ۱۲/۵۴ گیگاهرتز است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شعاع، بازه طیفی آزاد کاهش می‌یابد (آنچه با رابطه ۲ نیز قابل اثبات است). همچنین با افزایش شعاع تشدیدکننده‌های ریزحلقه، پهنای فرکانس، ضریب شکل پاسخ کاهش یافته و در سطح بالا مسطح کاهش می‌یابد.



شکل ۶. بررسی اثر شعاع‌های ۱۳۶، ۲۷۳ و ۴۵۰ میکرومتر بر سیگنال

درگاه حذف فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه

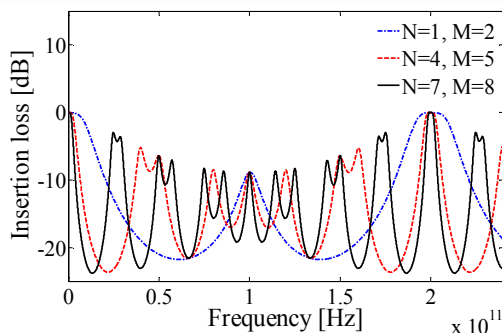
شکل ۷ سیگنال درگاه حذف و خروجی را برای تشدیدکننده‌های ریزحلقه با شعاع ۱۳۶ میکرومتر، ضرایب تزویج $k_1=k_6=0.7$ ، در این حالت سیگنال خروجی به دلیل عبور از یک مسیر مستقیم (گذر از ورودی به خروجی بدون طی هیچکدام از تشدیدکننده‌های ریزحلقه) و مسیرهایی که شامل اتصال سری یک تا پنج تشدیدکننده ریزحلقه می‌باشند دارای پنج قله تشدید در باند حذف است.



شکل ۷. سیگنال درگاه حذف و خروجی فیلتر اتصال سری پنج ریزحلقه

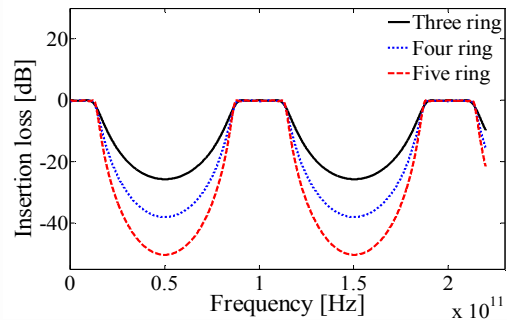
شکل ۸ مقایسه مابین سیگنال درگاه حذف فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه متقارن در حالتی که تلفات ۳ dB/cm

میکرومتر) و ۷:۸ (برابر با شعاع حلقه اول ۴۷۷/۵ میکرومتر و حلقه دوم ۵۴۵/۷ میکرومتر) شبیه‌سازی انجام شده است. طبق رابطه ۲ بازه طیفی آزاد برای حلقه‌های با شعاع‌های ۶۸، ۱۳۶، ۲۷۳، ۳۴۱، ۴۷۸ و ۵۴۶ میکرومتر به ترتیب ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۴۰، ۲۸/۵ و ۲۴/۹۸ گیگاهرتز است. در این حالت‌ها مقدار بازه طیفی آزاد ساختار ورنیر، کوچکترین مضرب مشترک بازه طیفی آزاد دو حلقه مذکور بوده و از معادله ۳ محاسبه می‌شود. همانطور که در این شکل نمایش داده شده است، برای حالت $N:M=1:2$ اگرچه تعداد قله‌های تشدید بینابینی کمتر است اما با توجه به نسبت‌های M و N برای حلقه‌های به کار رفته در این ساختار، حلقه‌های بکار گرفته شده ($R_1=68\mu m, R_2=136\mu m$) دارای شعاع کوچکی هستند، بنابراین تلفات تابشی ناشی از خمیدگی قابل توجه خواهد بود. اما هنگامی که $N:M=4:5$ باشد، شعاع حلقه اول افزایش یافته ($R_1=273\mu m$) و تلفات ناشی از خمیدگی کاهش خواهد یافت. در این حالت نرخ حذف تشدید بینابینی (نرخ روشن-خاموش) 5.2 dB و ضریب شکل پاسخ ۰/۴۲ است. با افزایش نسبت $N:M$ تعداد قله‌های تشدید بینابینی افزایش می‌یابد که می‌توان آن را در شبیه‌سازی نسبت ۷:۸ مشاهده نمود. پهنای باند عبور و پیک انتقال توسط بزرگترین حلقه تعیین می‌شوند و در نتیجه پاسخ فرکانسی در صورت کاهش پهنای باند عبور تیزتر می‌شود. اما از بحث فوق نتیجه می‌گیریم که حالت بهینه برای فیلتر اتصال دو تشدیدکننده اثر ورنیر، حالت $N:M=4:5$ است. نتایج بدست آمده در تطابق مناسبی با نتایج [۲] است.



شکل ۱۱. پاسخ فیلتر دو حلقه‌ای اثر ورنیر، ۷:۸ و ۱:۲، $N:M=4:5$

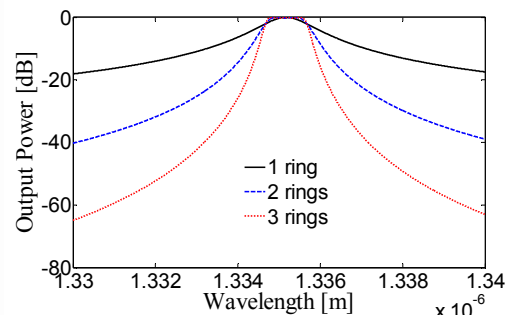
در ادامه به بررسی فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه اثر ورنیر پرداخته می‌شود. شکل ۱۲ فیلتر اتصال سری پنج حلقه‌ای با شعاع‌های $R_1=R_2=R_3=273\mu m$ و $R_4=R_5=341\mu m$ را نشان می‌دهد. در این حالت با استناد به نتیجه‌ای که از شکل ۱۱ گرفتیم، مانند قبل $N=M=0=4$ و $P=Q=5$ در نظر گرفته می‌شود. برای داشتن بیشینه تختی قله تشدید، ضریب شکل پاسخ بزرگتر و نرخ حذف تشدیدهای بینابینی مناسب، ضرایب تزویج بیرونی $k_1=k_6=0.55$ ، ضرایب داخلی $k_2=k_5=0.077$



شکل ۹. سیگنال درگاه حذف برای فیلترهای اتصال سری سه، چهار و پنج تشدیدکننده ریزحلقه متقارن

جهت مقایسه نتایج حاصل از روش SFG با دیگر روش‌های معمول همچون FDTD و CMT، نمودار تغییرات طیف توان درگاه حذف فیلترهایی بر اساس ساختارهای ۱، ۲ و ۳ حلقه‌ای در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. با توجه به مطابقت این شکل و نتایج بدست آمده در [۱۵]، توانایی روش SFG در شبیه‌سازی فیلترهای نوری مبتنی بر استفاده از انواع ساختارهای ریزحلقه نمایان می‌شود.

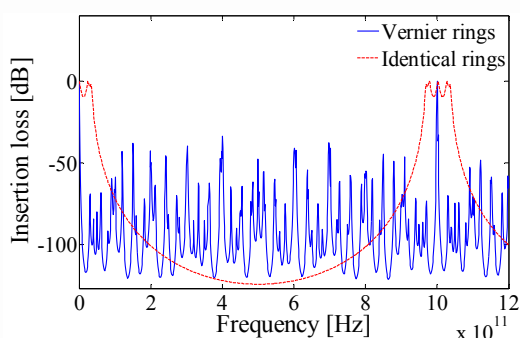
جهت افزایش بازه طیفی آزاد توسط ریز حلقه‌های مشابه طبق رابطه ۲ باید شعاع ریز حلقه کاهش یابد. به عنوان مثال برای تولید بازه طیفی آزاد ۱۰۰۰ گیگاهرتز باید شعاع ریز حلقه‌ها برابر با ۱۳/۶ میکرومتر باشد. استفاده از چنین شعاعی به دلیل افزایش تلفات ناشی از خمیدگی عملاً غیر قابل استفاده خواهد شد. برای رفع این مشکل می‌توان از فیلترهای بر مبنای ساختار ورنیر استفاده کرد که در ادامه روند طراحی چنین فیلتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا جهت بررسی صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی در ساختار ورنیر با مقالات منتشر شده قبلی [۲] از یک ساختار دو حلقه‌ای استفاده می‌کنیم. در این فیلتر ضرایب تزویج $k_1=k_3=0.5$ و $k_2=0.13$ هستند.



شکل ۱۰. طیف توان درگاه حذف فیلتر ۲، ۱ و ۳ حلقه‌ای

شکل ۱۱ مقایسه‌ای میان دامنه تشدید برای نسبت $N:M=(1:2, 4:5, 7:8)$ را نشان می‌دهد. برای نسبت اعداد ۱:۲ (برابر با شعاع حلقه اول ۶۸ میکرومتر و حلقه دوم ۱۳۶ میکرومتر)، نسبت ۴:۵ (برابر با شعاع حلقه اول ۲۷۳ میکرومتر و حلقه دوم ۳۴۱

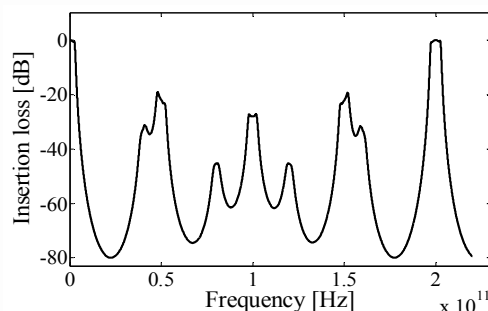
دستیابی به مشخصه‌های مطلوب همچون نرخ حذف تشدیدهای بینابینی مناسب، ضریب شکل پاسخ در حدود ۰/۸، تلفات قله‌های تشدید مناسب و هم‌نشویی در باند حذف و هم‌نشویی کانال همسایه واضح و مناسب ضرایب توزیع بیرونی $k_6=0.079$ $k_1=0.07$ و ضرایب داخلی $k_2=0.02$ $k_3=k_4=0.01$ و $k_5=0.03$ انتخاب شده است. بنابه رابطه ۲ بازه طیفی آزاد برای حلقه‌های به کار رفته در ساختار بترتیب ۳/۳۰ گیگاهرتز، ۱۰۰ گیگاهرتز، ۵۰ گیگاهرتز و ۴۰ گیگاهرتز است. ضرایب $N=M=34$ ، $O=10$ ، $P=20$ و $Q=25$ است. نرخ حذف تشدید بینابینی 24.5 dB است. همچنین ضریب شکل پاسخ ۰/۸ است. استفاده از این ساختار موجب افزایش شکل جعبه‌ای مانند پاسخ فرکانسی و نرخ حذف تشدیدهای بینابینی شده و در نتیجه سبب بهبود هم‌نشویی می‌شود. با توجه به شعاع‌های به کار گرفته شده، بازه طیفی آزاد ۱۰۰۰ گیگاهرتز که ۲/۵ برابر ۴۰۰ گیگاهرتز (آنچه با اتصال سری سه تشدیدکننده ریزحلقه با شعاع‌های ۲۷۳، ۳۴۱ و ۵۱۱ میکرومتر در [۲] بدست آمده است) حاصل می‌شود. ساختار فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه معرفی شده برای استفاده در شبکه‌های مالتی‌پلکس تخصیص طول موج متراکم مناسب است. همچنین در این شکل جهت مقایسه فیلتری با ضرایب توزیع مشابه توسط ۵ ریزحلقه‌های مشابه نمایش داده شده است. جهت تولید بازه طیفی آزاد ۱۰۰۰ گیگاهرتز توسط ریز حلقه‌های مشابه باید شعاع هر پنج ریز حلقه ۱۳/۶ میکرومتر باشد. بدلیل کوچک بودن ریز حلقه‌های مشابه تلفات خروج از حلقه به شدت افزایش یافته و در نتیجه استفاده از این نوع فیلتر غیرعملی خواهد بود. بعلاوه توسط ریز حلقه‌های ورنیر فیلتر طراحی شده پاسخ فرکانسی بسیار باریکتری به نسبت ساختار ریزحلقه‌های مشابه است.



شکل ۱۴. سیگنال درگاه حذف فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه دارای بازه طیفی آزاد ۱۰۰۰ گیگاهرتز

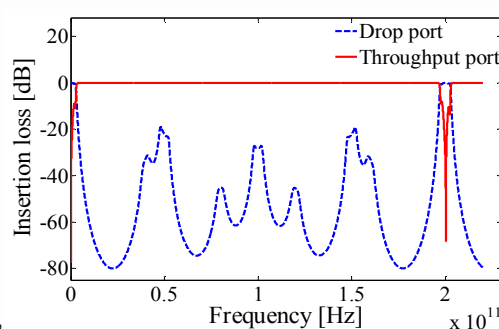
تاثیر تلفات موجبر بر ساختار پیشنهادی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. این تلفات به نحوه ساخت دیواره‌های موجبر و نوع مواد بکار رفته در ساختار موجبر دارد. هرچه شعاع تشدیدکننده بیشتر باشد این نوع از تلفات افزایش می‌یابد. علت استفاده نکردن از تعداد حلقه‌های بیشتر در ساختار فیلترها به همین امر بر می‌گردد.

و $k_3=k_4=0.046$ انتخاب شده است. انتخاب ضرایب فوق با توجه به این نکته است که برای فیلتر اتصال سری دو تشدیدکننده ریزحلقه، بهترین پاسخ از ضرایب اتصال بیرونی ۰/۵ ناشی می‌شود [۲]. مقادیر ضرایب اتصال فوق همانند [۱۴] انتخاب شده‌اند. در این حالت خروجی شبیه شکل ۱۱ است با این تفاوت که نرخ حذف تشدید بینابینی از 5 dB به 20 dB افزایش یافته است. این ساختار با به کار بردن زوج $R_1-R_1-R_1$ و R_2-R_2 بجای R_1 و R_2 باعث ایجاد گذر سریعتر از باند عبور به باند توقف و پاسخ فرکانسی جعبه‌ای مانند بیشتری نسبت به حالت دو حلقه‌ای شده است. همچنین ضریب شکل پاسخ از ۰/۴۲ به ۰/۷۸۲ افزایش یافته است.



شکل ۱۲. پاسخ فرکانسی فیلتر اتصال سری اثر ورنیر با $N=M=O=4$ و $P=Q=5$

شکل ۱۳ سیگنال درگاه حذف و خروجی را برای فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه اثر ورنیر را نشان می‌دهد. در این حالت سیگنال درگاه خروجی در باند حذف دارای دو قله تشدید است که به دلیل مسیر عبور نور از میان پنج تشدیدکننده ریزحلقه سری شده با دو شعاع متفاوت است. درگاه حذف 60 dB از سیگنال خروجی در باند حذف را برمی‌دارد.



شکل ۱۳. سیگنال درگاه حذف و خروجی فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه با شعاع‌ها $R_4=R_5=341\mu\text{m}$ و $R_1=R_2=R_3=273\mu\text{m}$

در ادامه شبیه‌سازی برای فیلتر ورنیر براساس اتصال سری پنج تشدیدکننده با شعاع‌های متفاوت برای دستیابی به بازه طیفی آزاد بزرگتر می‌پردازیم. شکل ۱۴ ساختار اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه با شعاع‌های $R_1=R_2=450\mu\text{m}$ ، $R_3=136\mu\text{m}$ ، $R_4=273\mu\text{m}$ و $R_5=341\mu\text{m}$ را نشان می‌دهد. در این حالت برای

نتیجه گیری

شبیه‌سازی فیلترهای تمام نوری مبتنی بر اتصال سری تشدیدکننده‌های ریزحلقه با استفاده از روش تحلیلی سریع SFG مبتنی بر قاعده میسون برای شعاع‌های متقارن و اثر ورنیر انجام شد. با استفاده از ساختار فیلتر مبتنی بر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه مشابه، می‌توان ضریب شکل پاسخ را به 0.84 و بازه طیفی آزاد 100 گیگاهرتز رساند. نشان داده شد با افزایش شعاع حلقه‌ها، بازه طیفی آزاد فیلتر کاهش می‌یابد. از سوی دیگر شکل جعبه‌ای پاسخ فرکانسی با کاهش ضریب تزویج داخلی و شعاع حلقه‌ها بهبود می‌یابد. با استفاده از شعاع‌های پیشنهاد شده برای فیلتر نوری ورنیر مبتنی بر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه در این مقاله بازه طیفی آزاد نسبت به حالت سه حلقه‌ای ورنیر، $2/5$ برابر شده و ضریب شکل پاسخ 0.2 افزایش یافته است. فیلتر معرفی شده دارای ضریب شکل پاسخ 0.8 ، بازه طیفی 1000 گیگاهرتز و پاسخ فرکانسی بسیار باریک است. این فیلتر دارای سطح بالایی مسطح و شیب گذر از باند عبور به باند توقف تیزی است، که این ویژگی‌ها متناسب با خصوصیات فیلترهای مورد نیاز شبکه‌های مالتی‌پلکس تخصیص طول موج متراکم است.

ضمیمه ۱: محاسبه توابع عبوری در حلقه‌ها و بهره مسیر عبور از درگاه ورودی به درگاه حذف

در معادلات ذیل $X_{a,b,c,d,e}$ به ترتیب ضرایب عبور نور در میان حلقه‌های ۱ تا ۵ هستند.

$$X_a = \exp(-\alpha_a \frac{L_a}{2} - j \beta_a L_a) \quad (a)$$

$$X_b = \exp(-\alpha_b \frac{L_b}{2} - j \beta_b L_b) \quad (b)$$

$$X_c = \exp(-\alpha_c \frac{L_c}{2} - j \beta_c L_c) \quad (c)$$

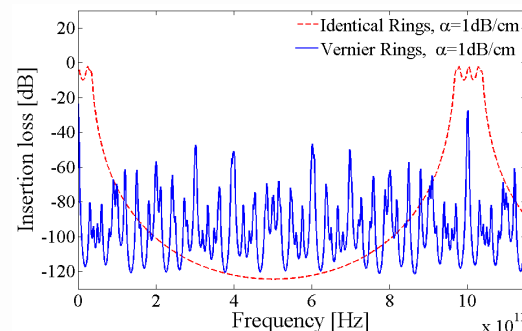
$$X_d = \exp(-\alpha_d \frac{L_d}{2} - j \beta_d L_d) \quad (d)$$

$$X_e = \exp(-\alpha_e \frac{L_e}{2} - j \beta_e L_e) \quad (e)$$

تنها یک مسیر از درگاه ورودی $X(z)$ به درگاه حذف $Y(z)$ وجود دارد که بهره آن بصورت معادله ۸ است.

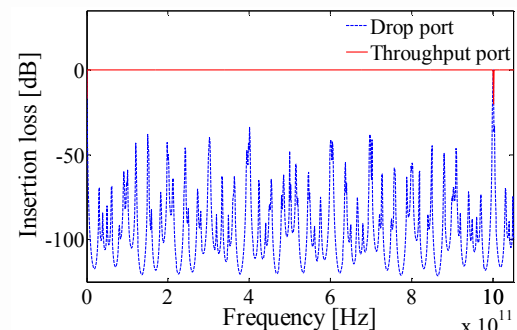
$$\begin{aligned} T_1 &= (-jS_1\sqrt{X_a})(-jS_2\sqrt{X_b})(-jS_3\sqrt{X_c}) \\ &(-jS_4\sqrt{X_d})(-jS_5\sqrt{X_e})(-jS_6) \\ &= -S_1S_2S_3S_4S_5S_6\sqrt{X_aX_bX_cX_dX_e} \end{aligned} \quad (f)$$

این نوع از تلفات را به دو نوع می‌توان از بین برد. اول کوچک کردن شعاع حلقه‌ها تا حدی که تلفات حین گردش به دور حلقه افزایش نیابد. البته لازم به ذکر است با کاهش بیش از حد شعاع حلقه‌ها تلفات تابشی افزایش می‌یابد. تلفات تابشی ناشی از تلفات مدهای تابشی یا نشتی در قسمت انحنا تشدیدکننده است [۱]. بنابراین استفاده از شعاع‌های بسیار کم نیز توصیه نمی‌شود. دوم قرار دادن ساختاری همچون تقویت‌کننده‌های نوری نیمه‌هادی در حلقه تشدید که ممکن است بتواند این تلفات را جبران کند [۱۶]. بنابراین با توجه به مسافت طی شده توسط سیگنال نوری می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر تلفات موجبر بر ۵ ریزحلقه مشابه $13/6$ میکرومتری کمتر از ۵ حلقه ورنیر طراحی شده است. این نقیصه همانطور که شرح داده شد با استفاده از تقویت‌کننده نوری قابل رفع است.



شکل ۱۵. سیگنال درگاه حذف فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه دارای بازه طیفی آزاد 1000 گیگاهرتز با تلفات 1dB/cm

شکل ۱۶ سیگنال درگاه حذف و خروجی برای فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه اثر ورنیر معرفی شده در شکل ۱۳ را نشان می‌دهد. در این حالت درگاه حذف 20 dB از سیگنال خروجی در باند حذف را بر می‌دارد. این شکل تایید کننده بازه طیفی آزاد 1000 گیگاهرتز توسط ساختار پیشنهاد شده است.



شکل ۱۶. سیگنال درگاه حذف و خروجی برای فیلتر اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه ورنیر

ضمیمه ۲ : محاسبه بهره حلقه‌های موجود در سیستم، دلتای معین، توابع انتقال از ورودی به درگاه خروجی و از ورودی به درگاه حذف

در سیستم شکل (۲) تعداد ۱۵ حلقه وجود دارد که بهره آنها به صورت :

$$L_1 = C_1 C_2 Z^{-N} \quad (۱)$$

$$L_2 = C_2 C_3 Z^{-M} \quad (۲)$$

$$L_3 = C_3 C_4 Z^{-O} \quad (۳)$$

$$L_4 = C_4 C_5 Z^{-P} \quad (۴)$$

$$L_5 = C_5 C_6 Z^{-Q} \quad (۵)$$

$$L_{1,2} = -C_1 C_3 S_2^2 Z^{-(N+M)} \quad (۶)$$

$$L_{2,3} = -C_2 C_4 S_3^2 Z^{-(M+O)} \quad (۷)$$

$$L_{3,4} = -C_3 C_5 S_4^2 Z^{-(O+P)} \quad (۸)$$

$$L_{4,5} = -C_4 C_6 S_5^2 Z^{-(P+Q)} \quad (۹)$$

$$L_{1,2,3} = C_1 C_4 S_2^2 S_3^2 Z^{-(N+M+O)} \quad (۱۰)$$

$$L_{2,3,4} = C_2 C_5 S_3^2 S_4^2 Z^{-(M+O+P)} \quad (۱۱)$$

$$L_{3,4,5} = C_3 C_6 S_4^2 S_5^2 Z^{-(O+P+Q)} \quad (۱۲)$$

$$L_{1,2,3,4} = -C_1 C_5 S_2^2 S_3^2 S_4^2 Z^{-(N+M+O+P)} \quad (۱۳)$$

$$L_{2,3,4,5} = -C_2 C_6 S_3^2 S_4^2 S_5^2 Z^{-(M+O+P+Q)} \quad (۱۴)$$

$$L_{1,2,3,4,5} = C_1 C_6 S_2^2 S_3^2 S_4^2 S_5^2 Z^{-(N+M+O+P+Q)} \quad (۱۵)$$

مقدار دلتای معین از رابطه ۱۶ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta = 1 - \sum_i T_i + \sum_{i,j} T_i T_j - \sum_{i,j,k} T_i T_j T_k + \sum_{i,j,k,l} T_i T_j T_k T_l - \sum_{i,j,k,l,u} T_i T_j T_k T_l T_u \quad (۱۶)$$

$$\begin{aligned} \Delta = & 1 - C_1 C_2 Z^{-N} - C_2 C_3 Z^{-M} - C_3 C_4 Z^{-O} - C_4 C_5 Z^{-P} - C_5 C_6 Z^{-Q} \\ & + C_1 C_3 Z^{-(N+M)} + C_2 C_4 Z^{-(M+O)} + C_3 C_5 Z^{-(O+P)} + C_4 C_6 Z^{-(P+Q)} \\ & + C_1 C_2 C_3 C_4 Z^{-(N+O)} + C_1 C_2 C_4 C_5 Z^{-(N+P)} + C_1 C_2 C_5 C_6 Z^{-(N+Q)} + C_2 C_3 C_4 C_5 Z^{-(M+P)} + \\ & C_2 C_3 C_5 C_6 Z^{-(M+Q)} + C_3 C_4 C_5 C_6 Z^{-(O+Q)} - C_1 C_2 C_3 C_5 Z^{-(N+O+P)} - C_1 C_2 C_4 C_6 Z^{-(N+P+Q)} \\ & - C_2 C_3 C_4 C_6 Z^{-(M+P+Q)} - C_1 C_3 C_4 C_5 Z^{-(N+M+P)} \quad (۱۶) \\ & - C_1 C_3 C_5 C_6 Z^{-(N+M+Q)} - C_2 C_4 C_5 C_6 Z^{-(M+O+Q)} \\ & - C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 Z^{-(N+O+Q)} - C_1 C_4 Z^{-(N+M+O)} \\ & - C_2 C_5 Z^{-(M+O+P)} - C_3 C_6 Z^{-(O+P+Q)} + C_1 C_5 Z^{-(N+M+O+P)} + C_2 C_6 Z^{-(M+O+P+Q)} + \\ & C_1 C_2 C_3 C_6 Z^{-(N+O+P+Q)} + C_1 C_4 C_5 C_6 Z^{-(N+M+O+Q)} \\ & + C_1 C_3 C_4 C_6 Z^{-(N+M+P+Q)} - C_1 C_6 Z^{-(N+M+O+P+Q)} \end{aligned}$$

تنها یک مسیر از درگاه ورودی به حذف وجود دارد که برای آن بهره مسیر پیشرو برابر:

$$\begin{aligned} T_1 = & (-jS_1 \sqrt{X_a})(-jS_2 \sqrt{X_b})(-jS_3 \sqrt{X_c}) \\ & (-jS_4 \sqrt{X_d})(-jS_5 \sqrt{X_e})(-jS_6) = \quad (۱۷) \\ & -S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6 \sqrt{X_a X_b X_c X_d X_e} \end{aligned}$$

تابع انتقال برای درگاه حذف از رابطه ۱۸ بدست می‌آید.

$$H_{drop} = \frac{T_1 \Delta_1}{\Delta} \quad (۱۸)$$

در رابطه فوق Δ_1 دلتای معین با حذف تمام حلقه‌هایی است که با مسیر ۱ تماس دارند. به دلیل عبور نور از میان تمام حلقه‌ها برای T_1 مقدار این دلتا مساوی واحد است. عبور نور از درگاه ورودی به عملیاتی (خروجی) از ۶ مسیر مختلف صورت می‌گیرد. بنابراین تابع انتقال از ورودی به خروجی از رابطه ۱۹ تعیین می‌شود.

$$H_{th} = \frac{T_1 \Delta_1 + T_2 \Delta_2 + T_3 \Delta_3 + T_4 \Delta_4 + T_5 \Delta_5 + T_6 \Delta_6}{\Delta} \quad (۱۹)$$

پس از اعمال شرایط ساده‌سازی $S_i^2 + C_i^2 = 1$ بصورت معادله ۲۰ است.

[6] S. Dey, and S. Mandal, "Modeling and analysis of quadruple optical ring resonator performance as optical filter using Vernier principle," *Optics Communications*, Vol. 285, pp. 439-446, 2012.

[7] C. Wächter, "Ring Resonators: Materials, Technologies, Limits," *Microresonators as Building Blocks for VLSI Photonics: International School of Quantum Electronics*, 39th Course. Vol. 709. No. 1. AIP Publishing, 2004.

[8] Y. Tanushi, M. Wake, and S. Yokoyama. "Race-Track Optical Ring Resonators with Groove Coupling." *Solid State Devices and Materials Conf.*, pp. 940-941, 2004.

[9] C. J. Kaalund, and G. D. Peng. "Pole-zero diagram approach to the design of ring resonator-based filters for photonic applications." *J. of Lightwave Technol.* Vol. 22, pp. 1548-1559, 2004.

[10] Y. Liu, C. Tiejun, and A. E. Craig. "Coupled mode theory for modeling microring resonators." *Optical Engineering*, Vol. 44, pp. 084601-084601, 2005.

[11] S. C. Hagness, et al. "FDTD microcavity simulations: design and experimental realization of waveguide-coupled single-mode ring and whispering-gallery-mode disk resonators." *J. Lightwave Technol.*, Vol. 5, pp. 2154-2165, 1997.

[12] A. Yariv, "Critical coupling and its control in optical waveguide-ring resonator systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 14, pp. 483-485 2002.

[13] T. Kato, Y. Kokubun, "Optimum coupling coefficients in second-order series-coupled ring resonator for non-blocking wavelength channel switch," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 24, pp. 991-999, 2006.

[14] R. Boech, J. Flueckiger, L. Chrostowski and N. A.F. Jaeger, "Experimental performance of DWDM quadruple Vernier racetrack resonators." *Optics express*, Vol. 21, pp. 9103-9112, 2013.

[15] Little, Brent E., et al. "Microring resonator channel dropping filters." *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, pp. 998-1005, 1997.

[16] D. G. Rabus, et al. "Optical filters based on ring resonators with integrated semiconductor optical amplifiers in GaInAsP-InP." *IEEE J. Select. Topic. Quantum Electron.*, Vol. 8, pp. 1405-1411, 2002.

$$\begin{aligned}
 NUM_{th} = & C_1 - C_2 Z^{-N} - C_1 C_2 C_3 Z^{-M} - \\
 & C_1 C_3 C_4 Z^{-O} - C_1 C_4 C_5 Z^{-P} - C_1 C_5 C_6 Z^{-Q} \\
 & - C_3 Z^{-(N+M)} + C_1 C_2 C_4 Z^{-(M+O)} + \\
 & C_1 C_3 C_5 Z^{-(O+P)} + C_1 C_4 C_6 Z^{-(P+Q)} + \\
 & C_2 C_3 C_4 Z^{-(N+O)} + C_2 C_4 C_5 Z^{-(N+P)} + \\
 & C_2 C_5 C_6 Z^{-(N+Q)} + C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 Z^{-(M+P)} \\
 & + C_1 C_2 C_3 C_5 C_6 Z^{-(M+Q)} + C_1 C_3 C_4 C_5 C_6 Z^{-(O+Q)} \\
 & - C_2 C_3 C_5 Z^{-(N+O+P)} - C_2 C_4 C_6 Z^{-(N+P+Q)} \\
 & - C_1 C_2 C_3 C_4 C_6 Z^{-(M+P+Q)} - C_3 C_4 C_5 Z^{-(N+M+P)} \\
 & - C_3 C_5 C_6 Z^{-(N+M+Q)} - C_1 C_2 C_4 C_5 C_6 Z^{-(M+O+Q)} \\
 & - C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 Z^{-(N+O+Q)} - C_4 Z^{-(N+M+O)} \\
 & - C_1 C_2 C_5 Z^{-(M+O+P)} - C_1 C_3 C_6 Z^{-(O+P+Q)} \\
 & + C_5 Z^{-(N+M+O+P)} + C_1 C_2 C_6 Z^{-(M+O+P+Q)} + \\
 & C_2 C_3 C_6 Z^{-(N+O+P+Q)} + C_4 C_5 C_6 Z^{-(N+M+O+Q)} \\
 & + C_3 C_4 C_6 Z^{-(N+M+P+Q)} - C_6 Z^{-(N+M+O+P+Q)}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

مرجع ها

[1] Chremmos, Ioannis, Nikolaos K. Uzunoglu, and Otto Schwelb. *Photonic microresonator research and applications*. Vol. 156. Springer, 2010.

[2] C. Chaichuay, P. P. Yupapin and P. Saeung, "The serially coupled multiple ring resonator filters and Vernier effect," *Optica Applicata*, Vol. 39, pp. 175-194, 2009.

[3] G. Ren, T. Cao, and S. Chen, "Design and analysis of a cascaded microring resonator-based thermo-optical tunable filter with ultralarg free spectrum range and low power consumption," *Optics Engineering*, Vol. 50, pp. 074601-0746016, 2011.

[4] D. Zhang, Y. Huang, X. Ren, X. Duan, B. Shen, Q. Wang, X. Zhang and S. Cai, "Add-drop filters based on asymmetric high order microring resonator," *Proc. Of SPIE*, Vol. 8555, pp. 85550U1-85550U7, 2012.

[5] S. Dey, S. Mandal, N.N. Jana, "Enhancement of free spectral range using pentuple microresonator," *Applied Optics*, Vol. 51, pp. 6901-6912, 2012.

