



ساختار تاخیری پاشنده با استفاده از فرامواد به منظور افزایش تفکیک پذیری در پردازش سیگنال های آنالوگ

احمد اکبر*، مسعود موحدی، تکتیم کیهان پور، علی غفورزاده

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*رایانامه نویسنده مسئول: Ahmadakbar67@gmail.com

۱- مقدمه

برای کاربردهای میکروویوی با استفاده از فن آوری های گوناگونی می توان به پاشندگی^۱ در خط تاخیری رسید. این خطوط با توجه به اینکه تاخیر در جهت انتشار یا بازتاب امواج حاصل می شود به دو دسته انتقالی و بازتابی تقسیم می شوند. بعضی از این روش ها هنوز در مرحله تحقیقاتی هستند [۱]. اگرچه خطوط تاخیری پاشنده^۲ (DDLهای) امواج مغناطیس ساکن (MSWs^۳) و کابل کوکسیال موجی شکل^۴ در آزمایشگاه محقق شده اند؛ با فن آوری حاضر طراحی این دو خط تاخیری با پهنای باند فرکانسی، میزان تاخیر گروه و شیب منحنی تاخیر گروه-فرکانس مناسب، آسان نیست [۲]. DDLهای ساخته شده به روش SAW^۵، بخاطر سرعت پایین امواج صوتی تاخیر زمانی زیادی ($\sim 1 \mu s$) را فراهم می کنند؛ بنابراین، اندازه کوچک و پهنای باند زمانی زیادی دارند. این دستگاهها به دلیل

چکیده: در این مقاله یک ساختار تاخیری پاشنده کوچک سازی شده با استفاده از خط انتقال راست گرد- چپ گرد ترکیبی ارائه شده است. با توجه به امکان مهندسی تاخیر گروه در ساختارهای C شکل، ساختار پیشنهادی با استفاده از بخش های C شکل تشکیل شده از خط تزویجی میان انگشتی نامتقارن، برای افزایش ضریب تزویج با در نظر گرفتن قابلیت ساخت، طراحی شده است. این نوع طراحی، پهنای باند فرکانسی ساختار را تا ۴۰٪ و پهنای باند زمانی آن را تا ۱۰٪ نسبت به ساختارهای پیشین افزایش داده است. ساختار پیشنهادی در فرکانس ۴ GHz تا ۵ GHz طراحی شده است. همچنین داشتن ساختار صفحه ای ساده، کوچک، مسطح و تک لایه بدون پین های اتصال کوتاه به صفحه زمین از مزایای دیگر این ساختار است.

کلیدواژه: ساختار تاخیری پاشنده (DDS)، خطوط انتقال راست گرد-چپ گرد ترکیبی (CRLH)، تفکیک پذیری فرکانسی.

1 - Dispersion
2 - Dispersive Delay Lines
3 - Magnetostatic waves
4 - crimped
5 - surface acoustic wave

هستند و نیاز به تقویت کننده دارند. خطوط انتقال chirp و ساختارهای موجبر تمام گذر بازتابی نیاز به یک چرخش دهنده^{۱۰} پهن باند با بایاس مغناطیسی دارند [۶].

خط انتقال راست-گرد-چپ-گرد ترکیبی^{۱۱} (CRLH-TL) ساختاری کم تلفات، فشرده و مسطح با تکنیک‌های ساخت و پیاده‌سازی ساده است که نیاز به تقویت کننده و چرخش دهنده ندارد. از طرف دیگر فرکانس کار و پهنای باند خطوط انتقال CRLH تنها به مقادیر خازن و سلف یک سلول واحد بستگی دارد [۷]. بنابراین یک خط انتقال CRLH کوچک و فشرده برای کار کردن در فرکانس بالا و پهنای باند زیاد به راحتی می‌تواند طراحی شود [۸]. از معایب این خطوط می‌توان به تاخیر گروه محدود آنها اشاره کرد.

یک ساختار تاخیری پاشنده^{۱۲} (DDS) با بخش‌های C شکل^{۱۳} بر اساس خط انتقال تزویج شده برای کاربردهای آنالوگ به دلیل سادگی ساخت، قابلیت مهندسی تاخیر گروه و ساختار مسطح می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد. همچنین با پشت سرهم قرار گرفتن ساختارهای C شکل می‌توان به مشخصات تاخیر گروه مطلوب رسید. میزان تاخیر گروه این ساختارها کم و وابسته به ابعاد ساختار و ضریب تزویج می‌باشد که اندازه ساختار را بزرگ می‌کند [۹]. با توجه به ماهیت الکترومغناطیسی فرامواد می‌توان این ساختار را با استفاده از C-Section CRLH بهینه کرد و معایب مطرح شده را برطرف کرد اگرچه روند طراحی پیچیده‌تر می‌شود.

در این مقاله به منظور افزایش ضریب تزویج، کاهش ابعاد ساختار و سادگی فرایند ساخت از خط تزویجی میان انگشتی نامتقارن استفاده شده است. در صورتیکه طول بخش‌های C شکل کمتر از $\lambda_g/4$ باشد این ساختار به صورت CRLH-TL عمل کرده و ضریب تزویج افزایش می‌یابد. در ساختار پیشنهادی مقاله برای داشتن حداکثر ضریب تزویج طول

محدودیت در فرایند چاپ مدار روی زیرلایه^۶ به پهنای باند فرکانسی باریکی در کاربردهای فرکانس پایین (< 2 GHz) محدود شده‌اند [۳].

ساختارهای الکترومغناطیسی (EM^۷) در مقایسه با SAW DDL در فرکانس‌های بالاتری کار می‌کنند اما پیچیدگی ساخت و ابعاد بزرگتری دارند. این ساختارها تاخیر گروه نسبتاً زیادی ایجاد می‌کنند اما پهنای باند فرکانسی آنها کم است [۲]. ساختار MSW جزء ساختارهای مد انتقالی است که می‌تواند برای کاربردهای فرکانس بالا با پهنای باند و تاخیر گروه زیاد به کار گرفته شود. از معایب آنها می‌توان به تلفات بالا و نیاز به یک مغناطیس دائمی اشاره کرد که پیاده‌سازی به صورت ساختار مسطح را دشوار می‌کند [۴].

در مقابل ساختارهای SAW، EM و MSW که در مد انتقالی قرار دارند، ساختارهای مد بازتابی، از جمله ساختارهای تزویج شده چند قسمتی^۸ و خطوط ریزنواری chirp وجود دارند. ساختارهای تزویج شده چند قسمتی از اتصال چند خط تزویج شده به صورت سری، که در فرکانس‌های مجاور و نزدیک به هم کار می‌کنند تشکیل شده‌اند. بنابراین در این ساختارها فرکانس‌های بالا (~ 10 GHz) و پهنای باند زیاد (~ 3 GHz) قابل دسترسی است، اگرچه پهنای باند به ابعاد ساختار وابسته است. به طور مثال، با افزایش تعداد تزویج کننده‌ها، پهنای باند بیشتر می‌شود اما موجب زیاد شدن طول ساختار و افزایش تلفات می‌شود. برای کاهش تلفات باید از خنک کننده و ابررساناهای دمای بالا (HTSs^۹) استفاده کرد که فرایند ساخت را پیچیده می‌کند [۵].

از طرف دیگر، خطوط ریز نواری chirp ساختاری ساده و مسطح دارند. این خطوط به دلیل عدم تطبیق امپدانس سبب بازتابهای Bragg می‌شوند. در اینجا نیز پهنای باند به ابعاد ساختار وابسته است و همچنین به دلیل کار در باند توقف بسیار پر تلف

10 - Circulator

11 - Composite Right/Left-Handed Transmission Line

12 - dispersive delay structure

13 - C-Section

6 - photolithographic

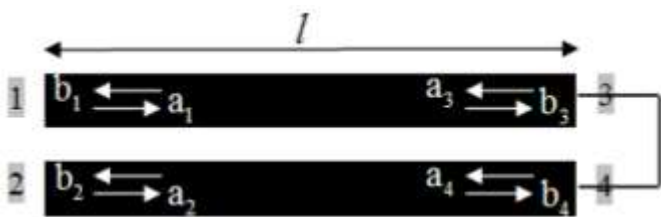
7 - Electromagnetic

8 - multisection coupler based

9 - high-temperature superconductors

ب- ساختار C شکل^{۱۴}

یکی از روش های تحقیق خطوط DDL استفاده از ساختارهای C شکل است. برای بررسی این ساختارها نیاز به بررسی تئوری خطوط انتقال تزویج شده داریم که در ادامه به آن می پردازیم. شکل (۲) یک خط انتقال تزویج شده ایده آل بدون تلفات، با تطبیق و ایزولاسیون کامل را نشان می دهد. فرض می شود $b_4=a_3$ و $b_3=a_4$ ، که معادل با خم کردن یک خط ریزنوازی مستقیم است. این نوع از خطوط تزویج شده موازی را بخش های C شکل می نامیم.



شکل ۲: خط تزویج شده ایده آل

با استفاده از روش تحلیل مدهای زوج و فرد، معادله پراکندگی خط تزویج شده موازی را توسط رابطه (۱) بیان می شود.

$$S_{21}(\theta) = \frac{\sqrt{1+k} \cos \theta - j\sqrt{1-k} \sin \theta}{\sqrt{1+k} \cos \theta + j\sqrt{1-k} \sin \theta} \quad (1)$$

در این رابطه $\theta = \beta l$ ، $\ell = \lambda_g / 4$ ، k ضریب تزویج، β ثابت انتشار خط انتقال و ℓ طول خط تزویج شده است. برای رسیدن به پاسخ تمام گذر باید شرط $|S_{21}(\theta)| = 1$ برقرار باشد. بنابراین، با توجه به معادله پراکندگی خط تزویج شده شکل (۲)، تاخیر گروه آن به صورت رابطه (۲) بیان می شود.

$$\tau(\theta) = -\frac{d\phi_{S_{21}}}{d\omega} = \frac{2\sqrt{(1-k)(1+k)}}{(1-k)(1-k+2k \cos^2 \theta)} \frac{d\theta}{d\omega} \quad (2)$$

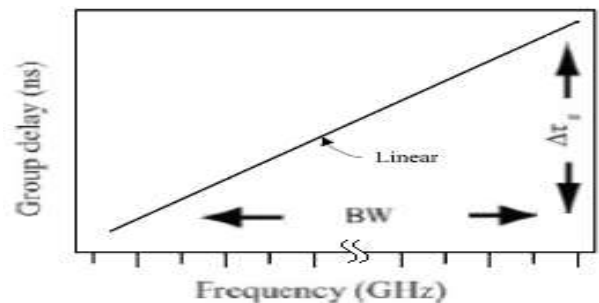
با بهینه سازی طول بخش های C شکل پشت سر هم می توان به مشخصات فاز دلخواه و نمودار تاخیر گروه مطلوب رسید [۹]. با توجه به معادله (۲) مشاهده می شود که تاخیر گروه ساختارهای C شکل متناوب است.

بخشهای C شکل برابر $\lambda_g / 4$ در نظر گرفته شده است. با توجه به ساختار خطوط میان انگشتی این ساختارها به پین های اتصال کوتاه نیاز نداشته بنابراین فرایند ساخت ساده و ابعاد کوچک شده است.

۲- مبانی تئوری

۱- خط تاخیری پاشنده (DDL)

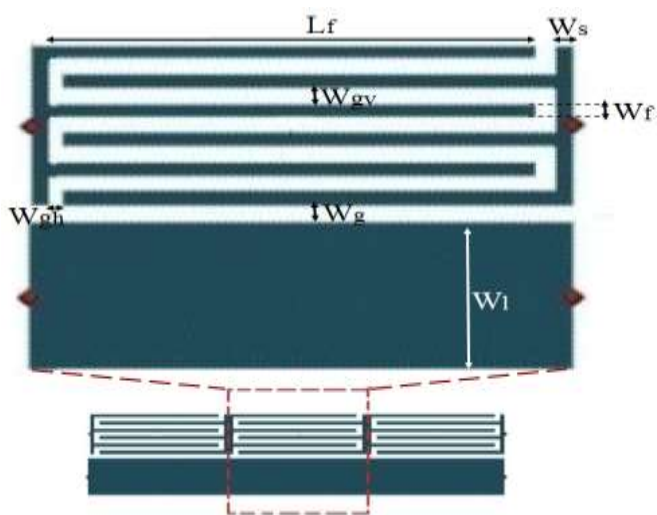
اصطلاح DDL برای هر ساختاری که تاخیر گروه در آن با فرکانس تغییر می کند به کار می رود، به این معنا که تاخیر گروه آن تابعی از فرکانس است. در شکل (۱) منحنی تاخیر گروه بر حسب فرکانس یک DDL ایده آل نمایش داده شده است.



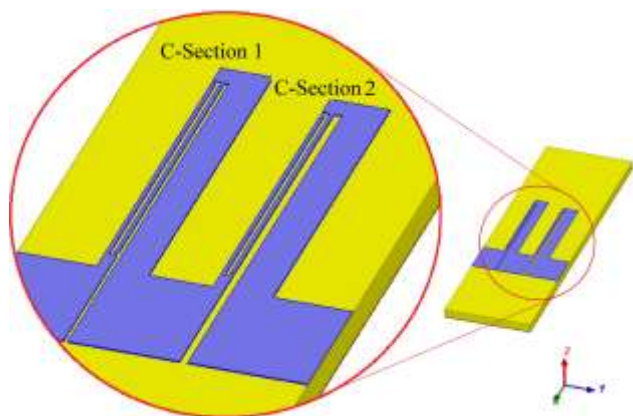
شکل ۱: منحنی تاخیر گروه بر حسب فرکانس یک DDL ایده آل.

با توجه به شکل، پارامترهایی که در طراحی یک DDL باید در نظر گرفته شوند پهنای باند فرکانسی، دامنه تغییرات تاخیر گروه و خطی بودن شیب منحنی تاخیر گروه-فرکانس است. در پهنای باند فرکانسی، تاخیر گروه به صورت خطی تغییر می کند و پارامترهای پراکندگی ساختار مطلوب است. دامنه تغییرات تاخیر گروه میزان تفکیک پذیری فرکانس را مشخص می کند. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود، مقدار تاخیر گروه وابسته به فرکانس می باشد بنابراین در یک DDL شکل موج سیگنال خروجی، به دلیل مقدار تاخیر متفاوت مولفه های فرکانسی آن تغییر خواهد کرد. در صورتیکه شیب منحنی تاخیر گروه-فرکانس خط تاخیری پاشنده قرینه شیب منحنی پاشندگی یک سیستم باشد می توان در هم ریختگی سیگنال ناشی از عوامل محیطی و اجزای ساختاری سیستم را حذف کرد [۱].

¹⁴ C-Section



شکل ۳: خط تزویجی نامتقارن با استفاده از خط انتقال اینتر دیجیتال و خط انتقال معمولی [۱۰]



شکل ۴: ساختار پاشنده تاخیری پیشنهادی با دو بخش C شکل

۴- نتایج طراحی و شبیه‌سازی

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساختار پیشنهادی با نرم‌افزار Ansoft HFSS انجام شده است. ساختار مرجع [۱۱] به صورت چندلایه، با ۴ بخش C-شکل و با تزویج پهلوتاب و پین‌های اتصال کوتاه به صفحه زمین جهت افزایش ضریب تزویج ساخته شده است که با توجه به کوچک بودن بعضی از ابعاد ساختار تحقق عملی آن بسیار سخت است. در مقابل، ساختار پیشنهادی در این مقاله به صورت تک لایه صفحه‌ای^{۱۵} ساده، کوچک، تنها با ۲ بخش C-شکل، مسطح و بدون پین‌های اتصال کوتاه به صفحه زمین است که به منظور افزایش ضریب تزویج از مزیت ساختارهای CRLH بهره برده شده است.

ج- ساختارهای C شکل بر پایه CRLH

در طراحی ساختارهای پاشنده با استفاده از بخش های C شکل معمولاً به ضرایب تزویج بالا نیاز است که در تحقق عملی ساختار، باعث ابعاد کوچک شکاف ها و پهنای خطوط می‌شود. همچنین به خاطر ماهیت متناوب تاخیر گروه ساختارهای C شکل در طراحی، باید محدودیت تاثیر ماکزیمم‌های مرتبه بالاتر تاخیر گروه در پهنای باند را در نظر گرفت. ساختارهای CRLH به خاطر ماهیت الکترومغناطیسی خود و وابستگی ضریب شکست به فرکانس، تناوب در تاخیر گروه ساختارهای C شکل را حذف می‌کنند. همچنین بخاطر حالت موج محوشونده، این ساختارها ضرایب تزویج بالایی را فراهم می‌کنند.

۳- ساختار پیشنهادی و شرح عملکرد آن

در این مقاله به منظور طراحی یک DDL با تاخیر گروه ۱ ns در فرکانس ۴ GHz تا ۵ GHz، که از نظر ابعاد و پارامترهای تاخیر گروه بهینه است از خط تزویجی میان انگشتی نامتقارن استفاده شده است. ساختار پیشنهادی با یک زیرلایه RT/duroid4003 با ضخامت ۰/۸۳۱mm طراحی شده است. ضریب گذردهی نسبی این زیرلایه ۳/۵۵ و تانژانت تلفات آن ۰/۰۰۲۷ است. شکل (۳) سلول واحد CRLH ساختار را نشان می‌دهد [۱۰]. شکل (۴) ساختار کلی پاشنده تاخیری پیشنهادی شامل دو بخش C شکل طراحی شده با خط تزویجی میان انگشتی نامتقارن را نشان می‌دهد. مقدار پارامترهای نهایی که منجر به عملکرد مناسب ساختار می‌شود در جدول (۱) نمایش داده شده است. (این پارامترها بر حسب میلی‌متر هستند و در شکل (۳) نشان داده شده‌اند).

جدول ۱: ابعاد ساختار پیشنهادی در شکل ۳ (بر حسب میلی‌متر)

	Lf	Wf	Wl	Ws	Wg	Wgh	Wgv
CRLH C-Section 1	۸/۳	۰/۱	۰/۹	۰/۶	۰/۱	۰/۱	۰/۱
CRLH C-Section 2	۷/۵	۰/۱	۱	۰/۶	۰/۲	۰/۱	۰/۱

¹⁵ Planar

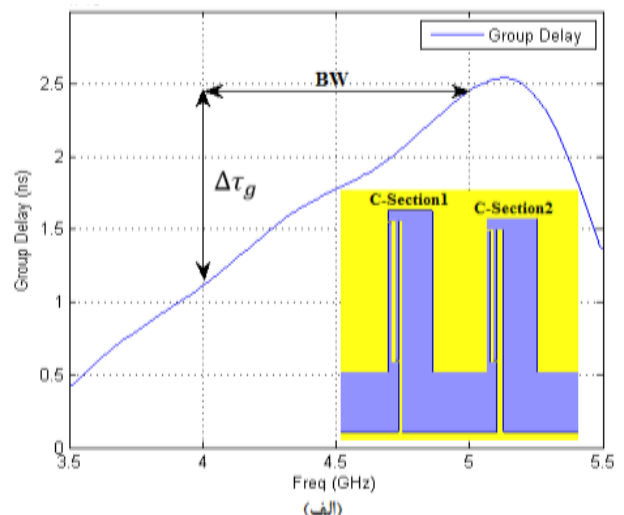
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار تاخیری پاشنده کوچک سازی شده با استفاده از دو بخش C شکل تشکیل شده از خط تزویجی میان انگشتی نامتقارن، برای افزایش ضریب تزویج طراحی شده‌است. این نوع طراحی، علاوه بر ایجاد شیب خطی مناسب در تاخیر گروه و کاهش اندازه موجب افزایش پهنای باند فرکانسی و زمانی ساختار، نسبت به ساختارهای پیشین شده‌است. ساختار پیشنهادی در فرکانس ۴ تا ۵ گیگاهرتز کار می‌کند و دارای تاخیر گروه $1/1\text{ns}$ و پهنای باند فرکانسی $1/4\text{ GHz}$ است. ساختار به صورت تک لایه و بدون وایا طراحی شده‌است که فرآیند ساخت آن ساده و از نظر هزینه مقرون به صرفه است، بنابراین می‌تواند برای کاربرد در گیرنده‌های فشرده‌ساز و همچنین افزایش تفکیک‌پذیری در پردازش سیگنال آنالوگ بسیار مناسب باشد.

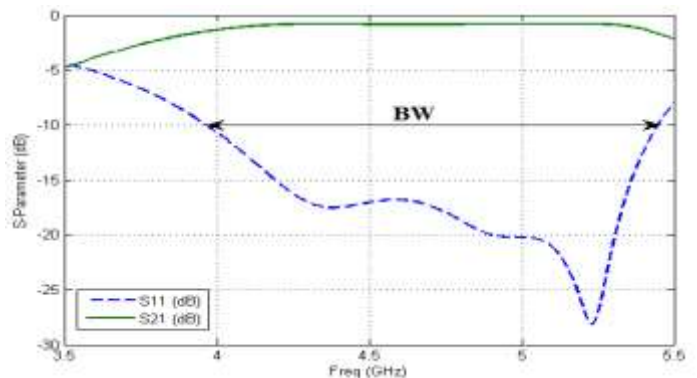
مرجع‌ها

- [1] J.B.Y. Tsui, "Microwave receivers with electronic warfare applications," John Wiley and Sons, New York, 1986, pp. 278-328.
- [2] V. S. Dolat and R. C. Williamson, "A continuously variable delay-line system," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., Annapolis, MD, Sep. 1976, pp. 419-423.
- [3] F. E. Gardiol, Microstrip circuits, New York: J. Wiley & Sons, c1994.
- [4] R. S. Withers, A. C. Anderson, P. V. Wright, and S. A. Reible, "Superconductive tapped delay lines for microwave analog signal processing," IEEE Trans. Magn., vol. MAG-19, no. 3, pp. 480-484, Mar. 1983.
- [5] M. A. G. Laso, T. Lopetegui, M. J. Erro, D. Benito, M. J. Garde, M. A. Muriel, M. Sorolla, and M. Guglielmi, "Real-time spectrum analysis in microstrip technology," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, no. 3, pp. 705-717, Mar. 2003.
- [6] S. Abielmona, S. Gupta, and C. Caloz, "Experimental demonstration and characterization of a tunable CRLH delay line system for impulse/continuous wave," IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., vol. 17, no. 12, pp. 864-866, Dec. 2007.
- [7] B. R. Potter, "Surface acoustic wave slanted correlators for linear FM pulse compressor Report," IEEE MTT International Microwave Symposium Digest. (77CH1219-5), pp. 318-320, June 1977.
- [8] H. Matthews, "Surface wave Filter," Wiley, New York 1977
- [9] C. Caloz and T. Itoh, Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2006.
- [10] R. Keshavarz, M. Movahhedi, A. Hakimi, "A compact dual-band branch-line coupler based on the interdigital transmission line. Electrical Engineering," (ICEE), 2011 19th Iranian Conference on.
- [11] S. Gupta, D. L. Sounas, Q. Zhang, and C. Caloz, "All-pass dispersion synthesis using microwave C-sections," Int. J. Circuit Theory Appl., vol. 42, no. 12, pp. 1228-1245, May 2013.

نمودار تاخیر گروه ساختار پیشنهادی در بازه طراحی شده (۴ تا ۵ گیگاهرتز) در شکل (۵) نمایش داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ساختار پیشنهادی دارای شیب خطی مناسب است و همچنین نسبت به مرجع [۱۱] دارای ۴۰٪ افزایش پهنای باند فرکانسی و ۱۰٪ افزایش تاخیر گروه مطلوب است. در شکل (۶) نمودار پارامترهای پراکندگی ساختار پیشنهادی (بر حسب dB) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که $|S_{11}|$ ، به میزان خوبی کمتر از dB -۱۰ بوده و بنابراین ساختار از تطبیق مناسبی برخوردار است. $|S_{21}|$ ساختار نیز در محدوده پهنای باند فرکانسی بسیار نزدیک به dB ۰ است. علاوه بر کاهش تعداد بخش‌های C شکل، اندازه ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختار مرجع [۱۱] دارای ۴۰٪ کاهش است.



شکل ۵: تاخیر گروه ساختار پیشنهادی در بازه ۴GHz تا ۵GHz بر حسب ns



شکل ۶: نمودار پارامترهای پراکندگی ساختار پیشنهادی