

## بررسی و شبیه سازی همشنوایی بین خطوط میکرواستریپ و کاهش آن

امیرحسین دباغی<sup>۱</sup> و محمدروح اله یزدانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، amirhossein.dabaghi@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، m.yazdani@khuisf.ac.ir

چکیده - این مقاله به بررسی کاهش همشنوایی بر روی خطوط میکرواستریپ با استفاده از گارد محافظ بین خطوط روی برد مدار چاپی و نا انطباقی مد زوج، فرد و استاتیکی می پردازد و در شبیه سازی انجام شده به بررسی مقادیر ولتاژ همشنوایی انتهایی (fext) در حوزه زمان و فرکانس روی خطوط میکرواستریپ در طول ها و عرض های متفاوت پرداخته شده است و سعی در بهبود ولتاژ همشنوایی شده است. و در انتها یک مقایسه بین مقادیر شبیه سازی شده انجام گرفته است. کلید واژه- همشنوایی، گارد مرسوم، مد زوج و فرد، میکرواستریپ، مدارچاپی

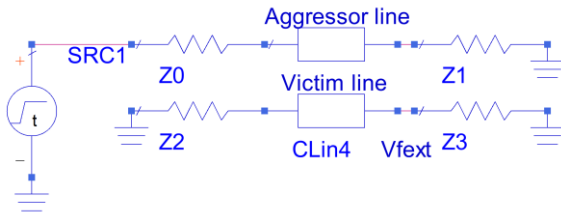
نسبت به خطوط میکرواستریپ بر هزینه تر می باشند. به خاطر اینکه خطوط استریپ نیاز به لایه های بیشتری دارند. برای کاهش هم شنوایی در قسمت انتهایی خطوط میکرواستریپ، ماده دی الکتریک اضافی در مسیر خطوط میکرواستریپ باید نشانده شود [۲]. در صورتی که اضافه کردن این ماده دی الکتریک نیز خود هزینه های اضافی را در پی دارد. برای کاهش هم شنوایی می توان فاصله بین دو خط را افزایش داد و یا از گارد اتصال بین لایه استفاده کرد که اتصالات زمین به طور یکنواخت بر روی خط گارد قرار داده شده اند [۴-۵]. اگرچه افزایش فاصله بین خطوط منجر به افزایش مساحت PCB می شود و همچنین استفاده از گارد اتصال بین لایه محدودیت های جدیدی برای اتصالات و مسیریابی در پشت صفحه PCB ایجاد می کند چراکه حفره های ایجاد شده به خاطر اتصالات این محدودیت را به وجود می آورند. در این مقاله، یک گارد محافظ در بین خطوط پیشنهاد شده که می تواند به صورت موثر هم ولتاژ همشنوایی در قسمت انتهایی و هم نا انطباقی مد زوج-فرد خطوط میکرواستریپ روی PCB را کاهش دهد [۳، ۹].

### ۱- مقدمه

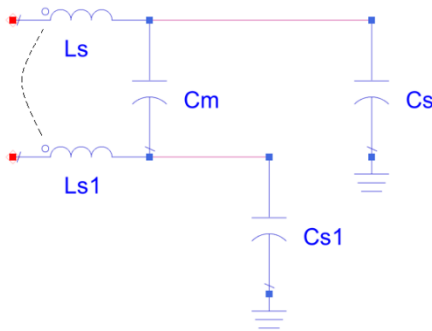
هم شنوایی، ناشی از تزویج ناخواسته میان مسیره های مختلف سیگنال ها می باشد. بارزترین همشنوایی، همشنوایی در خطوط تلفن می باشد. در این هنگام صدای کانال تلفنی مجاور (ضعیف تر از صدای مخاطب) نیز شنیده می شود. این نویز بیشتر در رسانه هایی دیده می شود که زوج سیم ها به صورت موازی کنار یکدیگر قرار می گیرند و هر کدام از سیم ها مانند آنتن فرستنده و گیرنده عمل می کنند.

خطوط میکرواستریپ به طور گسترده در اتصالات میان دو چیپ بر روی بردهای مدار چاپی و عمدتاً به خاطر هزینه های پایین آنها استفاده می شوند. در دو خط میکرواستریپ که به موازات هم قرار دارند، اگر یک سیگنال دیجیتالی به یک خط اعمال شود، در خط میکرواستریپ دیگر یک ولتاژ هم شنوایی با دامنه بزرگ در قسمت انتهایی خط میکرواستریپ مجاور پدیدار می گردد. این ولتاژ هم شنوایی در قسمت انتهایی خط میکرواستریپ، با اختلاف نسبت بین تزویج خازنی و سلفی دو خط میکرواستریپ موازی تحریک می شود [۱]. اگرچه در خطوط استریپ (نواری) همشنوایی در قسمت انتهایی وجود ندارد، ولی

سلفی از تزویج خازنی بزرگ‌تر است،  $V_{fext}(t)$  در لبه بالارونده  $V_a(t)$  دارای پالس منفی است.



شکل ۱: زوج خط انتقال تزویج شده



شکل ۲: مدل زوج خط انتقال تزویج شده

## ۲-۲-۲ نائطباقی مد زوج و فرد

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ترکیب سیگنال‌های اعمال شده به یک زوج خط انتقال را می‌توان به سه طبقه دسته‌بندی کرد. مد زوج مربوط به حالتی می‌شود که دو سیگنال موردنظر در یک جهت و در یک زمان مشخص از خطوط عبور می‌کنند. مد فرد اشاره دارد به حالتی که در آن دو سیگنال در دو جهت مخالف هم و در یک زمان مشخص از خطوط عبور می‌کنند. مد استاتیکی اشاره به حالتی دارد که در آن یک سیگنال با گذشت زمان عبور می‌کند در حالی که سیگنال دیگر با گذشت زمان تغییری ندارد. شکل ۴ یک روش دیگری برای استخراج کردن شکل موج ولتاژ همشنوایی قسمت انتهایی که به معادله (۱) بیان شد را نشان می‌دهد. [۷].

شکل ۴ شکل موج‌های سیگنال در سمت فرستنده ( $x=0$ ) را نشان می‌دهد. یک سیگنال با لبه بالارونده که زمان آن به اندازه TR است، به خط متجاوز اعمال می‌شود؛ در حالی که هیچ

## ۲- همشنوایی بین خطوط مایکرواستریپ تزویج شده

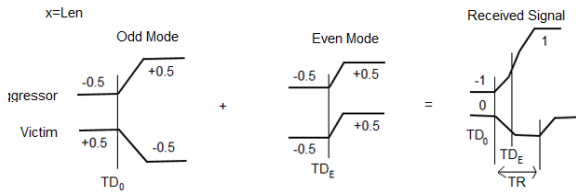
نویز همشنوایی به طور جدی اجرای مدارهای دیجیتالی با سرعت بالا را مخصوصاً با افزایش بالا رفتن زمان سیگنال، پایین می‌آورد. چنین تداخلی به طور کلی در شرایط نزدیک به انتهای نزدیک همشنوایی (next) و انتهای دور همشنوایی (fext)، ارائه شده است. [۱۰]. هر دوی این شرایط به القا دو جانبه و تزویج ظرفیت متناسب هستند. ولی  $fext$  نیز متناسب با طول اتصالات داخلی جفت است و فقط در محیط‌های ناهمگن مثل ساختارهای میکرو باندی وجود دارد. بدین گونه در ساختار خط باندی، مثل محیط‌های همگن next وجود دارد ولی  $fext$  می‌تواند محدود شود [۶].

## ۲-۱-۲ ولتاژ همشنوایی قسمت انتهایی

یک خط انتقال ایزوله شده می‌تواند به وسیله خازن تزویج شده همان خط (Cs) و سلف تزویج شده همان خط (Ls) به صورت یکنواخت مدل گردد. شکل ۱ یک زوجی از خط انتقال تزویج شده را نشان می‌دهد. این زوج خط انتقال تزویج شده را می‌توان علاوه بر خازن تزویج شده خط (Cs) و سلف تزویج شده خط (Ls) بواسطه خازن متقابل (Cm) و سلف متقابل (Lm) مدل کرد که در شکل ۲ نشان داده شده است. [۷]. در خطوط انتقال تزویج شده که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، خط انتقال فعالی که سیگنال به آن اعمال می‌شود خط متجاوز نامیده می‌شود و خط انتقال غیرفعال که هیچ سیگنالی به آن اعمال نمی‌شود، خط قربانی نامیده می‌شود. ولتاژ همشنوایی قسمت انتهایی  $V_{fext}$  ولتاژی است که در قسمت گیرنده‌ی خط قربانی تحریک می‌شود. شکل موج ولتاژ همشنوایی قسمت انتهایی در حالت بی‌تلف به صورت معادله (۱) نشان داده می‌شود [۷].

$$V_{fext}(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{C_m}{C_t} - \frac{L_m}{L_s} \right) \cdot TD \cdot \frac{dV_a(t - TD)}{dt} \quad (1)$$

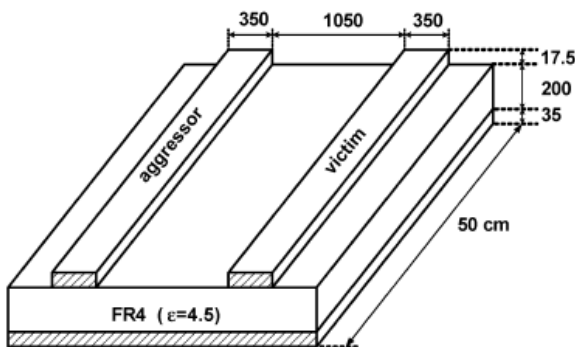
که در آن TD زمان انتشار از طریق خط انتقال و  $V_a(t)$  ولتاژ اعمالی در خط متجاوز است. به خاطر اینکه در خط مایکرواستریپ که یک طرف آن در معرض هوا قرار دارد تزویج



شکل ۵: شکل موج سیگنال در سمت گیرنده [۷].

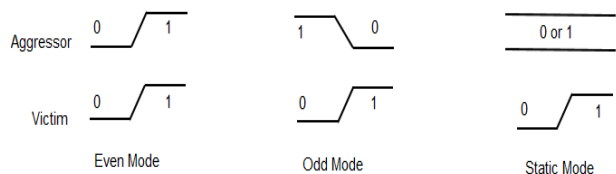
### ۳- گارد محافظ بین خطوط

شکل ۶ یک زوج خط میکرواستریپ را بدون استفاده از نوار گارد نشان می‌دهد. آنها بر روی یک برد FR4 قرار گرفته‌اند که ضخامت دی‌الکتریک آن ۲۰۰ میکرومتر است. پهنای هر خط میکرواستریپ برابر با ۳۵۰ میکرومتر است. ضخامت مس مورد استفاده به عنوان رسانا برابر با ۱۷/۵ میکرومتر است. فاصله بین خط متجاوز و خط قربانی حدود ۱۰۵ میکرومتر است که به اندازه سه برابر پهنای خط انتقال است. شکل ۷ یک زوج از خط میکرواستریپ را نشان می‌دهد که یک خط به عنوان گارد بین خطوط متجاوز و قربانی قرار گرفته است [۸]. فاصله بین خط قربانی و خط متجاوز در این حالت همان ۱۰۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است تا یک مقایسه مناسب صورت گیرد. گارد بین خطوط از گارد اتصال بین لایه در کاهش هم‌نشوایی قسمت انتهایی موثرتر است زیرا قسمت پشت PCB در مسیر خط میکرواستریپ به دلیل وجود اتصالات نمی‌تواند برای مسیریابی استفاده شود.

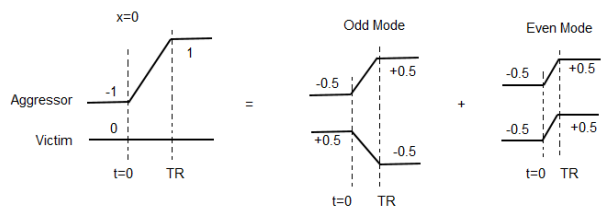


شکل ۶: زوج خط میکرواستریپ بدون خط گارد [۷].

سیگنالی به خط قربانی اعمال نمی‌شود. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، این ترکیب سیگنال به دو مد یعنی مد زوج و مد فرد تجزیه می‌شود. اگر یک خط انتقال بی تلف را در نظر بگیریم، هر دو مد زوج و فرد در مسیر خط انتقال بدون اینکه اعوجاجی داشته باشند، منتشر می‌گردند. شکل ۵، شکل موج‌های سیگنال را در سمت گیرنده نشان می‌دهد ( $x=Len$ ). سیگنال مد فرد نشان داده شده در شکل ۵ و ۴ شامل یک سیگنال بالارونده در خط متجاوز و یک سیگنال پایین رونده در خط قربانی است. سیگنال بالارونده در خط متجاوز یک ولتاژ هم‌نشوایی با پالس منفی در خط قربانی ایجاد می‌کند و سیگنال پایین رونده در خط قربانی یک ولتاژ هم‌نشوایی با پالس مثبت در خط متهاجم ایجاد می‌کند. مجموع پالس منفی و سیگنال پایین رونده، زمان گذر لبه پایین رونده سیگنال را تسریع می‌بخشد. به طور مشابه، مجموع پالس منفی و سیگنال بالارونده، زمان گذر لبه بالارونده سیگنال را تسریع می‌بخشد و سریع تر این کار انجام می‌گردد. بنابراین، سیگنال مد فرد از سیگنال مد استاتیک سریع‌تر انتشار می‌یابد. سرعت انتشار سیگنال مد استاتیک برابر با همان مقداری خواهد بود که سیگنال از یک خط انتقال ایزوله شده بدون تزویج انتشار می‌یابد. همچنین، سیگنال مد زوج از سیگنال مد استاتیک کندتر انتشار می‌یابد. [۷].

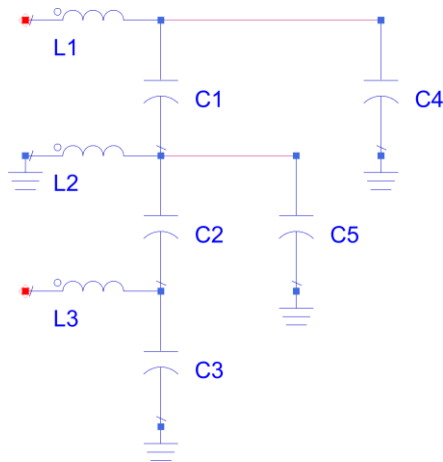


شکل ۳: مدهای سیگنال در یک زوج خط انتقال [۷].

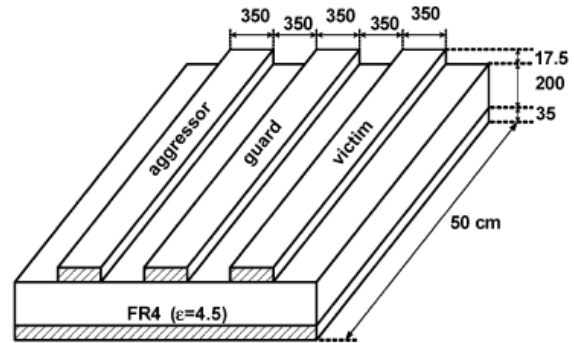


شکل ۴: شکل موج سیگنال در سمت فرستنده [۷].

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل ۸: مدل سلف و خازن با گارد



شکل ۷: گارد مرسوم با خط انتقال آزاد در دو طرف [۷].

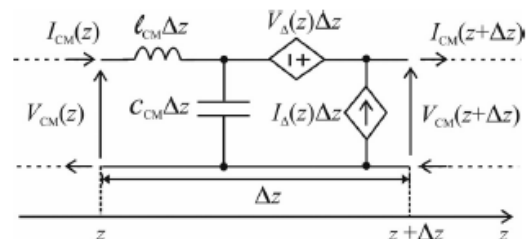
#### ۴- شبیه سازی و مقایسه

شکل ۱۰ شکل موج های ولتاژ همشنوایی قسمت انتهایی (fext) اندازه گیری شده توسط ADS در حوزه زمان (TDR) برای دو حالت نشان داده شده در شکل های ۶ و ۷ را نشان می دهد. یک پالس پله با دامنه ۲ ولت با زمان صعود اولیه ۵۰ پیکو ثانیه به یک پایه خط متجاوز اعمال می شود. شکل موج ولتاژ همشنوایی در سمت مخالف خط قربانی اندازه گیری می شود. هر دو پایه خطوط متجاوز و قربانی به بار ۵۰ اهم متصل گشته اند. یک طرف گارد به زمین و طرف دیگر آن به جایی وصل نشده است. گارد مرسوم کوچکترین ولتاژ همشنوایی را در قسمت انتهایی نسبت به حالت بدون گارد تحویل داد. شکل ۱۱ همشنوایی قسمت انتهایی حوزه فرکانس اندازه گیری شده (S21) را برای دو حالت نشان داده شده در شکل های ۶ و ۷ را با استفاده از ADS نشان می دهد که گارد مرسوم کوچکترین همشنوایی را برای رنج مختلفی از فرکانس ها دارد. هر دو شکل ۱۰ و ۱۱ برای همشنوایی قسمت انتهایی برای دو حالت مقایسه شده، بیانگر یک روند هستند. در فرکانس های خیلی بالا، مقدار S21 با فرکانس کاهش پیدا می کند؛ زیرا خطوط میکرواستریپ در فرکانس های بالا تلفات دارند.

به خاطر اینکه هم خازن متقابل میان خط متجاوز و نوار گارد و هم خازن متقابل میان خط قربانی و نوار گارد افزایش داشته است، خازن متقابل میان خط متجاوز و خط قربانی نیز افزایش داشته است. خازن متقابل  $C_m$  بین خط متجاوز و خط قربانی را می توان به صورت معادله های (۲) و (۳) بیان کرد. [۱۱]. شکل ۸ مدل سلف و خازن با گارد در بین خط متجاوز و قربانی را نشان می دهد. و شکل ۹ مدل خازن و سلف از طریق رابطه (۳) را نشان می دهد. [۱۱].

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_m \\ -c_m & c_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_m = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 - 2c_m & \frac{c_1 - c_2}{2} \\ \frac{c_1 - c_2}{2} & \frac{c_1 + c_2 + 2c_m}{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{CM} & \Delta C \\ \Delta C & c_{DM} \end{bmatrix} \quad (3)$$



شکل ۹: مدل سلف و خازن از طریق رابطه (۳) [۱۱].

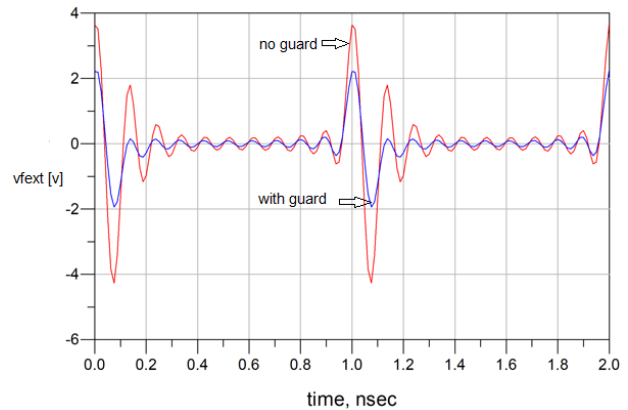
### ۵- نتیجه‌گیری

برای استخراج کردن شکل موج ولتاژ هم‌سنوایی انتهایی از نا انطباقی مد زوج و فرد استفاده می‌شود. نا انطباقی مد زوج-فرد دقیقاً به همان دلیل به وجود می‌آید که ولتاژ هم‌سنوایی قسمت انتهایی به وجود می‌آید. هردوی آنها از اختلاف نسبت تزویج خازنی و سلفی به وجود می‌آید. برای کاهش نویز هم‌سنوایی روش‌هایی گفته شده است که طی شبیه‌سازی‌ها و محاسبات انجام شده مشاهده شد که گارد مرسوم با تغییر ۲۵٪ در عرض بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد.

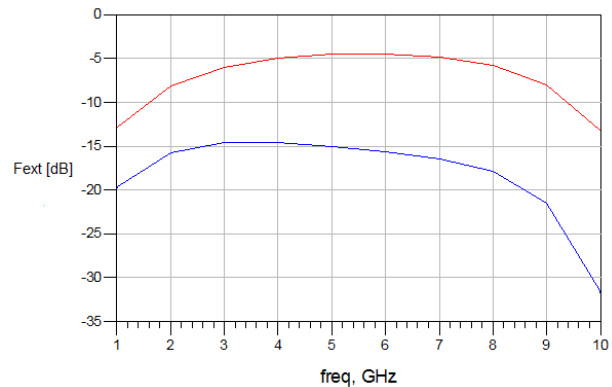
### مراجع

- [1] Y. S. Sohn, J. C. Lee, and H. J. Park, "Empirical equations on electrical parameters of coupled microstrip lines for crosstalk estimation in printed circuit board," IEEE Trans. Adv. Packag., vol. 24, no. 4, pp.521-527, Nov. 2001.
- [2] T. R. Gazizov, "Far-end crosstalk reduction in double-layered dielectric interconnects," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 43, no. 4, pp.566-572, Nov. 2001.
- [3] D. Brooks, "Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design. New York: Prentice Hall, pp. 233-234, 2003.
- [4] I. Novak, B. Eged, and L. Hatvani, "Measurement by vector-network analyzer and simulation of crosstalk reduction on printed circuit boards with additional center traces," in Instrumentation Measurement Technol. Conf., Irvine, CA, , pp. 269-274, May 1993.
- [5] L. Zhi, W. Qiang, and S. Changsheng, "Application of guard traces with vias in the RF PCB layout," in 3rd Int. Symp. Electromagn. Compat., Beijing, China, vol. 21-24, , pp. 771-774 May 2002.
- [6] S. H. Hall and H. L. Heck, Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital System Design. Hoboken, NJ: Wiley, ch. 4. 2011.
- [7] L. Kyoungcho, et al. "A serpentine guard trace to reduce the far-end crosstalk voltage and the crosstalk induced timing jitter of parallel microstrip lines." Advanced Packaging, IEEE Transactions vol. 30 no.4 pp. 809-817. 2008.
- [8] S. G-Hwa, Jia-Hung Shiu, and Po-Wei Chiu. "Analysis and design of crosstalk noise reduction for coupled striplines inserted guard trace with an open-stub on time-domain in high-speed digital circuits." Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on vol. 1 no. 10, pp. 1573-1582, oct. 2011.
- [9] K. Lee, H.-B. Lee, H.-K. Jung, J.-Y. Sim, and H.-J. Park, "Serpentine guard trace to reduce far-end crosstalk and even-odd mode velocity mismatch of microstrip lines by more than 40%," in Electron. Compon. Technol. Conf., Reno, pp. 329-332. , NV, 2007
- [10] S. H. Hall and H. L. Heck, Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital System Design. Hoboken, NJ: Wiley, ch. 4 , 2009.
- [11] Grassi, Flavia, et al. "On mode conversion in geometrically unbalanced differential lines and its analogy with crosstalk." Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on vol. 57, no.2, pp. 283-291, APRIL. (2015).

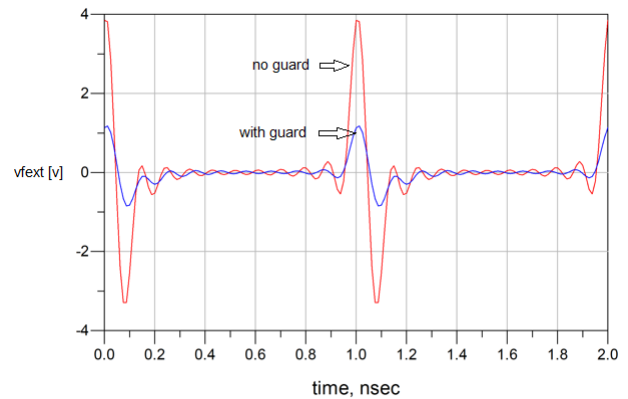
با تغییر ۲۵٪ عرض خط گارد، در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که ولتاژ هم‌سنوایی قسمت انتهایی نسبت به حالت قبلی بیشتر کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۰: شکل موج‌های ولتاژ هم‌سنوایی قسمت انتهایی (fext)



شکل ۱۱: هم‌سنوایی قسمت انتهایی در حوزه فرکانس (fext)



شکل ۱۲: شکل موج ولتاژ هم‌سنوایی قسمت انتهایی (fext) با تغییر ۲۵٪