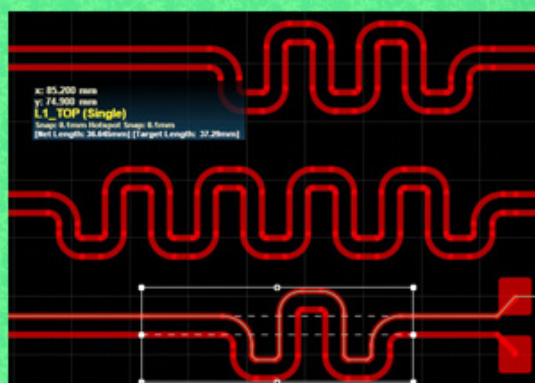
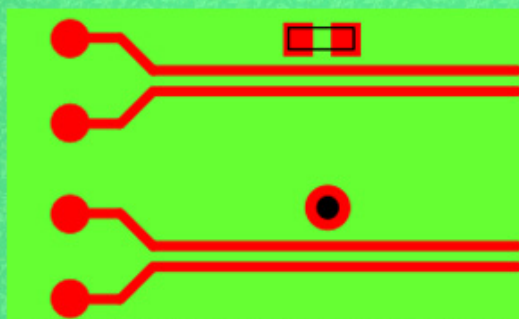




## سیگنال های تفاضلی و مسیر زوج دیفرانسیلی در PCB

### سیگنال های تفاضلی و مسیر زوج دیفرانسیلی در PCB



<https://blog.microele.com>

تاریخ انتشار ۲۴ آذر، ۱۴۰۲ توسط سید حسین سلطانی

سلام خدمت همه شما میکروالکامی ها. در مطلب قبلی از نکات **طراحی PCB** به معرفی **فیلتر مد مشترک** پراخته شد. در این مطلب به بررسی مسیر های زوج دیفرانسیلی (سیگنال دیفرانسیلی) یا زوج تفاضلی در طراحی PCB سرعت بالا پرداخته خواهد شد. پس با من تا انتهای مطلب همراه باشید. همچنین شما میتونید سایر مطالب من رو از **این لینک** مطالعه و بررسی کنید.



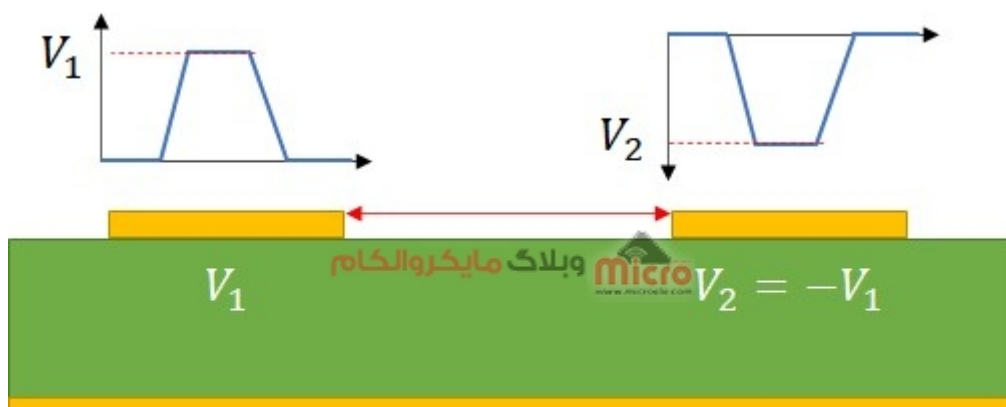
## مقدمه

مسیر های زوج دیفرانسیلی (Differential Pairs) یا سیگنال دیفرانسیلی و تفاضلی روشی برای ارتباط دیتا با نرخ یا سرعت تبادل دیتای بالا است. در زوج دیفرانسیلی معمولاً لبه سیگنال ها دارای زمان صعود یا Rise Time سریعی می باشند. بستر دیفرانسیلی اساسی ترین روش در طراحی های سرعت بالا می باشد. کاربرد هایی نظیر HDMI، Ethernet و USB از پرکاربرد ترین موارد استفاده مسیر زوج تفاضلی یا دیفرانسیلی هستند. البته باید الزامات آن را در طراحی و روتینگ PCB نیز رعایت کرد تا به نتیجه مطلوب دست یابیم. در این مطلب به معرفی و بررسی این روش ها پرداخته خواهد شد.

## مبانی و اصول سیگنالینگ دیفرانسیلی

زوج دیفرانسیلی (زوج تفاضلی) تشکیل شده از دو مسیر یا trace ای است که در کنار هم با طول یکسان و قرینه کشیده شده و حامل سیگنالی مشابه اما با پلاریته معکوس هم هستند. در پروتکل های دیجیتال سرعت بالا، دیتا یا سیگنال از مسیری که امپدانس مورد نیاز در آن رعایت شده ارسال می شود. تفاوت بین مسیر دیجیتال استاندارد و سیگنالینگ دیفرانسیلی یا تفاضلی این است که در گیرنده سیگنال اصلی از دو سیگنال دریافتی بازسازی می شود.

در تصویر زیر نحوه سیگنالینگ در مسیر زوج دیفرانسیلی یا تفاضلی نمایش داده شده است. در این روش دو سیگنال وجود دارد که دارای اندازه یکسان اما عکس یکدیگر اند. لذا سطح سیگنال بدست آمده در گیرنده، حاصل این دو سیگنال است که به شکل زیر نمایش داده شده است.



$$\text{Signal level: } V = V_1 - V_2 = 2V_1$$

سطح سیگنال دیفرانسیلی

این روش از ارسال دیتا دیجیتال در پروتکل های سرعت بالا همانند USB و خطوط کلاک و دیتای DDR ها مرسوم بوده و یک استاندارد است. در جدول زیر مزایا و برخی از چالش های این روش سیگنالینگ بیان شده است. در ادامه به بررسی این موارد خواهیم پرداخت.

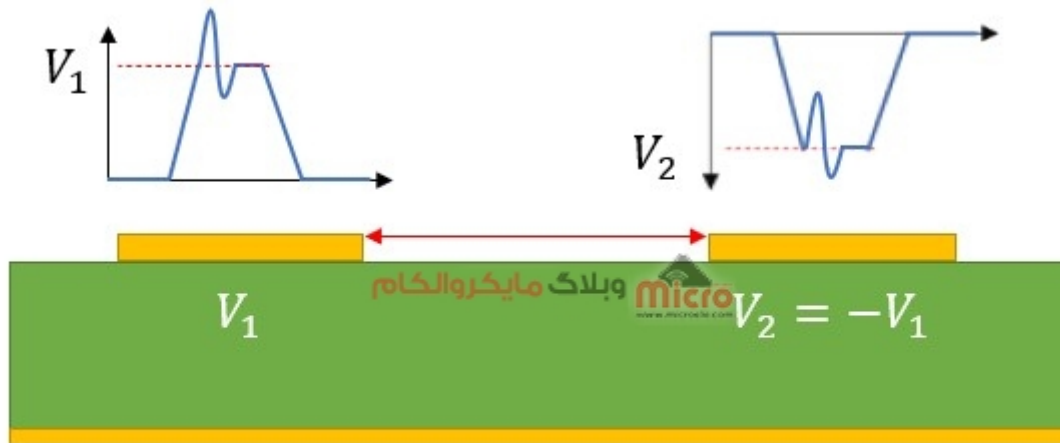
معایب/اشکال	مزیت	دسته بندی
عدم حذف کامل نویز مد مشترک و وابسته به حذف میزان انحراف (skew)	حذف نویز مد مشترک نویز دیفرانسیلی تابشی کمتر از نویز مد مشترک	EMC
نیاز به تطبیق تاخیر دقیق بخاطر وجود لبه های خیلی سریع در سیگنال	EMI کم زوج دیفرانسیلی اجازه می دهد که در دیتاریت های بالا مناسب باشد	نویز EMI سرعت بالا
تاثیر بر انتهای مسیر اگر چه خاتمه مسیر روی PCB این مشکل را کم می کند	مقاومت در برابر آفست Ground در روتینگ طولانی بین دو برد	آفست زمین (Ground Offset)

## جلوگیری از نویز مد مشترک (common-mode noise)

حذف یا جلوگیری از نویز مد مشترک بدون نیاز به فیلتر یکی از ویژگی های منحصر به فرد خطوط دیفرانسیلی یا تفاضلی می باشد. در حقیقت تفاوت بین دو سیگنال هر مسیر باعث حذف **نویز مد مشترک** خواهد شد. در تصویر زیر



می‌توان نحوه عملکرد و حذف نویز مد مشترک را در مسیر سیگنال دیفرانسیلی مشاهده کرد.



$$\text{Received signal: } V = (V_1 + V_N) - (V_2 + V_N) = 2V_1$$

حذف نویز مد مشترک در مسیر زوج تفاضلی یا زوج دیفرانسیلی

نکته ای که باید توجه داشت این است که باید روی هر مسیر، نویز یکسانی قرار بگیرد. بهرحال، این به معنی قابلیت مصنویت زوج دیفرانسیلی در مقابل crosstalk در PCB نیست. مثلاً یک مسیر در فاصله خیلی کم نسبت به مسیر دیفرانسیلی می‌تواند باعث بروز crosstalk شود. این تداخل بصورت برابر در هر دو مسیر تفاضلی قرار نمی‌گیرد و در نتیجه نویز کاملاً در گیرنده حذف نمی‌شود. لذا باید از وجود فاصله مناسب بین مسیر دیگر با مسیر تفاضلی اطمینان حاصل کرد.

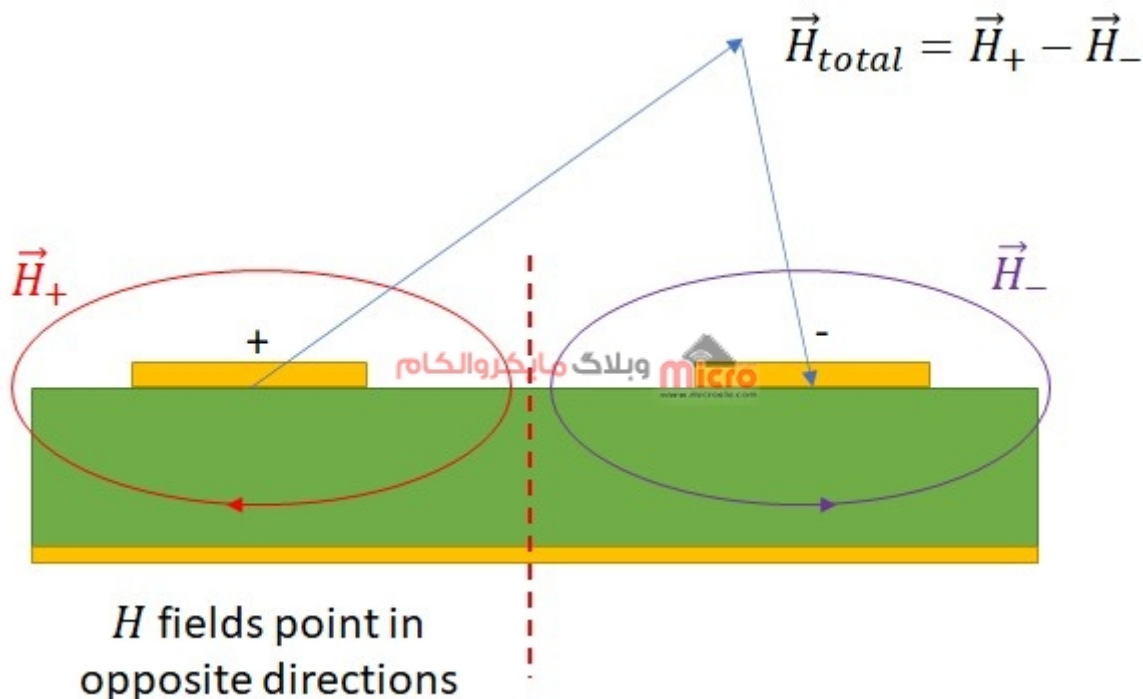
## EMI منتشر شده از زوج دیفرانسیلی یا زوج تفاضلی

یکی از مزایای اصلی مسیرهای زوج دیفرانسیلی (زوج تفاضلی) نویز EMI تابشی یا تشعشعی کم آن است. از آنجاکه که مسیرهای دیفرانسیلی به یکدیگر نزدیک می‌باشند، میدان مغناطیسی هنگام سوئیچینگ برابر و عکس یکدیگر خواهند بود. تا زمانی که دو سیگنال دارای اندازه برابری باشند، میدان‌های تولیدی باهم مقابله کرده و خنثی خواهند شد. البته باید گفت میدان تولید شده همه جا صفر نیست و خیلی کم خواهد بود لذا نویز کمتری ایجاد خواهد شد. همین امر باعث مناسب بودن استفاده از مسیرهای دیفرانسیلی یا تفاضلی برای اطلاعات سرعت بالا خواهد بود.

پروتکل‌های سریال سرعت بالا (در حد گیگابیت بر ثانیه و بیشتر) دارای لبه‌های خیلی سریع در هر بیت دیتا خواهند بود. لذا هر مسیر باعث ایجاد نویز EMI قوی در اثر این زمان خیلی سریع (di/dt زیاد) خواهد شد. علاوه بر این خازن



پراکنده یا پارازیتی با مسیر های نزدیک آن می توانند باعث بروز مشکل شود.



حذف میدان مغناطیسی ایجاد روی مسیر زوج دیفرانسیلی

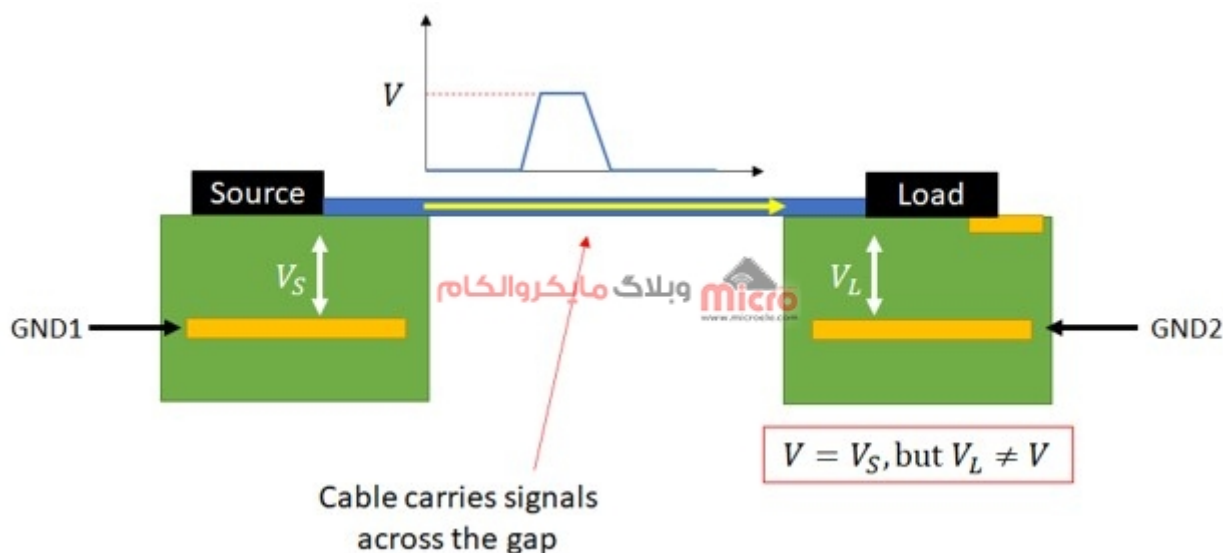
با اینکه زوج تفاضلی (سیگنال دیفرانسیلی) ممکن است crosstalk کمتری در مسیر های تکی (single-end) نزدیک خود داشته باشد، اما می تواند باعث ایجاد crosstalk حالت دیفرانسیلی در اطراف زوج دیفرانسیلی شود. لذا فاصله مناسب و درست بین زوج دیفرانسیلی مهم بوده و باید درست انتخاب شود. شاید زوج تفاضلی از نویز مد مشترک مصون باشد اما در مقابل **نویز دیفرانسیلی** اینگونه نیست. لذا باید در هنگام طراحی فاصله مناسب بین آنها را لحاظ کرد تا از تاثیر خیلی کم نویز بین آنها اطمینان حاصل نمود.

## مصونیت در برابر Ground Offset

یکی از دلایل اصلی که از زوج دیفرانسیلی یا تفاضلی برای پیوند های طولانی که ممکن است بین دو برد باشد استفاده می شود قابلیت مصونیت آن در برابر آفست GND یا Ground خواهد بود. آفست زمین در AC یا DC را می توان به عنوان نویز مد مشترک در نظر گرفت. این یک اختلال در سیگنال است که می تواند هر طرف از زوج دیفرانسیلی را در فاز و اندازه یکسان تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین می تواند توسط گیرنده تفاضلی حذف شود. اگر زمین سیگنال ارسالی برابر



نباشد دچار ناپیوستگی امپدانسی خواهد شد. اگر PCB خود را برای سیگنال های سرعت بالا ایجاد کرده باشیم، باید دارای سطح پتانسیل زمین یکنواخت در طول طراحی باشیم.



تأثیر Ground Offset در زوج دیفرانسیلی

## طراحی و روتینگ زوج تفاضلی (زوج دیفرانسیلی)

از آنجا که سیگنال دیفرانسیلی در پروتکل های محساباتی استاندارد قرار دارد و برای برخی از رابط ها سرعت بالا استفاده می شود، دارای الزام تطبیق امپدانس و کنترل موج برگشتی از انتهای مسیر دیفرانسیلی است. همه مسیر های زوج تفاضلی که برای طراحی PCB های سرعت بالا استفاده می شود نیاز به تنظیم دو مسیر زوج دیفرانسیلی داشته تا دیتا در هر دو مسیر بصورت همزمان به گیرنده برسند. در ادامه برخی از نکات اصلی هنگام استفاده از زوج دیفرانسیلی بیان شده است. برای سیگنال های سرعت بالا الزامات دیگری مانند پهنای باند سیگنال و تلفات در طول مسیر نیز مهم است. از این رو باید هنگام انتخاب قطعه و روش آنها را لحاظ کرد.

- **امپدانس مسیر تکی (single-end) و دیفرانسیلی:** در روتینگ زوج دیفرانسیلی برخی از الزامات امپدانس تفاضلی و single-end مشخص می شود که باید برای جلوگیری از موج برگشتی و انتقال حداکثر توان به گیرنده رعایت شود.
- **تاخیر یا تطبیق طول:** طول مسیر های زوج تفاضلی در روتینگ باید با یکدیگر برابر یا تطبیق داشته باشند.
- **فاصله ثابت:** فاصله بین زوج دیفرانسیلی باید حداقل طوری باشد که محدودیت های امپدانس و مسائل آن را



نقض نکند. چراکه باعث می‌شود نویز EMI مد مشترک به حداقل ترین حالت ممکن رسیده و بصورت برابر و یکسان روی زوج دیفرانسیلی قرار گیرد.

## مشکلات مربوط به مسیر های زوج تفاضلی در PCB

استفاده از زوج دیفرانسیلی دارای مزایای متعددی می‌باشد اما دارای مشکلات یا برخی محدودیت ها نیز می‌باشد. اولین آن نیاز به دو مسیر برای انتقال دیتا است. شاید نیاز نباشد بصورت مجزا هر مسیر را رسم کرد (در نرم افزار همزمان با هم رسم می‌گردد)، اما دارای rules بیشتری بوده و نیاز به فضای بیشتری دارد. در ادامه به برخی از این مشکلات اشاره شده است.

### برابر بودن مسیر های زوج دیفرانسیلی

یکی از برترین مزایای استفاده از مسیر های زوج تفاضلی (روتینگ سیگنال دیفرانسیلی)، این است که نویز بدلیل وجود دو خط با پلاریته عکس یکدیگر حذف خواهد شد. اما اگر طول مسیر ها با هم برابر نباشند تعادل مسیر برهم خورده و باعث ایجاد نویز مد مشترک شده و مشکلات EMI را به همراه خواهد داشت. بطور کلی هر چه زمان صعود و نزول مسیر بیشتر باشد، اگر طول مسیر برابر نباشد این مشکل بدتر خواهد شد.

### یکسان بودن پهنا و فاصله بین مسیر زوج دیفرانسیلی

هرچه مسیر زوج تفاضلی به هم نزدیک تر باشد، جفت شدن مسیر بهتر خواهد بود. اما هنگامی که فاصله به هر مسیر تغییر کند باعث عدم تطبیق امپدانس شده و مستعد تاثیرپذیری از نویز و EMI خواهد شد. جهت جلوگیری از این موضوع، مسیر زوج دیفرانسیلی باید با یکدیگر همزمان ترسیم شوند. این امر می‌تواند باعث بروز برخی محدودیت هنگامی که بر سر راه آن مواردی مانند via وجود داشته باشد شود. لذا از همین رو برخی از دستورات عملی ها برای عدم مواجهه با این مشکلات وجود دارد که در ادامه بیان می‌شود.

## دستورالعمل های روتینگ زوج تفاضلی

جهت حصول بهترین نتیجه و یکپارچگی در PCB برخی از موارد مهم در مسیرکشی زوج دیفرانسیلی روی برد بیان شده است.



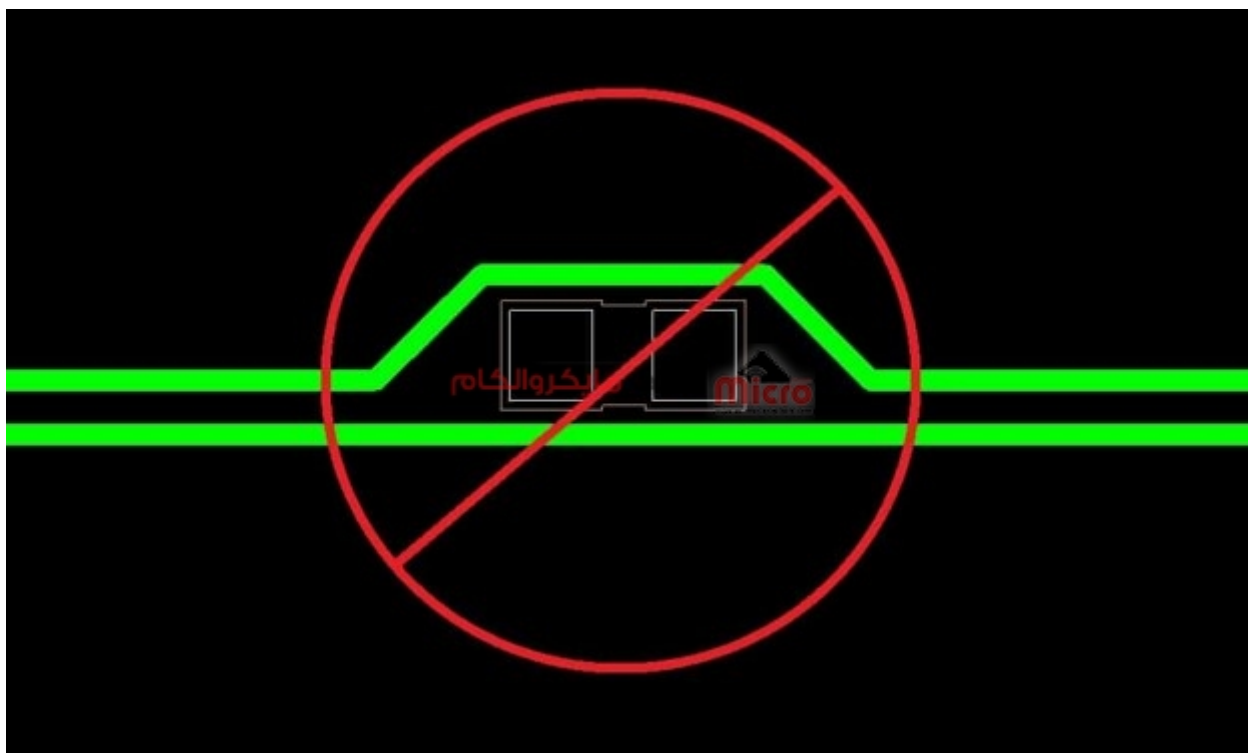
## روتینگ زوج دیفرانسیلی همزمان

- دو میسر زوج دیفرانسیلی باید با هم برابر بوده و همزمان رسم شوند.
- در صورت امکان از via استفاده نشود. در صورت استفاده باید بصورت جفت متقارن قرار گیرند. حتی المقدور آنها نزدیک به هم باشند و بصورت مساوی روی مسیرها قرار گیرند.
- روتینگ در لایه داخلی برای حداقل کردن crosstalk مناسب بوده اما به معنی انتقال بین لایه ها از طریق وایا می باشد.
- زوج دیفرانسیلی نسبت به سایر مسیرها باید فاصله داشته باشد. معمولاً این کار با مشخص کردن فاصله ای به اندازه سه برابر پهنای مسیر (trace) لحاظ می شود.
- در صورت امکان روتینگ زوج دیفرانسیلی گسترده را در لایه های سیگنال مجاور قرار دهید که باعث کنترل بهتر crosstalk می شود.

## مقارن بودن روتینگ بین دو مسیر

- بهترین روتینگ زوج دیفرانسیلی زمانی است که trace ها بطور نزیک یکدیگر را منعکس کنند. برای این کار می توان از موارد زیر بهره گرفت.
- روتینگ را طوری انجام داد که مانعی همانند وایا و قطعات passive بر سر راه آن وجود نداشته باشد تا تقارن زوج دیفرانسیلی رعایت شود.
  - مسیر ورود و خروج روتینگ به گونه ای باشد که مسیرها تا جای امکان یکدیگر را منعکس کنند.
  - استفاده از پهنای برابر در طول روتینگ
  - برابر بودن فاصله بین مسیرها در روتینگ





بین مسیر زوج دیفرانسیلی نباید مانع وجود داشته باشد

## برابر بودن طول مسیر

همانطور که پیشتر ذکر شد طول دو مسیر زوج دیفرانسیلی باید برابر باشد. برای دستیابی به این موضوع ممکن است در یک مسیر تیونینگ انجام شود. اگرچه این امر باعث برهم زدن تقارن مسیر می شود اما برابر بودن طول مسیر بسیار مهم تر می باشد.

## نتیجه گیری

اصلی ترین کاربرد مسیر های دیفرانسیلی در برد های سرعت بالا می باشد. کاربردهایی نظیر USB و HDMI یا سیگنال های کلاک و دیتا در DDR از این دست موارد می باشند. مهم ترین نکته در هنگام استفاده و روتینگ تفاضلی این است که باید حتما دارای طول یکسان و قرینه یکدیگر باشند. در این بین برابر بودن طول مسیر دارای اهمیت بیشتری می باشد. علاوه بر این روتینگ باید بصورت همزمان انجام شود.



امیدوارم از این مطلب کمال بهره را برده باشید. در صورت داشتن هرگونه نظر یا سوال درباره این مطلب یا تجربه مشابه اون رو در انتهای همین صفحه در قسمت دیدگاه ها قرار بدید. در کوتاه ترین زمان ممکن به اون ها پاسخ خواهم داد. اگر این مطلب براتون فید بود، اون رو به اشتراک بگذارید تا سایر دوستان هم بتوانند استفاده کنند. همینطور میتونید این مطلب را توی اینستاگرام با هشتگ #microelecom به اشتراک بگذارید و **پیج مایکروالکام** (@microelecom) رو هم منشن کنید.