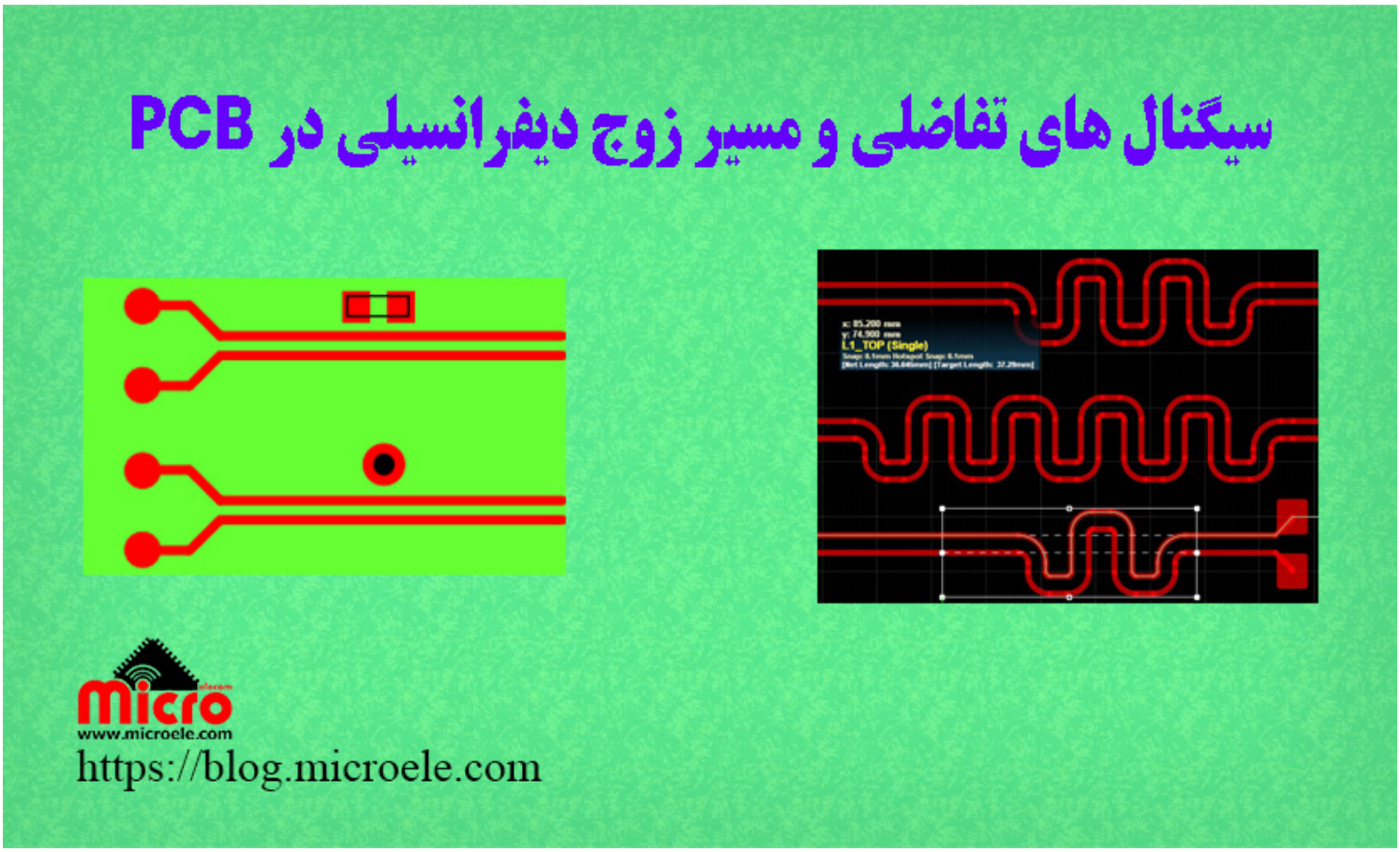
سیگنال های تفاضلی و مسیر زوج دیفرانسیلی در PCB



تاریخ انتشار۲۴ آذر, ۱۴۰۲ توسط سید حسین سلطانی

سلام خدمت همه شما مایکروالکامی 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.

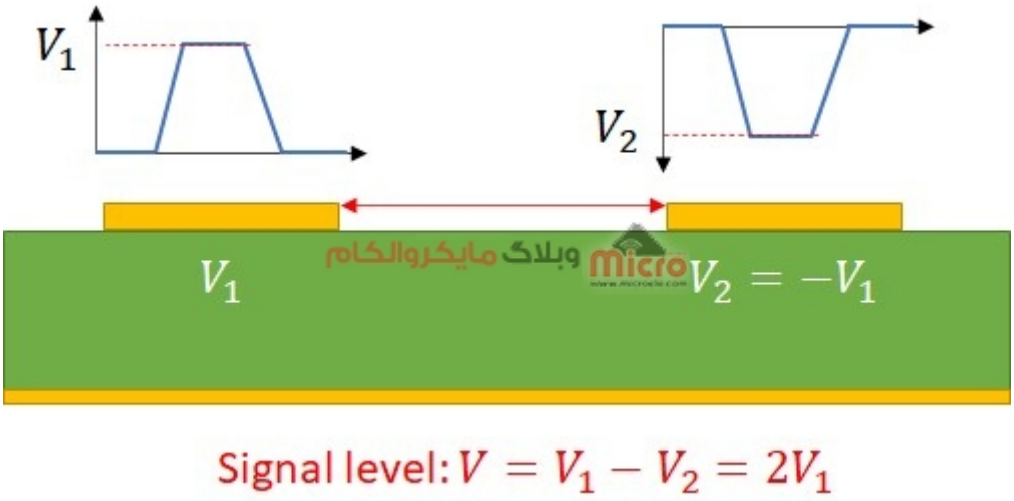
مقدمه

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 معمولا لبه سیگنال ها دارای زمان صعود یا Rise Time سریعی می‌باشند. بستر دیفرانسیلی اساسی ترین روش در طراحی های سرعت بالا می‌باشد. 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 درکنار 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 می‌شود. تفاوت بین مسیر دیجیتال استاندارد و سیگنالینگ دیفرانسیلی یا تفاضلی این است که در گیرنده سیگنال اصلی از دو سیگنال دریافتی بازسازی می‌شود.

در تصویر زیر نحوه سیگنالینگ در مسیر زوج دیفرانسیلی یا تفاضلی نمایش داده شده است. در این روش دو سیگال 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.



سطح سیگنال دیفرانسیلی

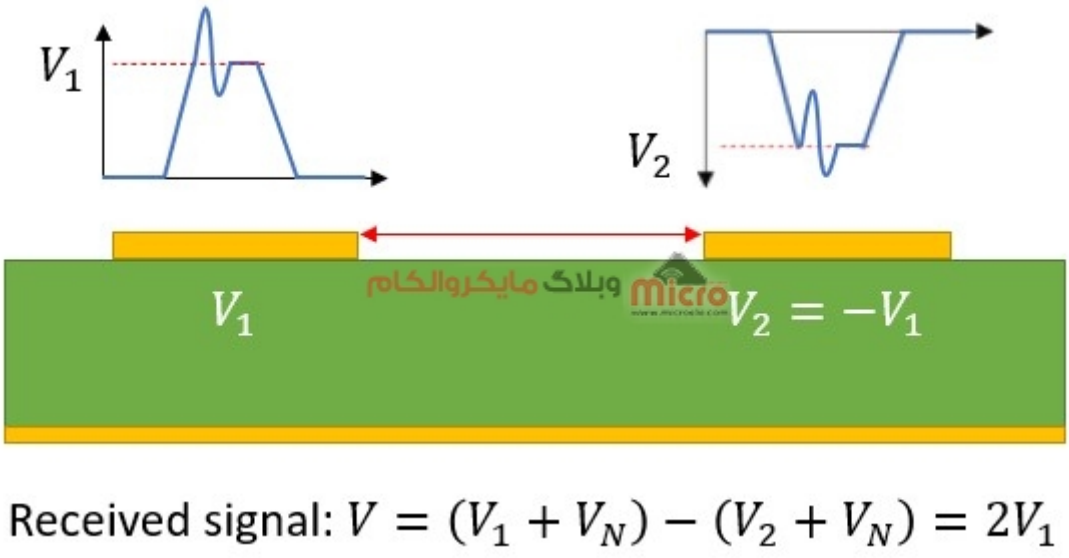
این روش از ارسال دیتا دیجیتال در پروتکل های سرعت بالا همانند USB و خطوط کلاک و دیتای DDR ها مرسوم بوده و یک استاندارد است. در جدول زیر مزایا و برخی از چالش های این روش سیگنالینگ بیان شده است. در ادامه به بررسی این موارد خواهیم پرداخت.

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

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 می‌باشد. 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.



حذف نویز مد مشترک در مسیر زوج تفاضلی یا زوج دیفرانسیلی

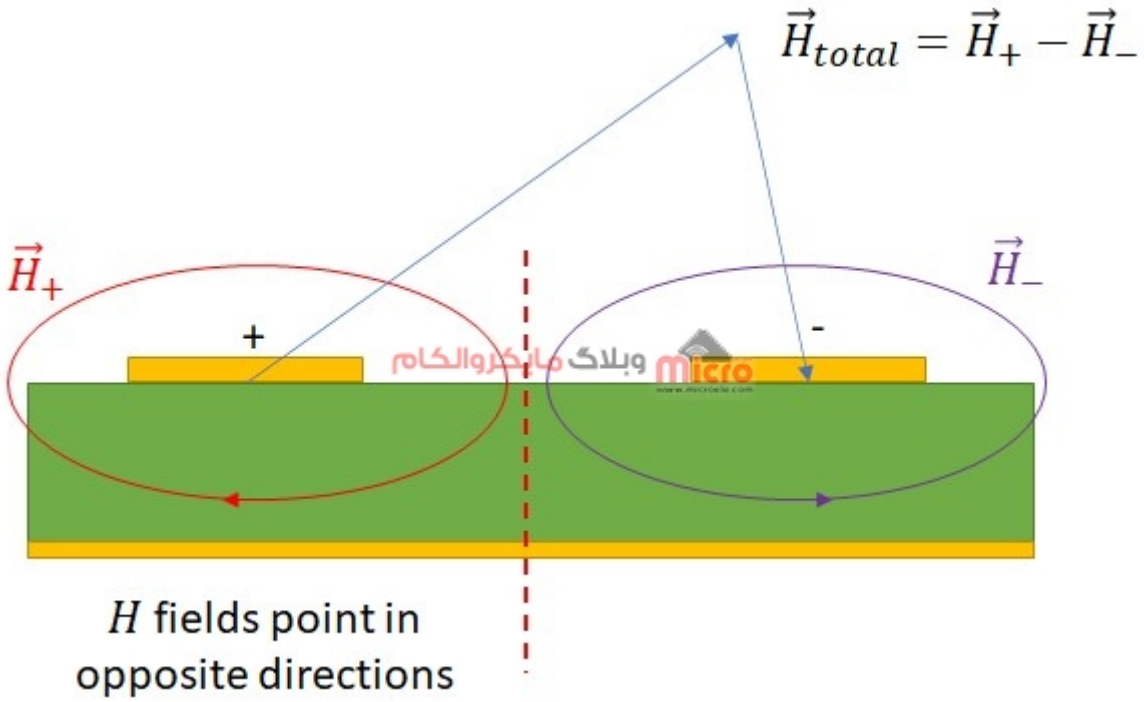
نکته ای که باید توجه داشت این است که باید روی هر مسیر، نویز یکسانی قرار بگیرد. بهرحال، این به معنی قابلیت مصونیت زوج دیفرانسیلی در مقابل crosstalk در PCB نیست. مثلا یک مسیر در فاصله خیلی کم نسبت به مسیر دیفرانسیلی می‌تواند باعث بروز crosstalk شود. این تداخل بصورت برابر در هر دو مسیر تفاضلی قرار نمی‌گیرد و در نتیجه نویز کاملا 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 مسیر های زوج دیفرانسیلی (زوج تفاضلی) نویز EMI تابشی یا تشعشعی کم آن است. از انجاکه که مسیر های دیفرانسیلی به یکدیگر نزدیک می‌باشند، میدان مغناطیسی هنگام سوئیچینگ برابر و عکس یکدیگر خواهند بود. تا زمانی که دو سیگنال دارای اندازه برابری باشند، میدان های 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 مسیر های دیفرانسیلی یا تفاضلی برای اطلاعات سرعت بالا خواهد بود.

پروتکل های سریال سرعت بالا (در حد گیگابیت بر ثانیه و بیشتر) دارای لبه های 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 می‌توانند باعث بروز مشکل شود.



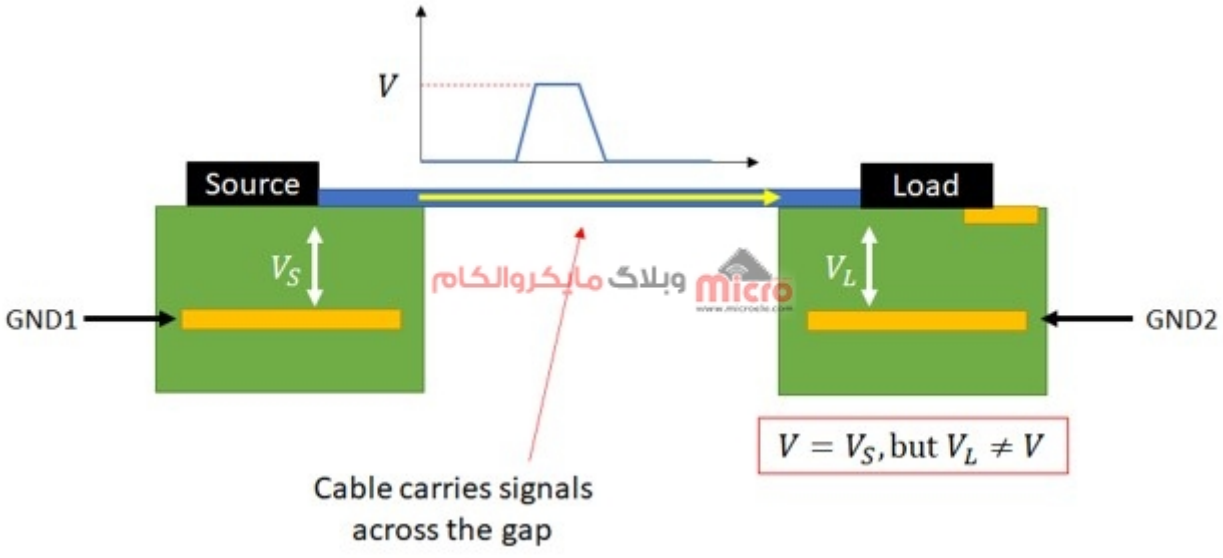
حذف میدان مغناطیسی ایجاد روی مسیر زوج دیفرانسیلی

با اینکه زوج تفاضلی (سیگنال دیفرانسیلی) ممکن است crosstalk کمتری در مسیر های تکی (single-end) نزدیک خود داشته باشد، اما می‌تواند 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 می‌شود قابلیت مصونیت آن در برابر آفست GND یا Ground خواهد بود. آفست زمین در AC یا DC را می‌توان به عنوان نویز مد مشترک در نظر گرفت. این یک اختلال در سیگنال است که می‌تواند هر طرف از زوج دیفرانسیلی را در فاز و اندازه یکسان تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین می‌تواند 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.



تاثیر *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 می‌شود، 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 می‌شود 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 می‌شود 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 بهمراه 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 دستورالعمل ها برای عدم مواجه 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.

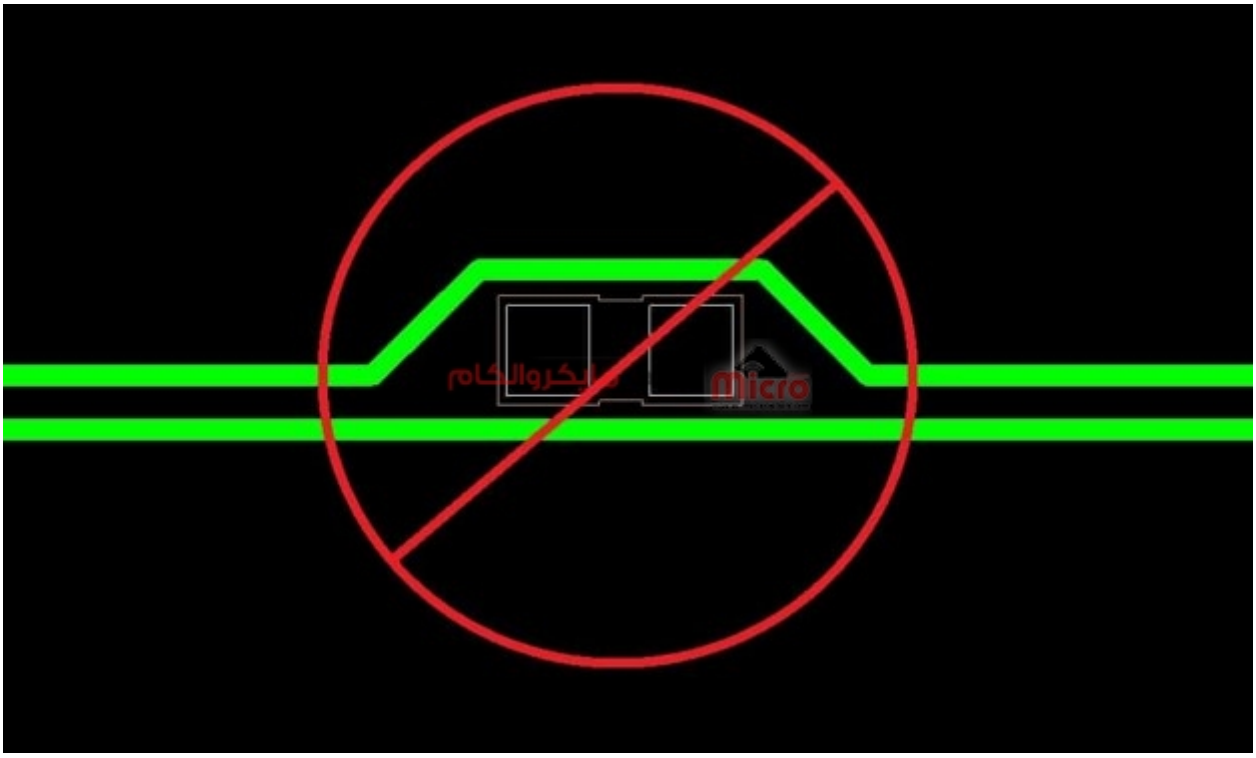
روتینگ زوج دیفرانسیلی همزمان

- 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 مسیر ها قرار گیرند.
- روتینگ در لایه داخلی برای حداقل کردن crosstalk مناسب بوده اما به معنی انتقال بین لایه ها از طریق وایا می‌باشد.
- زوج دیفرانسیلی نسبت به سایر مسیر ها باید فاصله داشته باشد. معمولا این کار با مشخص کردن فاصله ای به اندازه سه برابر پهنای مسیر (trace) لحاظ می‌شود.
- در صورت امکان روتینگ زوج دیفرانسیلی گسترده را در لایه های سیگنال مجاور قرار دهید که باعث کنترل بهتر crosstalk می‌شود.

متقارن بودن روتینگ بین دو مسیر

بهترین روتینگ زوج دیفرانسیلی زمانی است که trace ها بطور نزیک یکدیگر را منعکس کنند. برای این کار می‌توان 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 مسیر ها تا جای امکان یکدیگر را منعکس کنند.
- استفاده از پهنای برابر در طول روتینگ
- برابر بودن فاصله بین مسیر ها 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 می‌شود اما برابر بودن طول مسیر بسیار مهم تر می‌باشد.

نتیجه گیری

اصلی ترین کاربرد مسیر های دیفرانسیلی در برد های سرعت بالا می‌باشد. کاربردهایی نظریر USB و HDMI یا سیگنال های کلاک و دیتا در DDR از این دست موارد می‌باشند. 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 می‌باشد. 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.