



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل و شبیه سازی خطوط انتقال تزویج شده متعامد و اثر لبه در مدارهای چند لایه

PCB با در نظر گرفتن یک مدل Dispersion

علی ارشدی

استاد راهنما: دکتر احمد چلداوی

استاد مشاور: دکتر همایون عریضی

اردیبهشت ماه ۱۳۸۶

Filename: Onvan.docx
Directory: C:\Documents and Settings\Ali\My Documents
Template: C:\Documents and Settings\Ali\Application
Data\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Title:
Subject:
Author: Ali
Keywords:
Comments:
Creation Date: ق.ظ ٠٩:٥٨:٠٠ ١٦/٠٦/٢٠٠٧
Change Number: 3
Last Saved On: ق.ظ ١٠:٠٩:٠٠ ١٦/٠٦/٢٠٠٧
Last Saved By: Ali
Total Editing Time: 4 Minutes
Last Printed On: ق.ظ ١١:٤٧:٠٠ ١٦/٠٦/٢٠٠٧
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 1
Number of Words: 42 (approx.)
Number of Characters: 240 (approx.)

سپاسگزاری:

بسیار دوستان و اساتید در این مسیر یار و راهنمای من بوده اند که همیشه قدردان زحماتشان هستم؛ اما در آغاز سخن باید سپاسگزار مهربانی های مادر و پدری باشم که هیچ اتفاق خوبی را جدا از باران محبتشان متصور نیستم.

من چه در پای تو ریزم که پسند تو بود
سر و جان را نتوان گفتم که مقداری هست

بر خود لازم می دانم از استاد راهنمای خود آقای دکتر احمد چلداوی تشکر کنم که اگر نبود حساسیت فراوان و سختگیری هایشان، این پروژه به پیش نمی رفت. به ویژه از راهنمایی های ایشان در چاپ دو مقاله که در راستای همین پروژه منتشر شد، ممنون هستم.

در پایان نیز از دو دوست مهربان، پیام نیری و عماد آل ناصر که همیشه و در هر حال یار من بودند، تشکر می کنم.

چکیده:

در این پایان نامه سعی کرده ایم برای یک سری از ساختارهای خطوط انتقال که عموماً با روش های عددی یا با استفاده از نرم افزارهای full wave حل می شوند، مدلی ساده و در عین حال دقیق ارائه دهیم که می تواند رفتار مدل فیزیکی را از دید پایانه ها به خوبی پیش بینی کند.

این ساختارها شامل خطوط انتقال مایکرو استریپی می شوند که در بردهای PCB چند لایه به صورت عمود بر هم قرار می گیرند. خطوط مایکرو استریپ عمود بر هم به دلیل کوپلینگ کمتری که نسبت به خطوط موازی دارند، در مدارهای چند لایه به وفور استفاده می شوند. با این حال به دلیل متغیر بودن میزان کوپلینگ در طول خط، پیچیدگی تحلیل افزایش می یابد. زمانی که خطوط انتقال عمود بر هم توسط تکنیک excess charge بررسی می شوند، وابستگی کوپلینگ خازنی به فاصله از منطقه cross به خوبی نشان داده می شود.

علاوه بر این خطوط مایکرو استریپی که به گوشه برد منتقل شده اند (EMTL) نیز مورد بررسی قرار گرفته اند و کولپینگ این خطوط در مدارهای چند لایه نیز مدل شده است. این ساختارها در مقایسه با مایکرو استریپ های کلاسیک انرژی بیشتری را به فضای بیرون تابش می کنند.

ساختارهای فیزیکی مورد بحث با استفاده از مدل های موجود خطوط انتقال کلاسیک و المان های lumped مدل شده اند و دقت مدل در مقایسه با حل full wave نشان داده شده است. ساختارهایی که با نرم افزار HFSS در زمانی حدود ۱۰ ساعت حل می شود، با استفاده از مدل پیشنهادی در محیط Hspice تنها نیاز به اجرای فرمان حل مدار دارد. همچنین تجهیزات کامپیوتری لازم برای به دست آوردن و حل مدل به هیچ وجه قابل مقایسه با RAM و سرعت بالای processor مورد نیاز نرم افزارهای full wave نیست.

در تمامی مسایلی که بررسی شده اند، ابتدا مدل اولیه ای که با استفاده از تئوری های مطرح شده پیشنهاد می شود، به دست می آید. سپس با تغییرات کوچکی که در مدل اولیه داده می شود، مدل بهینه ای که بیشترین میزان تطابق را با حل full wave داشته باشد، به دست می آوریم. ملاحظه می شود که اختلاف مدل اولیه و بهینه بسیار اندک و قابل صرف نظر است. جواب های مدل و حل تمام موج تا حدود ۷ گیگا هرتز تطابق بسیار خوبی نشان می دهند.

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۶	فصل اول: پارامترهای مختلف خطوط انتقال
۶	۱-۱. ثابت دی الکتریک مؤثر
۷	۲-۱. امپدانس مشخصه
۹	۳-۱. خازن واحد طول
۱۱	۴-۱. سلف واحد طول
۱۲	فصل دوم: خطوط انتقال متعامد چند لایه
۱۳	۱-۲. خطوط انتقال عمود بر هم در دو لایه مختلف
۱۴	۲-۲. مدل خطوط انتقال عمود بر هم
۱۵	۱-۲-۲. خازن زمین (C_g)
۱۵	۲-۲-۲. خازن کوپلینگ (C_{12})
۱۷	۳-۲-۲. سلف ناحیه cross
۱۷	۳-۲. دو زوج نوار عمود در دو لایه مختلف با دو صفحه زمین
۱۷	۱-۳-۲. اندازه خازن کوپلاژ
۲۰	۲-۳-۲. اندازه خازن زمین
۲۰	۳-۳-۲. اندازه سلف های ناحیه cross
۲۱	۴-۲. شبیه سازی و مقایسه با حل Microwave Office
۲۳	۵-۲. دو زوج نوار هم صفحه عمود در دو لایه مختلف با دو صفحه زمین
۳۱	فصل سوم: خطوط انتقال روی لبه صفحه زمین (EMTL)
۳۲	۱-۳. معرفی ساختار EMTL
۳۳	۲-۳. مدل مداری EMTL
۳۴	۱-۲-۳. خازن واحد طول
۳۵	۲-۲-۳. سلف واحد طول
۳۶	۳-۲-۳. مقاومت تشعشی
۳۸	۳-۳. مدل بدون مقاومت تشعشی
۴۱	۴-۳. مدل با مقاومت تشعشی
۴۶	۵-۳. دو EMTL عمود بر هم در دو لایه مختلف

۵۳	فصل چهارم: تحلیل FD خازن و سلف EMTL
۵۴	۱-۴. مرزهای ساختار
۵۵	۲-۴. معادلات حاکم بر ساختار
۵۶	۳-۴. مقایسه نتایج FD و فرمول پیشنهادی
۵۷	نتیجه گیری
۵۹	مراجع

فهرست اشکال

۱۰	شکل ۱-۱. نمایش یک خط انتقال استریپ و اجزای خازن واحد طول آن
۱۳	شکل ۱-۲. نمایش دو بعدی دو نوار عمود بر هم (الف) نمای جانبی (ب) نمای بالایی
۱۴	شکل ۲-۲. مدل پیشنهادی برای دو نوار عمود بر هم
۱۶	شکل ۳-۲. توزیع میدان و اثر پهنای مؤثر نوار
۱۸	شکل ۴-۲. نمودار تغییرات $\mathcal{E}_{eff}(f)$
۱۸	شکل ۵-۲. نمودار تغییرات $w_{eff}(f)$
۱۹	شکل ۶-۲. نمودار تغییرات C_{12}
۱۹	شکل ۷-۲. نمودار تغییرات C_{12} در بازه فرکانسی مورد نظر
۲۲	شکل ۸-۲. مقایسه نتایج مدل پیشنهادی و ساختار فیزیکی
۲۳	شکل ۹-۲. ساختار سه بعدی دو زوج نوار هم صفحه عمود بر هم
۲۴	شکل ۱۰-۲. مدل دو زوج نوار هم صفحه عمود بر هم
۲۵	شکل ۱۱-۲. مقایسه مدل و حل تمام موج دو زوج نوار هم صفحه عمود بر هم
۲۷	شکل ۱۲-۲. خطای پارامترهای اسکترینگ مدل
۲۸	شکل ۱۳-۲. مقایسه مدل و حل تمام موج دو زوج نوار هم صفحه عمود بر هم تا فرکانس ۳۰ GHz
۳۳	شکل ۱-۳. ساختار EMTL
۳۵	شکل ۲-۳. اجزای خازن واحد طول یک خط ریزنوار
۴۱	شکل ۳-۳. مقایسه مدل بدون مقاومت تشعشی با حل HFSS برای نسبت های w/h
۴۲	شکل ۴-۳. نمودار مقاومت تشعشی
۴۵	شکل ۵-۳. مقایسه مدل با مقاومت تشعشی و حل HFSS برای نسبت های w/h
۴۷	شکل ۶-۳. EMTL تزویج شده عمود بر هم
۴۷	شکل ۷-۳. مدل مداری EMTL تزویج شده عمود بر هم
۵۱	شکل ۸-۳. مقایسه نتایج حل HFSS و مدل پیشنهادی بهینه
۵۵	شکل ۱-۴. ساختار EMTL در تحلیل FD

فهرست جداول

۴۶	جدول ۳-۱. خازن و سلف واحد طول محاسبه شده و بهینه
۵۶	جدول ۴-۱. خازن واحد طول تحلیل FD و فرمول

Filename: feh.doc
Directory: C:\Documents and Settings\Ali\My Documents
Template: C:\Documents and Settings\Ali\Application
Data\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Title:
Subject:
Author: maleki
Keywords:
Comments:
Creation Date: ۱۲:۳۰:۰۰ ۰۳/۰۱/۲۰۰۷ ب.ظ
Change Number: 29
Last Saved On: ۱۰:۱۶:۰۰ ۱۶/۰۶/۲۰۰۷ ق.ظ
Last Saved By: Ali
Total Editing Time: 439 Minutes
Last Printed On: ۱۱:۴۷:۰۰ ۱۶/۰۶/۲۰۰۷ ق.ظ
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 7
Number of Words: 1,361 (approx.)
Number of Characters: 7,761 (approx.)

مقدمه:

خطوط انتقال ریزنوار^۱ طی ۴۰ سال اخیر به طور گسترده در ساخت انواع ادوات میکروویو و تجهیزات فرکانس بالا مورد توجه قرار گرفته اند. طی این سال ها تلاش های فراوانی به منظور تحلیل و به دست آوردن مشخصات الکتریکی خطوط انتقال ریزنوار منفرد و تزویج شده انجام گرفته است. تقاضای روز افزون برای افزایش سرعت ساعت سیستم در تکنولوژی مدارهای مجتمع، بررسی خطوط انتقال چند رسانایی^۲ را به امری حیاتی تبدیل کرده است. خطوط انتقال ریزنوار علاوه بر استفاده در ادوات میکروویو مانند فیلترهای کوپل شده و کوپلرهای جهتی^۳، کاربردهای فراوانی در مدارهای مجتمع دیجیتال سرعت بالا دارند.

ابتدا به طور خلاصه گزینه ای از کارهای انجام شده مربوط به خطوط انتقال ریزنوار و نوار ساده و چند رسانایی را بررسی می کنیم. خازن خط ریزنوار ساده غیر همگن^۴ با استفاده از روش نگاشت همدیس^۵ توسط Wheeler محاسبه شده است [۱]. Wan از این روش برای به دست آوردن پارامترهای quasi-static خط ریزنوار تزویج شده موازی استفاده کرده

¹ Microstrip

² Multiconductor

³ Directional coupler

⁴ Homogeneous

⁵ Conformal mapping

است [۲]. مقالات متعددی به بررسی خطوط ریزنوار با روش spectral domain و استفاده از تکنیک Galerkin پرداخته اند. اما این روش های عددی علاوه بر این که بسیار زمانبر می باشند، یک فرمول بسته برای حل و طراحی ساختارهای جدید ارائه نمی دهند. فقط برای بعضی ساختارهای خاص خطوط انتقال ریزنوار حل های تحلیلی یا نیمه تحلیلی ارائه شده است [۵]-[۳]. پارامترهای خطوط انتقال ریزنوار ساده و تزویج شده توسط Weiss و Bryant با روش ممان و تابع گرین به دست آمده اند [۶]. تحلیل این ساختارها توسط Yamashita و Mitra نیز با روش variational انجام شده است [۷]. همچنین Itoh و Mitra ساختارهای مختلف صفحه ای^۱ را با روش spectral domain بررسی و تحلیل کرده اند [۸].

با روش Carleman Vekua یک جواب تحلیلی برای خطوط ریزنوار چاپی shield شده توسط Fikioris *et al.* به دست آمده است [۹]. یک روش تحلیلی توسط Drake *et al.* برای تعیین ماتریس خازن خطوط انتقال صفحه ای و استوانه ای ارائه شده است [۱۰].

حل تحلیلی برای ماتریس خازن ریزنوار تزویج شده موازی در مقاله Homentcovschi و Oprea با تبدیل معادلات انتگرالی خط انتقال به مسئله مقدار مرزی ولترا^۲، ارائه شده است [۱۱]. این جواب به صورت یک سری بینهایت ماتریسی که با سرعت خوبی همگرا می شود، به دست آمده است. مقاله فوق از آن جهت دارای اهمیت است که تمام ساختارهای صفحه ای ریزنوار تزویج شده موازی را پوشش می دهد. در سری به دست آمده از توابع بسط استفاده شده است.

قانون incremental inductance که توسط Wheeler برای تحلیل خطوط انتقال quasi-TEM و TEM بدون تلفات ارائه شده است [۱۲]، توسط Gentili و Melloni برای خطوط انتقال تزویج شده quasi-TEM با تلفات تعمیم یافته است [۱۳]. در این مقاله نشان داده شده که اگر چه مقادیر مختلفی برای امپدانس مشخصه مودال^۳ بر حسب تعریف آن (توان-جریان، توان-ولتاژ و ولتاژ-جریان) به دست می آید، اما این امپدانس مشخصه مودال توان-جریان است که به طور مستقیم با تلفات سیستم مرتبط است.

¹ Planar

² Volterra boundary-value

³ Modal characteristic impedance

تا اینجا تاریخچه کارهای انجام شده در زمینه خطوط انتقال ریزنوار ساده و تزویج شده موازی به اختصار بیان شد. نوع دیگری از تزویج که در مدارهای مجتمع مورد توجه است، تزویج متعامد^۱ می باشد. برای کاهش حجم ادوات میکروویو، از مدارهای مجتمع چند لایه استفاده می شود. یک روش برای کاهش انتقال سیگنال از یک لایه به لایه دیگر، قرار دادن صفحه زمین بین هر دو لایه است که خود باعث بزرگ شدن مدار می شود. روش دیگر ساخت خطوط انتقال در دو لایه مجاور به صورت متعامد است. این روش در مدارهای چند لایه کاربرد دارد و باعث کم شدن تزویج و کاهش انتقال سیگنال از یک لایه به لایه دیگر می شود. در نتیجه با این تکنیک حجم مدار به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد.

تزویج متعامد علیرغم استفاده ای که در انواع مدارهای چند لایه دارد، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. خطوط انتقال ریزنوار و نوار متقاطع در حوزه زمان و فرکانس بررسی می شوند. تحلیل استاتیک خطوط انتقال متعامد در مدارهای چند لایه با استفاده از method of lines با دقت خوبی انجام یافته است [۱۴]. همچنین تحلیل فرکانسی دو لایه k تایی نوار متقاطع در [۱۵] ارائه شده است. این مقاله اثر یک منبع ولتاژ با زمان صعود^۲ کوتاه در ورودی یکی از خطوط نوار را در خروجی نوار بررسی کرده است. این مسأله ابتدا در حوزه فرکانس برای معادل های مداری موده های زوج و فرد حل شده و سپس با استفاده از خاصیت جمع آثار^۳ و تبدیل عکس فوریه، خروجی در حوزه زمان به دست آمده است.

خطوط انتقال ریزنوار متعامد با استفاده از تکنیک بار اضافی^۴ در مرجع [۱۶] به طور تحلیلی بررسی شده اند. ابتدا با استفاده از تابع گرین سیستم، چهار معادله انتگرالی کوپل شده که پتانسیل الکتریکی را در نقاط مختلف فضا می دهد و توصیف کننده خازن های ناحیه cross هستند، به دست می آید. سپس معادلات حاصل با استفاده از روش عددی ممان^۵ حل می شوند. این خازن ها تابع فاصله از مرکز ناحیه cross می باشند و فقط در ناحیه ای به طول تقریبی پنج برابر عرض ناحیه cross دارای مقدار غیر صفر هستند. بار اضافی توصیف کننده تغییر در چگالی بار روی خطوط انتقال به دلیل تزویج

¹ Orthogonal coupling

² Rise time

³ Superposition

⁴ Excess charge

⁵ Moment Method

در ناحیه cross می باشد. تکنیک بار اضافی برای بررسی انواع ناپیوستگی ها در خطوط انتقال ریزنوار مانند gap و مدار باز استفاده شده است [۲۰]-[۱۷].

از آنجا که هنوز بررسی خطوط انتقال متعامد جای کار فراوان دارد، یکی از اهداف اصلی این پروژه معرفی مدلی ساده و با دقت مناسب برای چنین ساختارهایی بوده است. دو مقاله با نظارت و سرپرستی آقای دکتر چلداوی در همین زمینه منتشر شده است که خطوط انتقال ریزنوار و نوار متعامد را از نقطه نظر پایانه ها مورد توجه قرار می دهد و مدلی ساده ارائه می کند که پارامترهای اسکترینگ^۱ ساختار را با دقت مناسب و در زمان بسیار کم (در مقایسه با حل تمام موج^۲) به دست می آورد [۲۲]-[۲۱]. این مدل معادل با قرار دادن عناصر فشرده^۳ در ناحیه cross از پیچیدگی های روش بار اضافی اجتناب می کند و با این فرض که تمام تزویج در این ناحیه اتفاق می افتد، در محدوده فرکانسی تا چند گیگا هرتز جواب را با دقت قابل قبولی به دست می آورد.

خطوط انتقالی که در متون درسی مطالعه می شوند، همه دارای صفحه زمین بینهایت هستند. این خطوط چه به صورت ریزنوار و چه نوار، به طور گسترده و با دقت های بسیار خوب در حوزه زمان و فرکانس تحلیل شده اند و پارامترهای مختلف آنها به دست آمده است [۲۶]-[۲۳]. در ساخت تجهیزات میکروویو خصوصاً در مدارهای مجتمع که دارای صفحه زمین با ابعاد مشخص و محدود می باشند، ممکن است خطوط انتقال در وسط صفحه زمین^۴ قرار نگیرند و در نتیجه از حالت ایده آل خارج شوند. این موضوع تا به امروز چندان مورد توجه محققان نبوده است. در این پروژه سعی شده است تا با معرفی یک مدل بهبود یافته^۵ همراه با یک مقاومت تشعشعی که نشان دهنده خروج انرژی از سیستم است، پارامترهای اسکترینگ مدل را تا حد امکان به پارامترهای ساختار اصلی که از حل تمام موج به دست می آیند، نزدیک کنیم. واضح است که خازن و سلف این ساختار متفاوت با خطوط ایده آل است.

¹ Scattering parameters

² Full wave

³ Lumped elements

⁴ Ground plane

⁵ Improved model

وقتی یک نوار روی لبه صفحه زمین قرار می گیرد، مقداری تشعشع از لبه صفحه زمین به وجود می آید؛ یعنی انرژی سیستم کاهش می یابد که باید در به دست آوردن پارامترهای مختلف ساختار مورد توجه قرار گیرد. این ساختار جدید (EMTL) Edged Microstrip Transmission Line نامیده می شود و مطالعات انجام شده در این زمینه در قالب مقاله ای ارائه گردید که پس از ارزیابی پذیرفته و چاپ شد [۲۷].

فصل اول: پارامترهای مختلف خطوط انتقال

مقدمه

در فصل اول مروری کوتاه و اجمالی خواهیم داشت بر پارامترهای مختلف خطوط انتقال مانند امپدانس مشخصه خط، خازن و سلف واحد طول، ثابت دی الکتریک مؤثر و تغییرات آنها با فرکانس و عموماً آنچه که در فصول آینده به عنوان پیش نیاز به آنها رجوع خواهد شد. تعریف و فرمول های مربوط به این پارامترها در اکثر کتاب های الکترومغناطیس پیشرفته وجود دارد [۲۶]-[۲۳].

۱-۱. ثابت دی الکتریک مؤثر:

واضح است که در خطوط انتقال ریزنوار، به دلیل اثر خازن های fringing مقدار ثابت دی الکتریک با ϵ_r متفاوت خواهد بود. از این رو ثابت دی الکتریک مؤثر به صورت نسبت C/C_0 تعریف می شود که در آن C_0 خازن واحد طول خط بدون دی الکتریک و C مقدار این خازن در حضور دی الکتریک ϵ_r است. فرمول های فراوانی در مراجع مختلف برای آن ارائه شده است.

اگر نسبت w/h معلوم و مقدار آن بیشتر از 1.3 باشد، داریم [۲۳]:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w}\right)^{-0.555} \quad (\text{الف.۱.۱})$$

همچنین برای همین مقادیر w/h که به معنای Ω $Z_o < (63 - 2\epsilon_r)$ هم می باشد، در صورت معلوم بودن Z_o ،

ثابت دی الکتریک مؤثر از فرمول های زیر به دست می آید :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r}{0.96 + \epsilon_r (0.109 - 0.04\epsilon_r) \{\log(10 + Z_o) - 1\}} \quad (\text{ب.۱.۱})$$

ثابت دی الکتریک مؤثر برای نوار های باریک (یعنی $w/h < 1.3$ یا $\Omega > (63 - 2\epsilon_r)$) از فرمول زیر به

دست می آید [۲۳] :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2H'} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \right\}^{-2} \quad (\text{الف.۲.۱})$$

که در آن بنا به معلوم بودن w/h یا Z_o مقدار H' به صورت زیر محاسبه می شود.

$$H' = \frac{Z_o \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \quad (\text{ب.۲.۱})$$

$$H' = \ln \left(4 \frac{h}{w} + \sqrt{16 \left(\frac{h}{w} \right)^2 + 2} \right) \quad (\text{پ.۲.۱})$$

۲-۱. امپدانس مشخصه:

هر خط انتقال که آن را بتوان به صورت TEM تحلیل کرد، دارای یک امپدانس مشخصه است. این پارامتر نقش

مهمی در تطبیق خطوط انتقال دارد. فرمول های متعددی در منابع مختلف ارائه شده که به بعضی از آنها اشاره می شود.

برای نوار های باریک ($w/h < 1.3$) [۲۳] :

$$Z_o = \frac{119.9}{\sqrt{2(\epsilon_r + 1)}} \left[\ln 8 \frac{h}{w} + \frac{1}{8} \left(\frac{w}{2h} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right\} \right] \quad (\text{الف.۳.۱})$$

برای نوار های پهن ($w/h > 1.3$):

$$Z_o = \frac{119.9\pi}{2\sqrt{\epsilon_r}} \left[\frac{w}{2h} + \ln \frac{4}{\pi} + \frac{\ln(e\pi^2/16)}{2\pi} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \right) + \frac{\epsilon_r + 1}{2\pi\epsilon_r} \left\{ \ln \frac{\pi e}{2} + \ln \left(\frac{w}{2h} + 0.94 \right) \right\} \right]^{-1} \quad (\text{ب.۳.۱})$$

در مدارهای ریزنوار که برای توان های متوسط و بالاتر طراحی می شوند، ضخامت نوار دارای اهمیت زیادی خواهد

بود. اگر فرض کنیم که نوار دارای ضخامت محدود t باشد، از فرمول های زیر استفاده می شود [۲۳]:

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}(t)}} \ln \left(8 \frac{h}{w_e} + 0.25 \frac{w_e}{h} \right) \quad w/h \leq 1 \quad (\text{الف.۴.۱})$$

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}(t)}} \left\{ \frac{w_e}{h} + 1.393 + 0.667 \left(\frac{w_e}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad w/h \geq 1 \quad (\text{ب.۴.۱})$$

که در فرمول های فوق داریم:

$$\frac{w_e}{h} = \frac{w}{h} + \frac{1.25t}{\pi h} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right) \quad w/h \leq 1/2\pi \quad (\text{الف.۵.۱})$$

$$\frac{w_e}{h} = \frac{w}{h} + \frac{1.25t}{\pi h} \left(1 + \ln \frac{2h}{t} \right) \quad w/h \geq 1/2\pi \quad (\text{ب.۵.۱})$$

همچنین برای محاسبه مقدار $\epsilon_{eff}(t)$ مقدار $\Delta\epsilon_{eff}(t)$ که در زیر داده می شود باید از مقدار ϵ_{eff} که در بخش ۱-۱ داده

شده است، کم شود [۲۳].

$$\Delta\epsilon_{eff}(t) = \frac{(\epsilon_r - 1)t/h}{4.6\sqrt{w/h}} \quad (۶.۱)$$

علاوه بر اینها می توان با استفاده از نگاشت همدیس^۱، امپدانس مشخصه خط را بر حسب توابع بیضوی که به صورت

تحلیلی و تقریبی فرمول های آنها در منابع مختلف موجود است، نشان داد. در صورتی که بتوان از ضخامت نوار صرفنظر

کرد، برای امپدانس مشخصه خط انتقال نوار داریم [۲۵]:

^۱ Conformal mapping

$$Z_o \sqrt{\epsilon_r} = 30\pi \left[\frac{K(k')}{K(k)} \right] \quad (7.1)$$

۳-۱. خازن واحد طول:

خازن واحد طول یکی از مشخصات مهم خطوط انتقال است. در فصل های آینده که به بحث خطوط انتقال عمود بر هم می پردازیم، خواهیم دید که بیشتر تزویج بین خطوط، دارای اثر خازنی است. از آنجا که بررسی خطوط به صورت الکترواستاتیک است، با دانستن خازن واحد طول تمام مشخصات یک خط انتقال به دست می آیند؛ به این معنی که امپدانس مشخصه خط را در فرم خازنی می توان به صورت $Z_o = \frac{1}{c\sqrt{C_o C}}$ و ثابت دی الکتریک مؤثر را به شکل $\epsilon_{eff} = C/C_o$ نوشت که در آن C_o خازن واحد طول خط بدون دی الکتریک و C مقدار آن در حضور دی الکتریک است. بنابراین استفاده از فرمول های بسته دقیقی که بیان کننده خازن واحد طول هستند، اهمیت فراوانی در تحلیل سریع خطوط انتقال دارند.

فرمولی که برای محاسبه خازن واحد طول در این تحقیق استفاده شده، با فرض TEM بودن مود انتشار که معادل با پایین بودن فرکانس سیستم است، به دست آمده است [۲۶]. در این حل برای به دست آوردن توزیع بار بر روی نوار از روش ممان^۱ با تابع پایه^۲ پالس با اندازه واحد استفاده شده است. بنابراین خازن واحد طول ریزنوار از فرمول زیر به دست آمده است [۲۶]:

$$C = \frac{\left[(1 + \epsilon_g)^2 / 4\epsilon_g \right] C_a(H_e)}{1 + C_a(H_e) \sum_{m=1}^M \eta^m \frac{1}{C_a[(m+1)H_e]}} \quad (8.1)$$

¹ Moment method

² Basis function

در فرمول فوق $H_e = \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_y}} H$ ، ارتفاع معادل دی الکتریک، $\eta = \frac{1 - \epsilon_g}{1 + \epsilon_g}$ و $\epsilon_g = \sqrt{\epsilon_r \epsilon_y}$ که در اینجا ϵ_y ثابت

دی الکتریک در راستای y و ϵ_r ثابت دی الکتریک در راستای x و z است. همچنین C_a خازن واحد طول میکرواستریپ

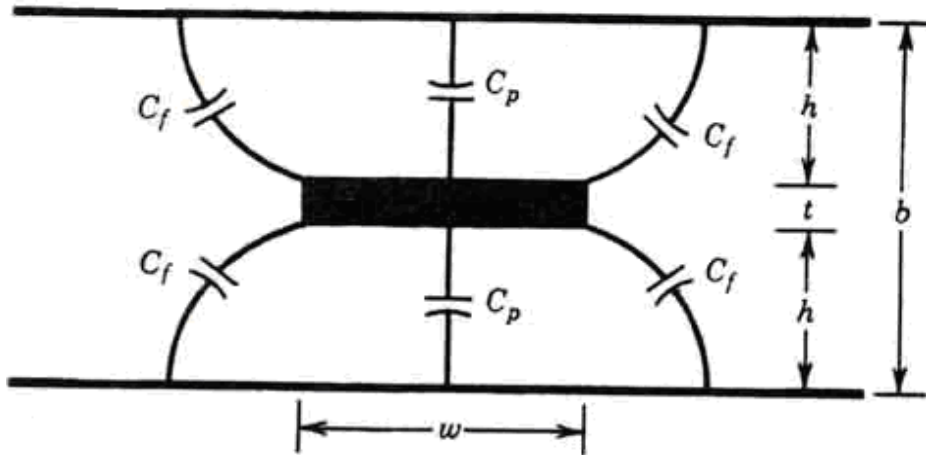
با دی الکتریک هوا است که از فرمول های زیر به دست می آید [۲۶]:

$$C_a = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right)} \quad \frac{w}{h} \leq 1 \quad (الف.۹.۱)$$

$$C_a = \epsilon_0 \left[\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1.444\right) \right] \quad \frac{w}{h} > 1 \quad (ب.۹.۱)$$

با استفاده از تعریف خازن های fringing و خازن اصلی خط نیز می توان تقریبی از خازن واحد طول خطوط را به

دست آورد. اجزای تشکیل دهنده آن در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱. نمایش یک خط انتقال و اجزای خازن واحد طول آن

با توجه به شکل ۱-۱ داریم [۲۵]:

$$C_p = \epsilon \frac{2w}{b-t} \quad (۱۰.۱)$$

$$C_f = \epsilon \frac{1}{\pi} (2 \ln 2) = 0.4413\epsilon \quad (۱۱.۱)$$