خطوط انتقال مخابراتی

سلماسادات میرهادی

فهرست مطالب

- مقدمه ای بر خطوط انتقال (تاریخچه و معرفی انواع خطوط انتقال مخابراتی)
- معادلات اساسی خطوط انتقال (معادلات تلگرافیستها)
- پارامترهای مهم یک خط انتقال (امپدانس مشخصه، ثابت انتشار، ثابت فاز، ثابت تضعیف و...)
- امواج ساکن، متحرک و کاربرد آنها
- نمودار اسمیت
- تطبیق امپدانس با استفاده از نمودار اسمیت

منابع

1. John D Ryder, “Networks lines and fields”, Prentice Hall of India, New Delhi, 2005

REFERENCES

2. William H Hayt and Jr John A Buck, “Engineering Electromagnetics” Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi, 2008

3. David K Cheng, “Field and Wave Electromagnetics”, Pearson Education Inc, Delhi, 2004

4. John D Kraus and Daniel A Fleisch, “Electromagnetics with Applications”, Mc Graw Hill Book Co,2005

5. GSN Raju, “Electromagnetic Field Theory and Transmission Lines”, Pearson Education, 2005

6. Bhag Singh Guru and HR Hiziroglu, “Electromagnetic Field Theory Fundamentals”, Vikas Publishing House, New Delhi, 2001.

۷. خطوط انتقال مخابراتی (جلد اول-خطوط غیر فعال)- دکتر عبدی پور

ارزشیابی

- حضور در کلاس، ۲ نمره
- امتحان میان ترم، ۶ نمره
- امتحان پایان ترم، ۱۲ نمره

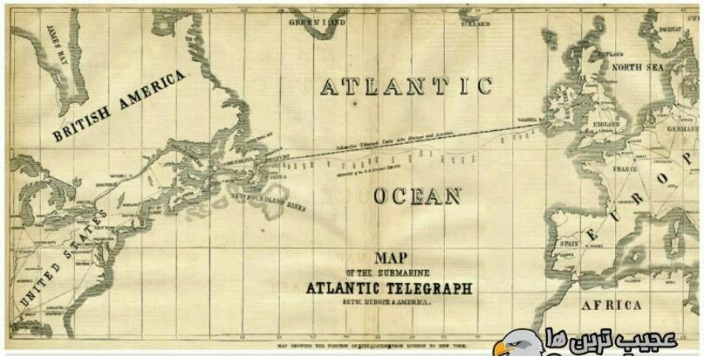
مقدمه ای بر خطوط انتقال

- تعریف: برای انتقال انرژی (امواج الکترومغناطیسی و یا امواج آکوستیک) از یک نقطه به نقطه دیگر از خطوط انتقال استفاده میشود.
- خطوط انتقال قدرت الکتریکی در فرکانس پائین

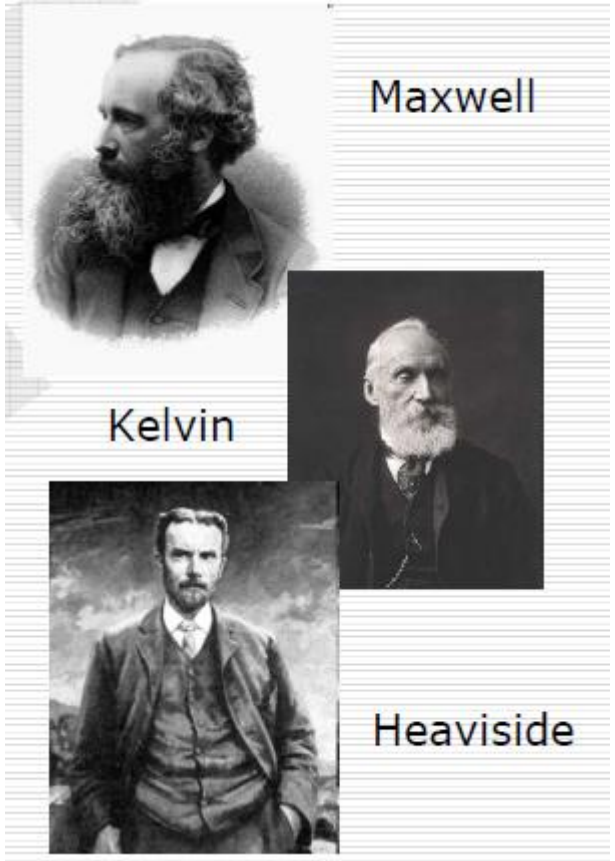
- خطوط انتقال مخابراتی: انتقال سیگنالهای تلفنی، انتقال دیتا از کامپیوترها در شبکه های کامپیوتری، انتقال سیگنالها از فرستنده تا آنتن ارسال و یا از آنتن دریافتی تا گیرنده و ....

تاریخچه

- اولین خط انتقال مورد استفاده در سال ۱۸۵۸، کابل تلگراف transatlantic بود که زیر اقیانوس اطلس با مشکلات بسیار قرار گرفت و قاره آمریکا به اروپا را به هم متصل میکرد.
- چند روز بعد از اجرای موفقیت آمیز این خط، به دلیل استفاده از ولتاژ بالا در یک طرف خط برای داشتن سرعت بیشتر انتقال دیتا، عایق خط از بین رفت.



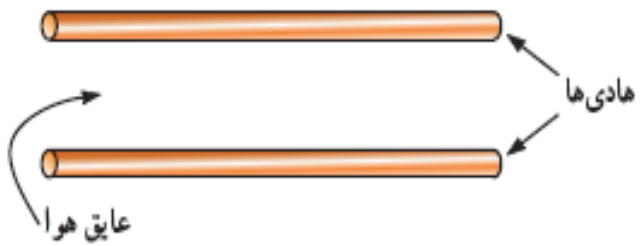
تاریخچه



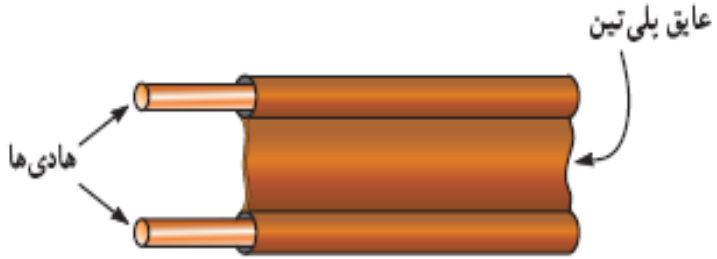
- استخراج مدل ریاضی تحلیل خطوط انتقال توسط سه دانشمند به نام ماکسول، کلوین، و هوی ساید به دست آمد.
- در سال ۱۸۵۸ میلادی، کلوین مدل جریان بر روی کابل تلگراف زیردریا transatlantic را فرمول بندی کرد که به خوبی عملکرد ضعیف کابل را پیش بینی کرده بود.
- در سال ۱۸۸۵، هوی ساید هم اولین مقاله را ارائه داد که انتشار بر روی کابلها را با معادلات تلگرافیست تحلیل میکرد.

انواع خطوط انتقال مخابراتی

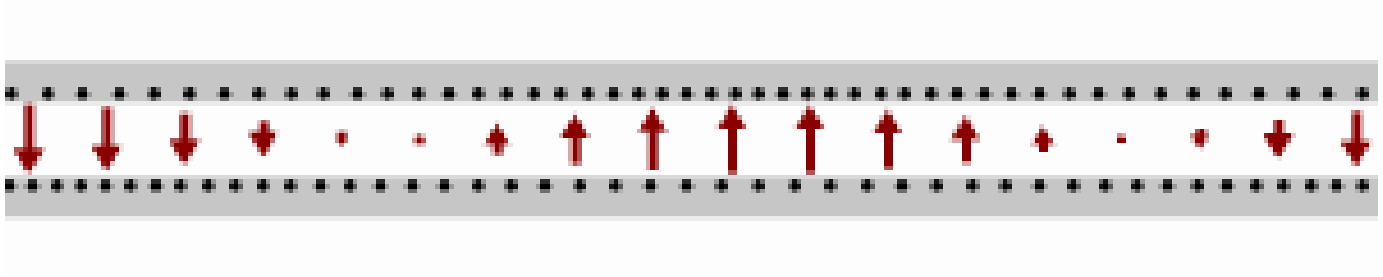
- ❑ خط دو سیمه اولین محیط انتقال مورد استفاده در صنعت مخابرات بود.
- خطوط انتقال دو سیمه: از دو سیم موازی درست شده که بین آنها هوا یا دی الکتریک قرار دارد.



الف ــ خط انتقال دو سیمه با عایق هوا



ب ــ خط انتقال دو سیمه با عایق پلی‌تین



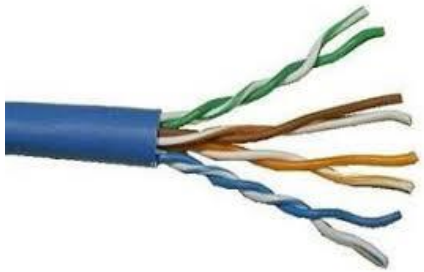
انواع خطوط انتقال

- علت استفاده از دوسیم کامل کردن مدار و ایجاد مسیر برای انتقال بار الکتریکی از منبع تا مقاومت بار و بالعکس می باشد.
- در فرکانس های پایین از خط دو سیمه موازی استفاده میشد و ده ها سال برای انتقال سیگنالهای تلگراف و تلفن بکار رفته است.
- این خط مخصوصا با افزایش فرکانس شروع به تشعشع میکند و منجر به ایجاد تلفات میشود.
- با رشد تکنولوژی این خط به ندرت در سیم کشی خط تلفن منازل دیده میشود.

انواع خطوط انتقال

❑ زوج سیم به هم تابیده

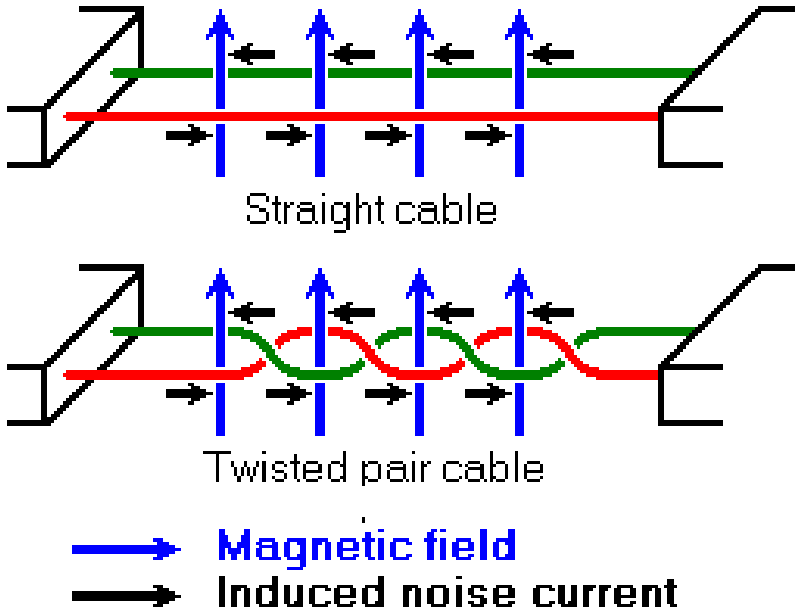
- **کابل زوج سیم: متشکل از یک یا چند زوج سیم که دو به دو به هم تابیده شده اند.**



- **از یک سیم به عنوان مسیر رفت و از سیم دیگر به عنوان مسیر برگشت استفاده میشود.**

انواع خطوط انتقال

- همچنین نویزی که از میدان مغناطیسی بیرونی در دو سیم القا میشود اگر دوسیم به هم تابیده شده باشد بسیار کمتر است.



انواع خطوط انتقال

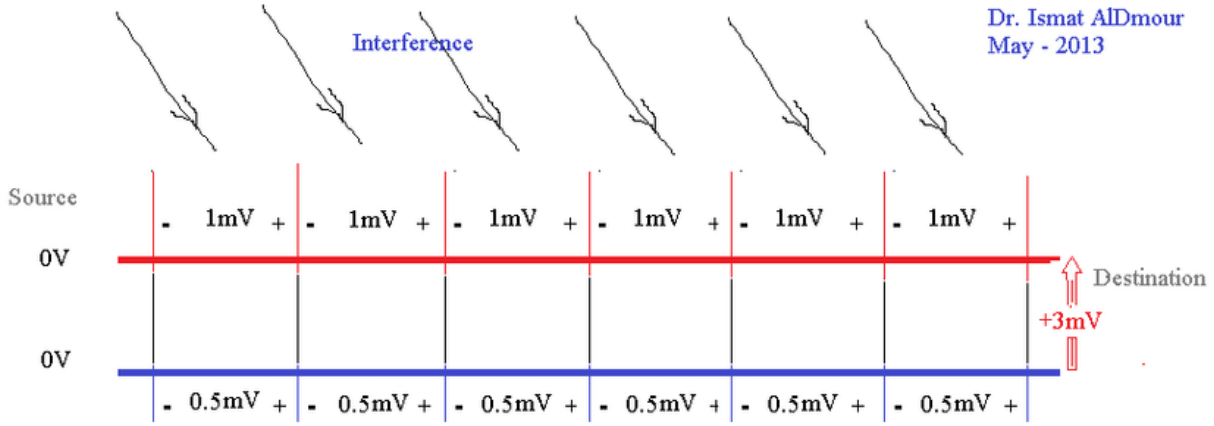


Figure 1: Parallel Pair, the interference causes higher pickup-voltages in red (closer) than blue wire.

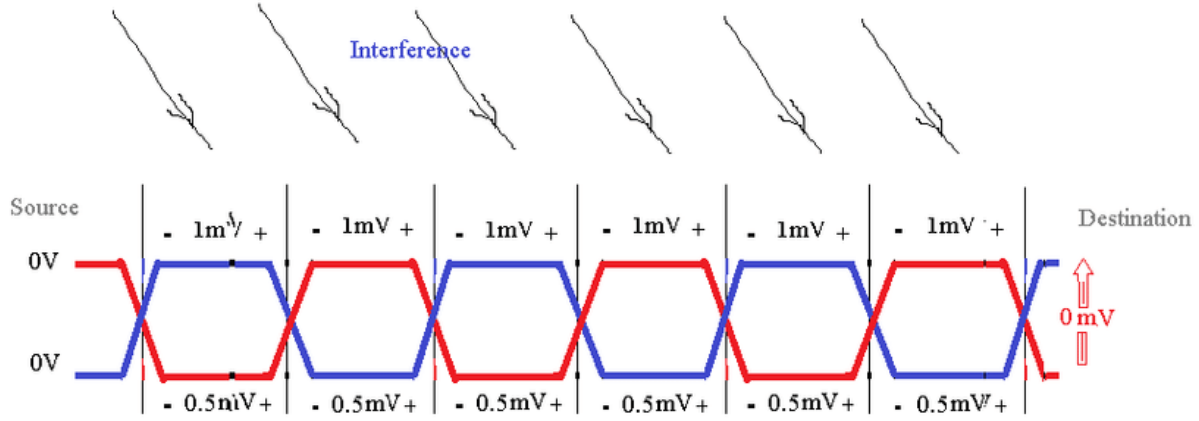
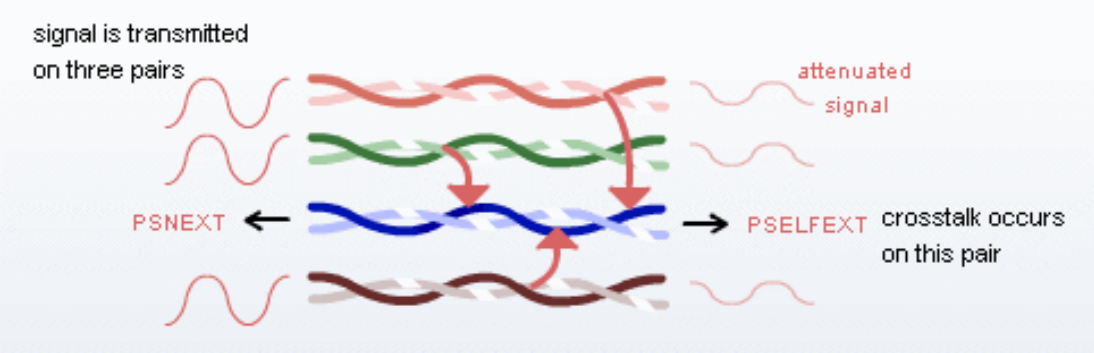


Figure 2: Twisted Pair, the interference alternatively produces high and low pickup-voltages in both wires.

- در خط دو سیمه سیمی که به منبع تداخل یا نویز نزدیکتر است ولتاژ بیشتری در آن القا می شود و در انتهای کابل اختلاف ولتاژ بین دو سیم زیاد است. در صورتی که در کابل زوج سیم در انتهای کابل اختلاف ولتاژ به صفر میرسد.

انواع خطوط انتقال



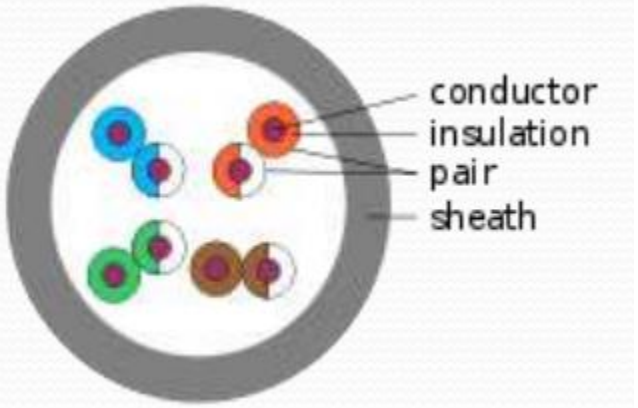
- اثری به نام همشنوایی در زوج سیم وجود دارد.

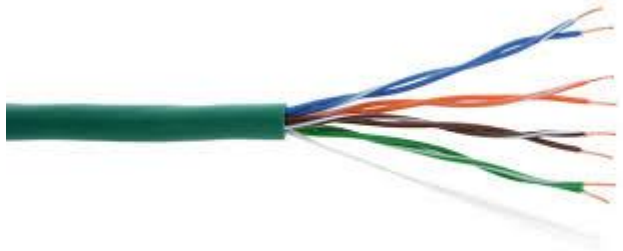
- هرچه زوج ها بیشتر تابیده شوند اثر هم شنوایی کمتر و کابل گرانتر می شود.
- هر چه زوج سیم ها بیشتر تابیده شوند پدیده تضعیف بیشتر می شود.
- برای کاهش اثر هم شنوایی و کاهش پدیده تضعیف باید تعداد پیچش بهینه باشد.
- هم برای انتقال سیگنال آنالوگ و هم برای انتقال سیگنال دیجیتال بکار می رود.
- بازه فرکانسی مورد استفاده از این خطوط از ۱۰۰ هرتز تا ۵ مگاهرتز است.

انواع خطوط انتقال

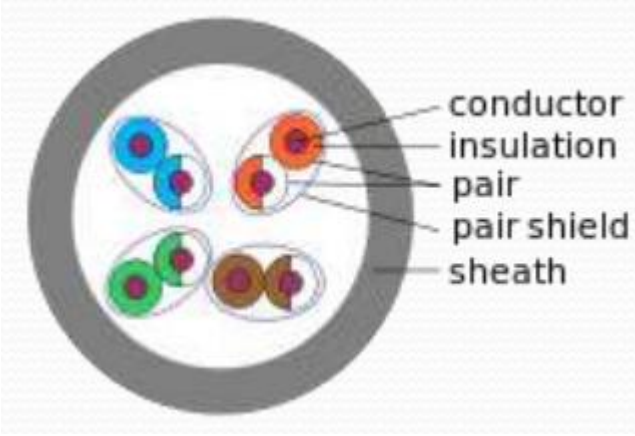
- زوج سیمها به دو صورت وجود دارد:

۱- زوج سیم بدون حفاظ (Unshielded Twisted Pair- UTP)





۲- زوج سیم با حفاظ (Shielded Twisted Pair- STP)

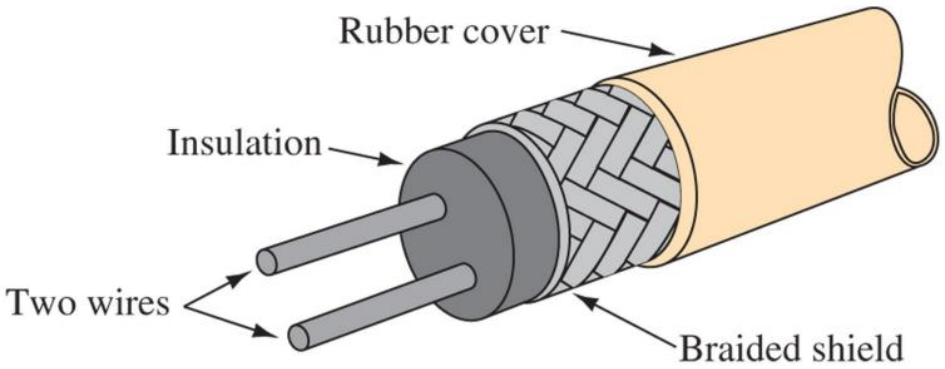


انواع خطوط انتقال

- زوج سیم بدون حفاظ نسبت به زوج سیم با حفاظ ارزان تر اما نویزپذیرتر است.
- شیلد کشیده شده بر روی زوج سیم، یک ورق فلزی مانند فویل است (آلومینیوم) که در برخی موارد یک شیلد سیمی رشته ای بر روی فویل قرار می گیرد.
- هدف از این شیلد گذاری افزایش مقاومت کابل در برابر امواج الکترومغناطیسی و نویز است.
- اگر این شیلد ها به زمین متصل شوند، نقش حفاظتی بیشتری در مقابل نویز خواهند داشت.

انواع خطوط انتقال

- ❑ زوج سیم حفاظ دار **Shielded Pair Transmission Lines**
- **دو سیم موازی که در یک محیط عایقی قرار گرفته شده اند.**
- **بعد از عایق یک روکش فلزی وجود دارد که تداخل و نویز و تشعشع کم شود.**



انواع خطوط انتقال

- در اوایل قرن بیستم، کابل هم محور به برای فرکانسهای بالاتر و ظرفیت بیشتر مورد استفاده قرار گرفت.

- امروزه هم به عنوان مناسبترین خط انتقال مخابراتی در سیستمهای تلویزیونی و مایکروویو است و در مدارات آزمایشگاهی به وفور مشاهده می شود.
- به علت محبوس ماندن میدانهای الکترومغناطیسی در عایق کابل ، مشکل چندانی در مورد تداخل در این کابل وجود ندارد. همچنین تشعشع از این کابل وجود ندارد.
- با افزایش فرکانس تلفات آن زیاد میشود.
- پاشندگی فرکانسی نیز در این خط وجود ندارد. (مگر در حالت وجود تلفات)
- برای انتقال مقدار توان متوسط کارایی دارد.

انواع خطوط انتقال

❑کابل هم محور

- هسته: از جنس رسانا معمولا مس است-تامین کننده مسیر رفت برای جریان
- عایق: از جنس تفلون و یا PVC و یا هوا
- هادی بیرونی : تامین مسیر برگشت برای جریان و نقش جاذب نویز را نیز به عهده دارد.

اگر حفاظ به زمین نیز متصل شود قادر خواهد بود نویزهای بیشتری را به زمین هدایت کند.

- روکش: حفاظت کابل از صدمات فیزیکی جنس آن PVC است

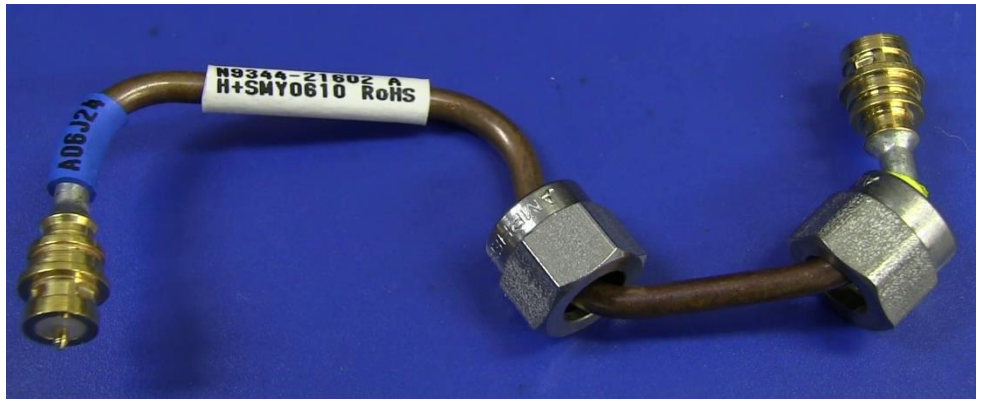
و مقاوم در برابر حرارات است.

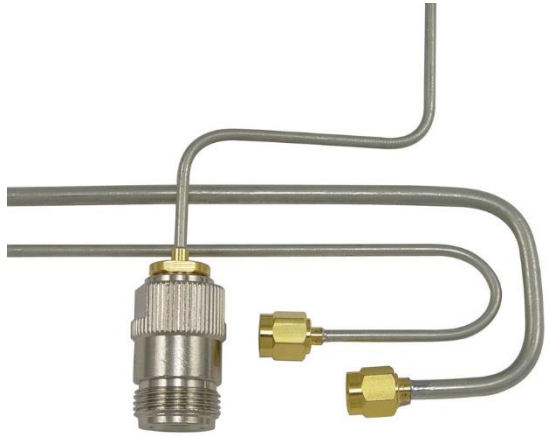
انواع خطوط انتقال

❑انواع کابل هم محور

- کابل هم محور قابل انعطاف: هادی خارجی، یک رسانای به هم بافته شده است. (مثلا رشته های مسی)

- کابل هم محور نیمه انعطاف (یا نیمه سخت): هادی خارجی به صورت یک فلز سخت است. خاصیت شیلدینگ بهتری در فرکانسهای بالاتر دارد. این کابل خیلی قابل شکل دهی نیست.





انواع خطوط انتقال

❑انواع کابل هم محور

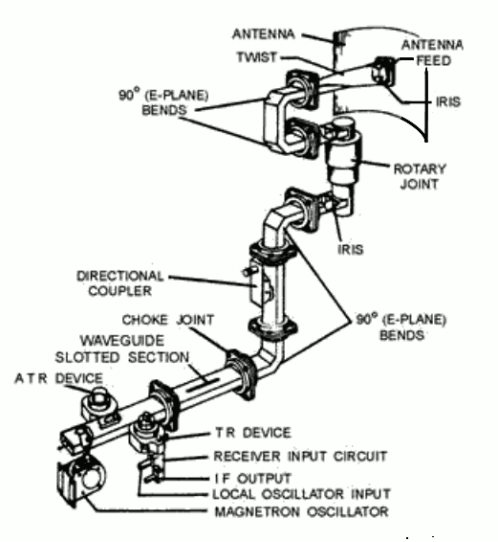
- **کابل هم محور سخت: هادی خارجی سخت است و از هوا به عنوان دی الکتریک بین دو هادی استفاده میشود. قابل خم کردن نیست. برای پوشش زوایا اتصالات با زاویه ۹۰ و یا ۴۵ وجود دارد.**

مزایا:

- ✓ **سبک بودن**
- ✓ **تلفات کمتر به دلیل عدم استفاده از عایق**
- ✓ **ارزان تر**

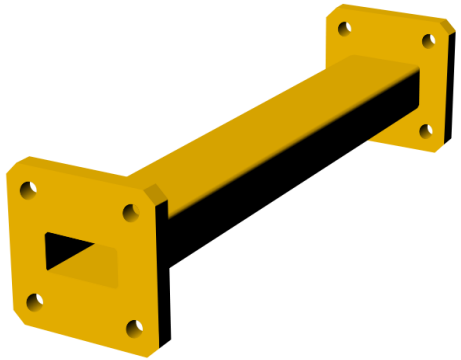
انواع خطوط انتقال

❑ موجبر



- در زمان جهانی دوم ، با مطرح شدن رادار استفاده از موجبرهای تک هادی به عنوان محیط انتقال با تلف کم و قابلیت انتقال توان بالا آغاز شد.

- یک لوله فلزی توخالی معمولا با سطح مقطع مستطیلی و یا دایروی (موجبر مستطیلی و دایروی)
- محدوده استفاده از آنها برای طول های تا چند ده متر می باشد.
- حتی در حالت بدون تلفات، پاشندگی فرکانسی دارد.
- در برابر تداخل ایمن است.



انواع خطوط انتقال

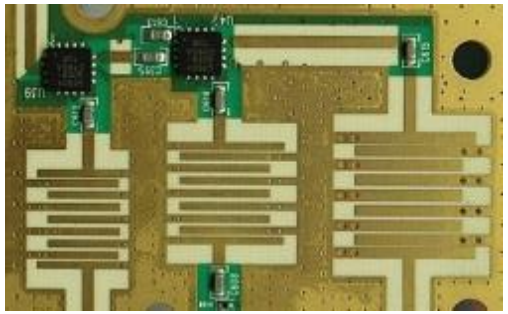
❑ موجبرها

- معمولاً در فرستنده ها و گیرنده های ماهواره ای ، جهت انتقال مطلوب سیگنال بین آنتن و مدارات الکترونیکی از این نوع محیط انتقال استفاده میشود.
- مزایای مهم این خط تلفات کم و قابلیت انتقال توان بالا می باشد به طوریکه در فرستنده های پر قدرت مایکروویو بهترین گزینه برای انتقال توان از منبع تا آنتن می باشد.

انواع خطوط انتقال

❑ استریپها

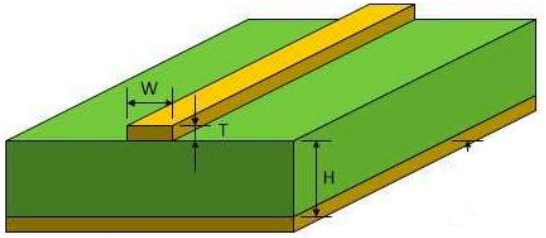
- با پیدایش خطوط و فن آوریهای جدید ، روند استفاده ار موجبرها کندتر شد و برای افزایش ظرفیت انتقال و دسترسی به پهنای باند وسیع ، باید از فرکانس های پائین به فرکانس بالاتر حرکت کرد.
- به این ترتیب ، امواج میلی متری (فرکانس ۳۰ تا ۴۰ گیگاهرتز) در سالهای اخیر کاربرد زیادی در مخابرات پیدا کرده است.



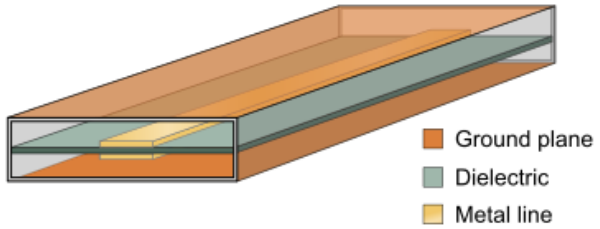
انواع خطوط انتقال

❑ استریپها

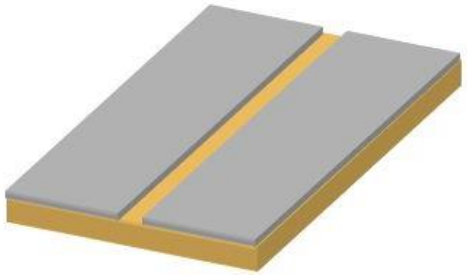
- خطوط انتقال موج میلیمتری تنوع زیادی دارند که مهمترین آنها عبارتند از:



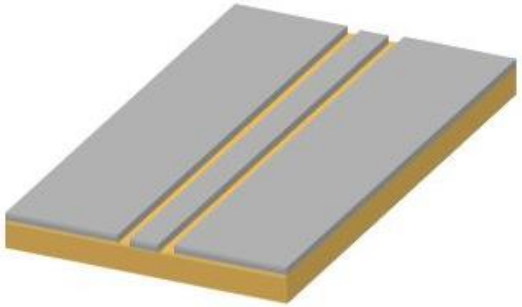
مایکرو استریپ یا ریز نوار



استریپ لاین یا خط نواری



اسلات لاین یا خط شکافدار



خط CPW(Coplanar Waveguide)
یا موجبر هم صفحه

- این خطوط نسبت به خطوط کابلی و موجبرها که دارای ساختار سه بعدی و حجیم است به صورت دو بعدی است.

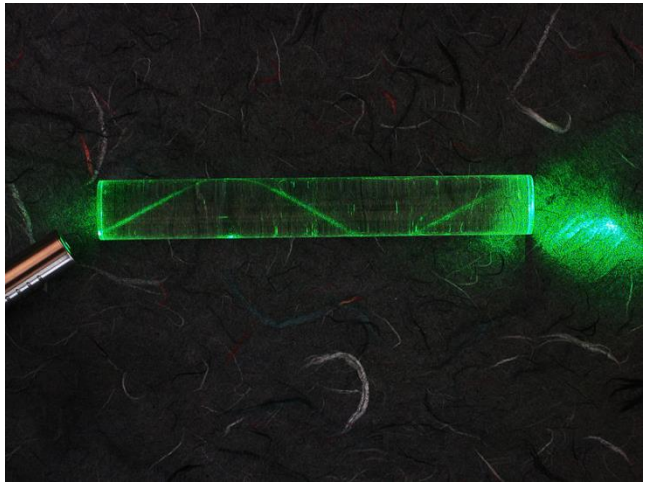
انواع خطوط انتقال

❑ استریپها

- این خطوط دارای مزایای زیادی از جمله سبکی ، وزن کم ، دو بعدی بودن ساختار می باشند. باتوجه به اهمیت مسائل اقتصادی در طرحهای مهندسی ، بکارگیری مدارات الکترونیکی ارزان ، یک الویت مهم می باشد.
- این خطوط به صورت یکپارچه با قطعات و مدارات مایکروویوی قرار میگیرد.

انواع خطوط انتقال

- همچنین در اواخر قرن ۱۹ میلادی ، ماکسول در مطالعات خود بر روی امواج الکترومغناطیسی نشان داد که نور به خانواده امواج الکترومغناطیسی متعلق دارد ، این امر باعث بوجود آمدن سیستم های نوری بعنوان بستر انتقال شد. ظرفیت انتقال یک فیبر نوری ، هزاران برابر ظرفیت کابل هم محور می باشد و این مسئله به همراه مسائل دیگر باعث شده است که سیستم های نوری نقش اساسی در مخابرات مدرن امروزی ایفا کنند.

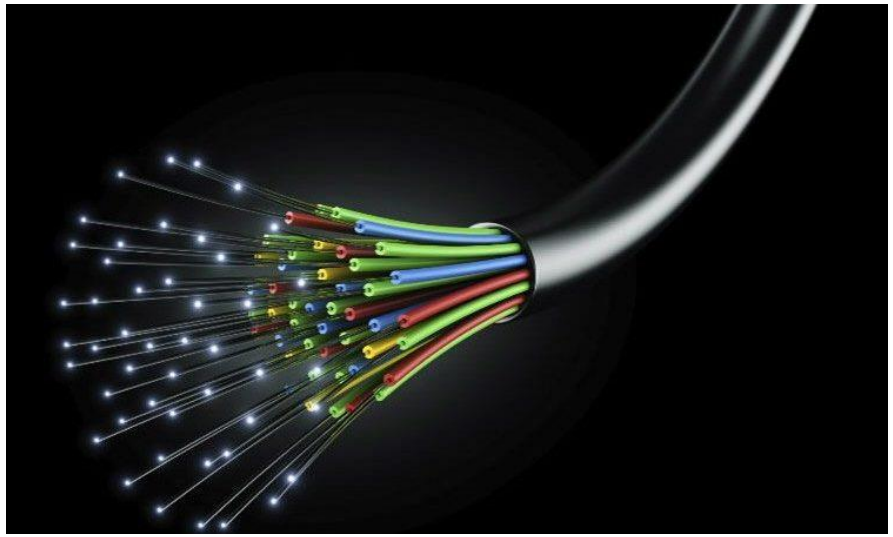


انواع خطوط انتقال

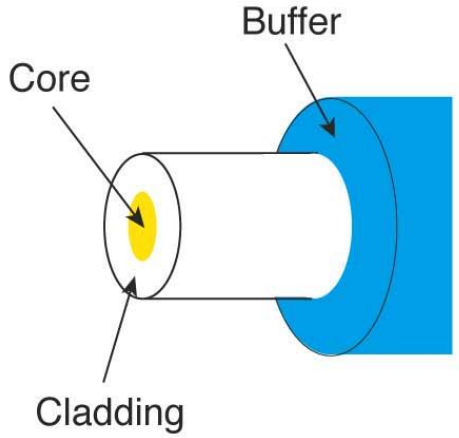
❑فیبر نوری

- صدها رشته فیبر نوری در دسته هایی سامان دهی شده و کابلهای نوری را بوجود میاورند.

- قسمتهای مختلف یک فیبر:
هسته
روکش
بافر رویه



انواع خطوط انتقال



- قسمتهای مختلف فیبر نوری:

۱- هسته (Core): این بخش که در مرکز فیبر قرار دارد از جنس یک ماده بی‌نهایت شفاف شیشه‌ای یا پلاستیکی تشکیل شده که پرتوهای نور در آن جریان می‌یابند.

۲-روکش (Cladding): این بخش نیز از جنس شیشه یا پلاستیک است اما با ضریب شکست متفاوتی با هسته، به این خاطر ضریب شکنندگی آن متفاوت است که پرتوهای موجود در هسته از آن خارج نشوند و با برخورد به Claddingدوباره به سمت Core هدایت شوند.

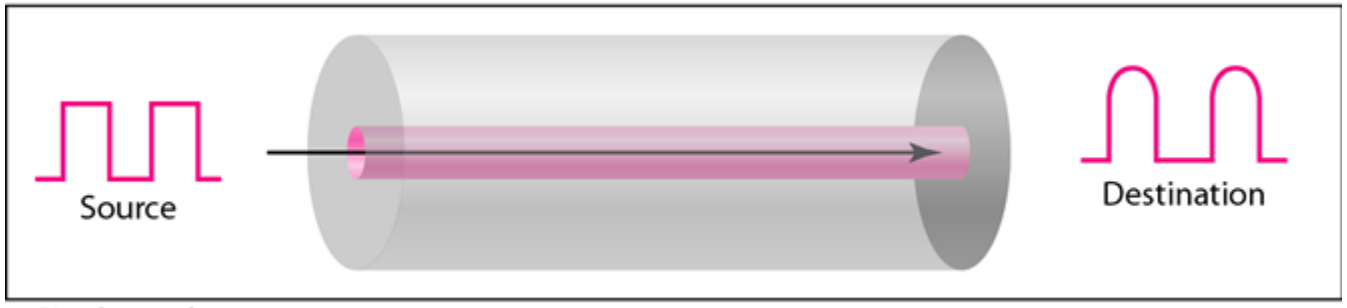
۳- بافر رویه: روکشی رنگی پلاستیکی است که از Core و Cladding در مقابل رطوبت و عوامل خارجی محافظت می‌کند.

انواع خطوط انتقال

❑ انواع فیبر نوری

- فیبر نوری از لحاظ انتشار به دو نوع single mode و multimode تقسیم میشوند.

در نوع singlemode قطر مغزی بسیار کم بوده و سیگنال نوری به صورت مستقیم حرکت میکند و از تضعیف کمتری نسبت به multimode برخوردار است اما این فیبر گرانتر و فرایند ساخت آن پیچیده تر است. برال ارسال اطلاعات از لیزر استفاده میشود.

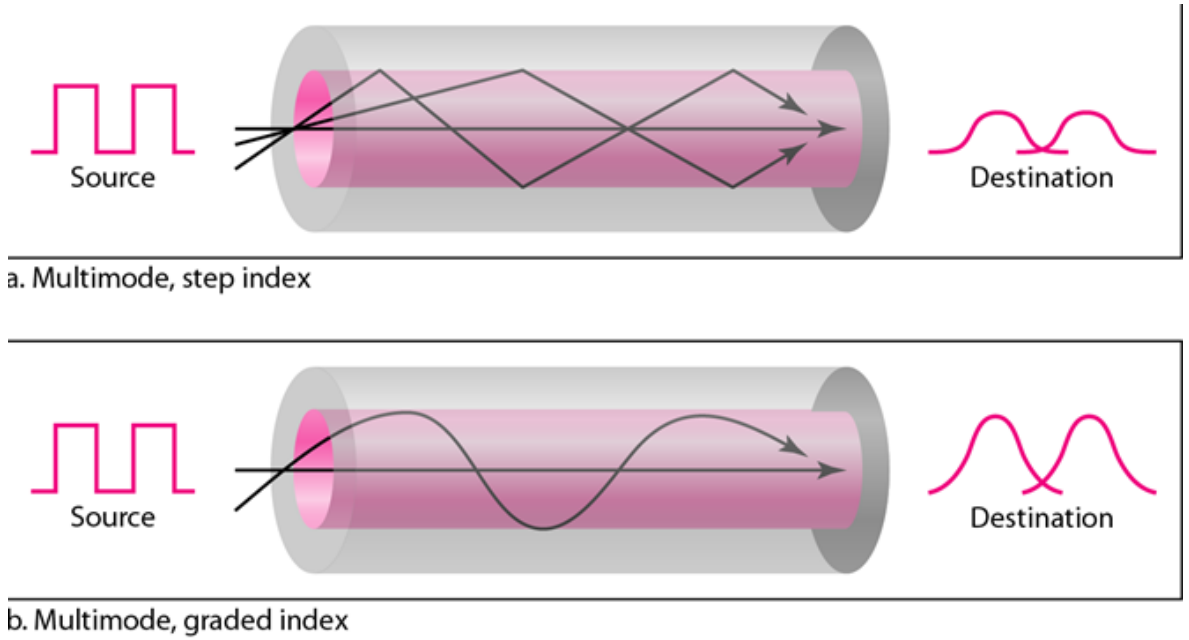


c. Single mode

انواع خطوط انتقال

❑ انواع فیبر نوری

در نوع multimode نوراز طریق بازتاب با روکش به سمت جلو حرکت میکند. و به دو صورت Step index و یا graded index وجود دارد. برای ارسال اطلاعات از دیود LED استفاده میشود.

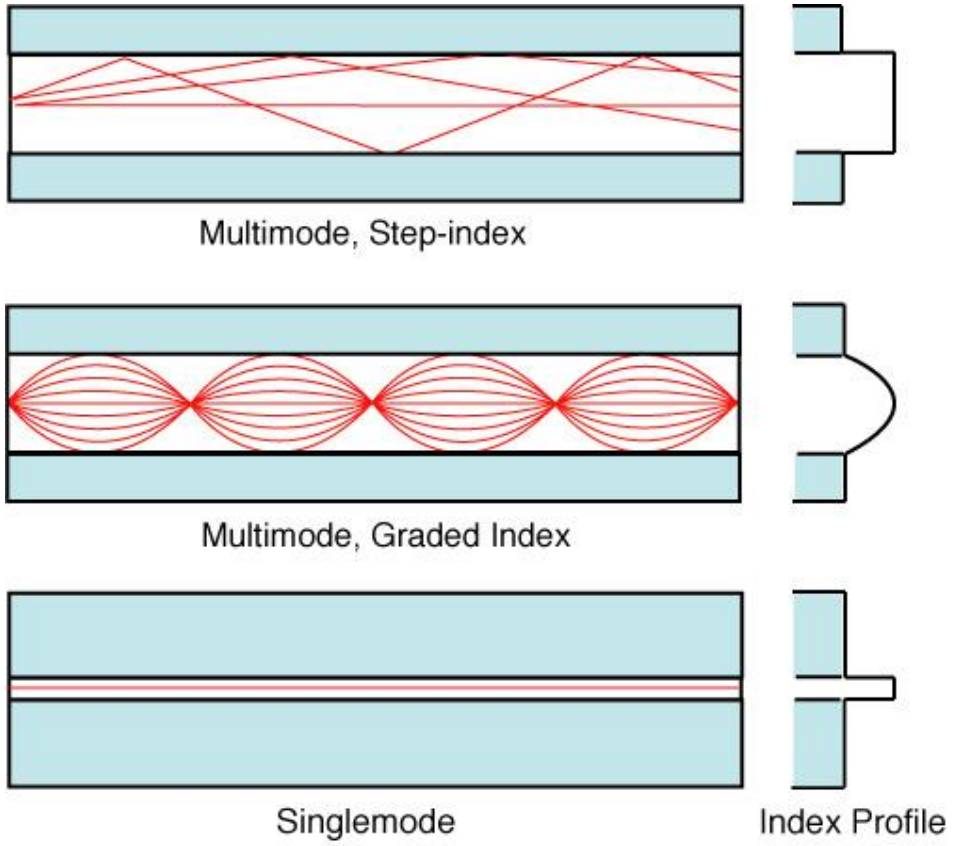


a. Multimode, step index

b. Multimode, graded index

انواع خطوط انتقال

- انواع فیبر نوری



انواع خطوط انتقال

- **۱- غیرهادی**
  - **فضا**
  - **فیبر نوری**
- **۲- هادی**
  - **تک هادی** ← موجبرها (دایروی-مستطیلی)
  - **دو هادی**
    - خط انتقال دو سیمه- کابل هم محور- زوج سیم به هم تابیده
    - خطوط میکرواستریپ
    - خط شکافدار (Slot line)
  - **چند هادی**
    - موجبر هم صفحه (Coplanar Waveguide –CPW)
    - خطوط استریپ لاین

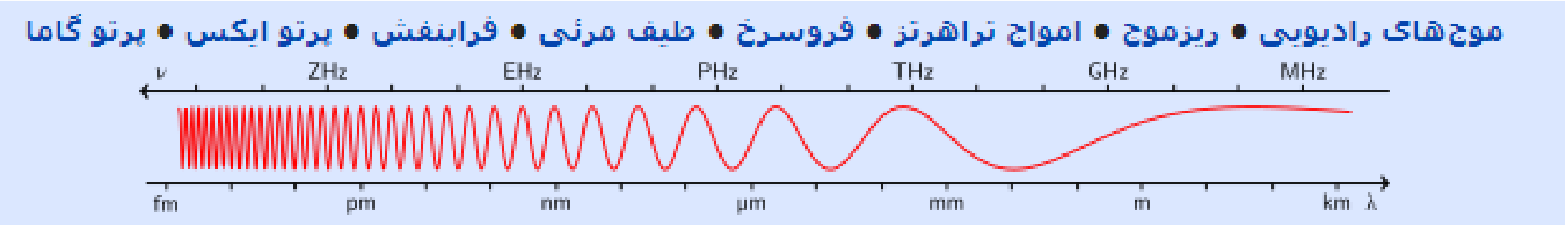
خطوط انتقال مورد تحلیل در این درس

مفهوم مدار فشرده (Lumped) و گسترده(Distributed)

- تئوری خط انتقال مخابراتی برای مدارهای گسترده است.

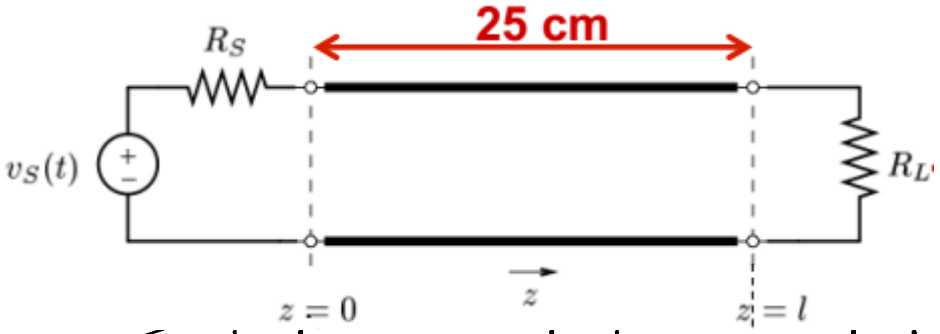
تعریف: مدار گسترده مداری است که ابعاد آن از 0.1 طول موج بزرگتر باشد در غیر اینصورت مدار فشرده است.

طول موج:



مفهوم مدار فشرده (Lumped) و گسترده(Distributed)

✓در مدارهای فشرده مکان عناصر و فاصله میان آنها اهمیت ندارد در صورتی که در مدارهای گسترده فاصله میان عناصر اهمیت دارد.



f = 300MHz

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\times10^{8}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{300\times10^{6}\,\frac{1}{\mathrm{s}}} = 1\mathrm{m}$$

✓در مدارهای فشرده پارامترهای مدار (ولتاژ و جریان) فقط وابسته به زمان است در مدارهای گسترده پارامترهای مدار (ولتاژ و جریان) هم وابسته به زمان و هم وابسته به مکان است.

✓در مدارهای فشرده معادله دیفرانسیل بر حسب زمان برای تحلیل مدار به دست میآید. در مدارهای گسترده معادله دیفرانسیل بر حسب زمان و مکان برای تحلیل مدار به دست میآید.

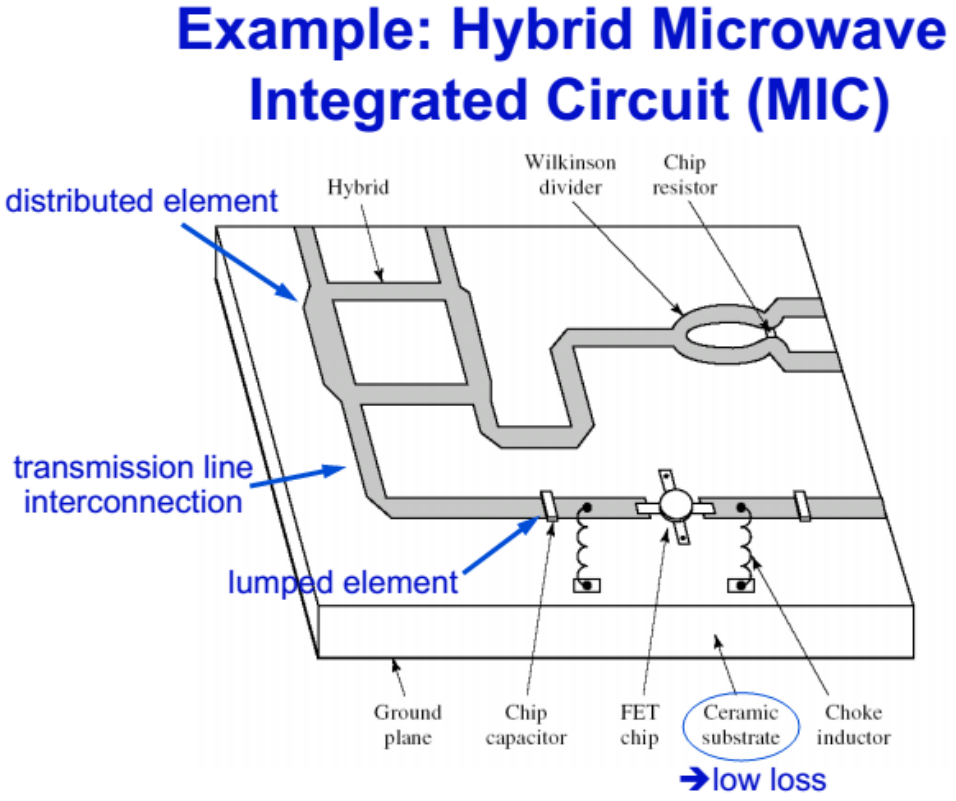
✓در مدارهای گسترده قوانین KVL و KCL صادق نیست.

دلایل مهم دانستن تئوری خط انتقال برای دانشجویان الکترونیک:

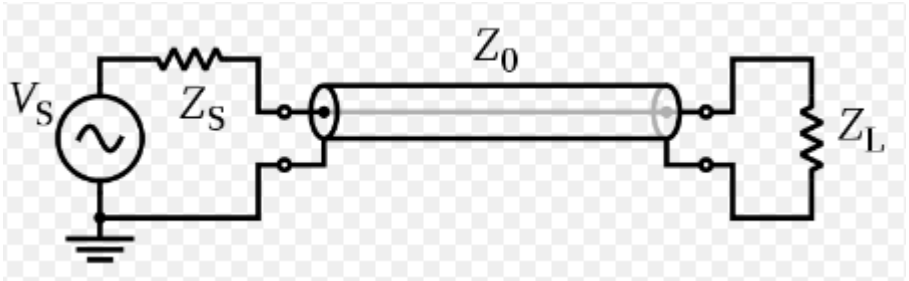
- هنگامی که طول سیمهایی از مدار که المانهای مختلف مدار را به هم وصل میکند از 0.1 طول موج بیشتر است باید از تئوری خط انتقال برای تحلیل مدار استفاده نمود.

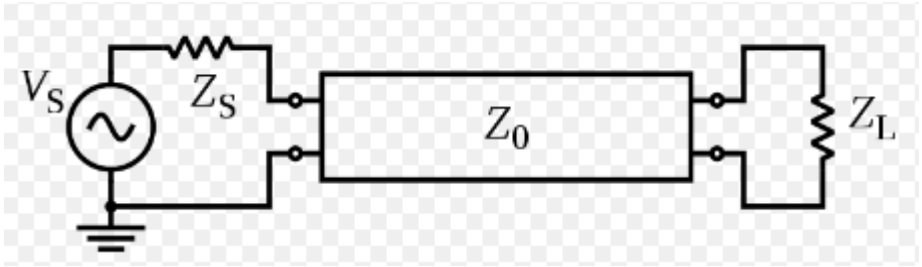
دلایل مهم دانستن تئوری خط انتقال برای دانشجویان الکترونیک:

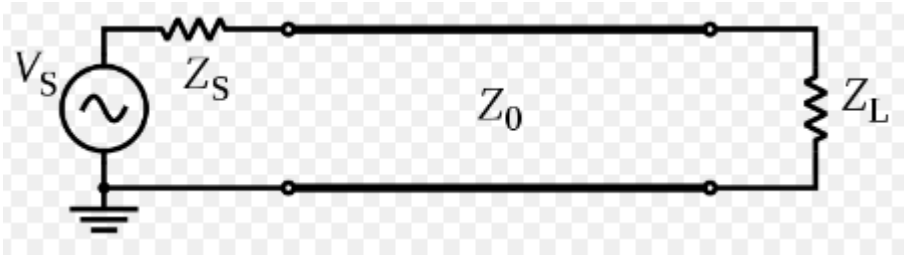
- تحلیل مدارهای مجتمع مایکروویو با استفاده از تئوری خط انتقال امکان پذیر است.
- در این مدار از المانهای فشرده مانند مقاومت و سلف نیز استفاده شده است.



تحلیل خطوط انتقال:







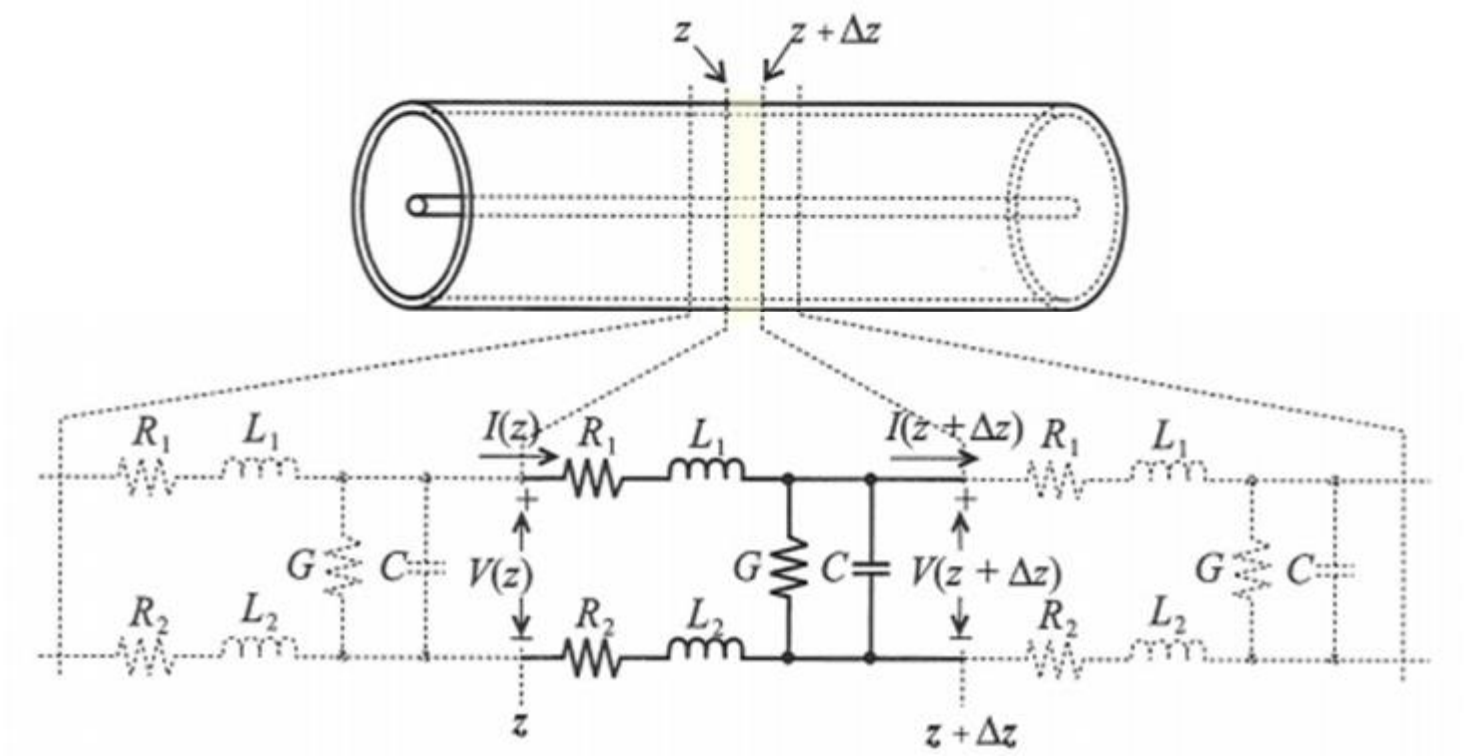
- همانگونه که گفته شد در تحلیل خطوط انتقالی که دارای چند هادی است از تئوری خط انتقال استفاده میشود. معمولا یک هادی (یا چند هادی) به عنوان زمین (مرجع پتانسیل) قرار گرفته و هادی دیگر به سیگنال ژنراتور وصل میشود.
- از این رو یک خط انتقال را به صورت یک شبکه دوپورتی در نظر می گیرند.

تحلیل خطوط انتقال:

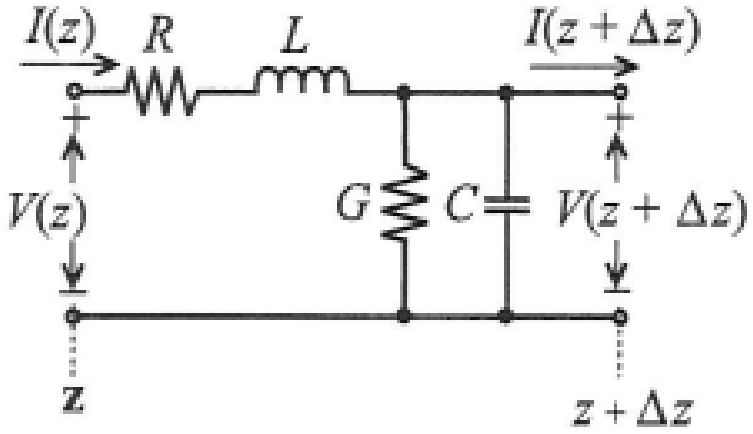
- مدلهای تغذیه خطوط استریپ

تحلیل خطوط انتقال:

- فرض میشود خط یکنواخت است یعنی خصوصیات فیزیکی خط نظیر جنس و یا اندازه عایق و هادیهای خط در طول خط تغییر نمیکند.
- یک طول کوچکی از خط را در نظر گرفته و برای آن مدل مداری تعریف میکنند.

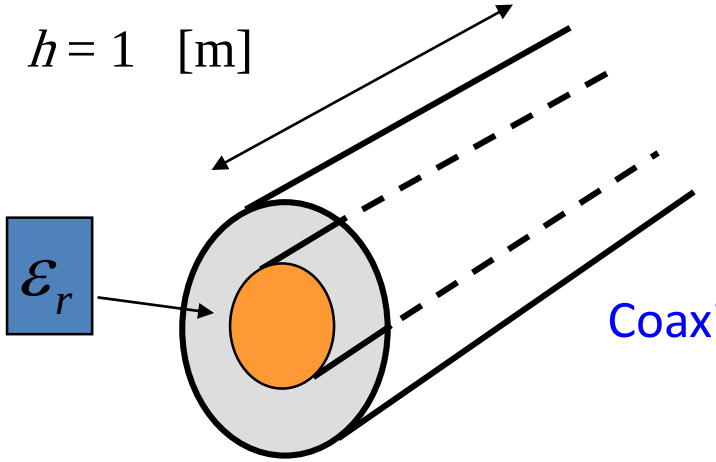


مدار معادل یک تکه کوچکی از خط

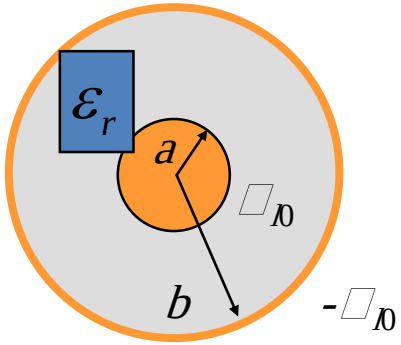


- R: به دلیل تلفات اهمی هادی خط انتقال
- L: به دلیل ذخیره انرژی مغناطیسی در خط
- G: به دلیل تلفات اهمی عایق خط
- C به دلیل ذخیره انرژی الکتریکی در خط

- برای هر یک از خطوط انتقال فرمولهای برای محاسبه پارامترهای مدار معادل وجود دارد.
- مثلا برای کابل کواکسیال



Coaxial cable



$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [\text{F/m}]$$

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [\text{S/m}]$$

$$L = \frac{\mu_0\mu_r}{2\pi}\ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad [\text{H/m}]$$

$$R = R_a + R_b$$

$$R_a = R_{sa}\left(\frac{1}{2\pi a}\right)$$

$$R_b = R_{sb}\left(\frac{1}{2\pi b}\right)$$