SIMCO

کابل کواکسیال

تهیه کننده : واحد تحقیق و توسعه و آموزش

کابل کواکسیال

1. مقدمه

کابل های کواکسیال عمومی ترین و قابل فهم ترین انواع کابل های طراحی شده در خطوط انتقال [1] هستند که جهت ارسال سیگنال از یک نقطه به نقطه دیگر مورد استفاده قرار می گیرند و اولین بار توسط دانشمند انگلیسی الیور هیویساید[2] در سال 1880 کشف شد . در مخابرات و الکترونیک ، خطوط انتقال به معنای کابل و یا هر ساختار طراحی شده جهت ارسال جریان متناوب در فرکانس های رادیویی است و فرکانس کار آن به حدی بالاست که طبیعت موجی آن باید در نظر گرفته شود .

ساختار کابل کواکسیال شامل دو هادی است که بوسیله یک دی الکتریک از یکدیگر جدا می شوند . هادی مرکزی و هادی بیرونی یا شیلد به صورت هم مرکز در محیطی استوانه ای دارای یک محور مشترک هستند و ابعاد آن کنترل می شود تا فاصله بین دو هادی مرکزی و بیرونی جهت عملکرد کارآمد در خطوط انتقال فرکانس رادیویی ثابت باشد .
یکی از مهم ترین مزایای کابل کوکسیال این است که در کابل کواکسیال ایده آل میدان الکترو مغناطیسی فقط در بین هادی مرکزی و بیرونی قرار دارد . این عامل باعث می شود تا کابل های کواکسیال در کنار قطعات فلزی نیز نصب شوند بدون اینکه تلفاتی در آنها ایجاد شود ، تلفاتی که در سایر انواع خطوط انتقال وجود دارد . همچنین سیگنال را در مقابل تداخل امواج الکترومغناطیسی خارجی نیز محافظت می کند .

در حالت عادی هادی بیرونی (شیلد) در پتانسیل زمین نگه داشته می شود و ولتاژ به هادی مرکزی اعمال می شود تا سیگنال الکتریکی را حمل کند . از مزایای کابل کواکسیال این است که میدان الکتریکی و مغناطیسی با نشتی کمی به بیرون شیلد در داخل دی الکتریک محدود می شوند ، و به صورت برعکس میدان های الکتریکی و مغناطیسی در بیرون از کابل به طور قابل ملاحظه ای از ایجاد تداخل در سیگنال داخل کابل نگه داشته می شوند . کابل های دارای قطر بالاتر و یا شیلد اضافه تلفات کمتری دارند . این خاصیت باعث می شود تا کابل کواکسیال جهت سیگنال های ضعیف که تحمل تداخل خارجی یا سیگنال های قوی تر را ندارند ، تبدیل به یک انتخاب خوب گردد .

کاربرد های عمومی کابل کواکسیال سیگنال های تصویری و تلویزیون ، خطوط انتقال ماکروویو و فرکانس رادیویی ، کامپیوتر و ارسال اطلاعات دستگاهها است . از مهمترین مشخصات آن امپدانس مشخصه است زیرا باید امپدانس آن با امپدانس منبع و بار یکسان باشد تا دارای بیشترین حد ارسال توان باشد . سایر خصوصیات مهم آن شامل تضعیف بر حسب تابعی از فرکانس ، قابلیت تحمل ولتاژ و کیفیت شیلد و ... است .

2. ساختار کابل کواکسیال

طراحی کابل کوکسیال بر خصوصیات فیزیکی ، تابعیت فرکانسی مشخصات ، تضعیف ، تحمل ولتاژ ، انعطاف پذیری ، استحکام و قیمت آن اثر گذار است . هادی آن به صورت مفتولی یا استرند است که در حالت استرند انعطاف پذیری بهتر است . می تواند جهت افزایش رسانایی به صورت نقره اندود باشد . هادی فولاد مس اندود نیز جهت کابل تلویزیون استفاده می گردد .

عایق آن می تواند به صورت یکپارچه [3] ، فوم[4] یا جداکننده[5] باشد که به دور هادی تابیده می شود . عایق عمومی مورد استفاده در کابل های کم تلفات PE است اما تفلون (PTFE یا FEP) نیز جهت عایق استفاده می گردد . برخی دیگر از انواع کواکسیال نیز از عایق هوا یا گازهای دیگر استفاده می کنند که بوسیله جداکننده هادی از شیلد جدا نگه داشته می شود .

در بسیاری از کابل های کواکسیال متعارف ، هادی بیرونی به صورت بافت است و باعث افزایش انعطاف پذیری کابل می شود . اما این بدین معناست که در لایه شیلد شکاف وجو دارد زیرا بافت نمی تواند به صورت تخت باشد . گاهی اوقات بافت به صورت نقره اندود است و یا ممکن است به دلیل عملکرد بهتر دارای دو شیلد باشد . همچنین می تواند شامل آلومینیوم فویل و بافت بر روی آن باشد . طراحی های دیگر شیلد ، انعطاف پذیری را فدای عملکرد بهتر می کند . برخی نیز دارای تیوب فلزی یکپارچه[6] هستند و نمی تونند به صورت تند خم شوند زیرا این عمل باعث ایجاد تلفات در کابل می گردد .

جهت خطوط انتقال فرکانس های رادیویی بالا تا 1 GHz هادی بیرونی تیوب فلزی یکپارچه استفاده می گردد و هادی مرکزی با سایز حداقل 0.25 inch استفاده می گردد . جهت افزایش انعطاف پذیری هادی بیرونی به صورت موجی تولید می گردد به همراه یک جداکننده پیچشی[7] تا دی الکتریک تقریبا هوا باشد .

کابل کواکسیال به یک دی الکتریک برای فاصله انداختن بین هادی داخلی و بیرونی نیاز دارد و این امر باعث افزایش تلفات در دی الکتریک می شود زیرا ثابت دی الکتریک پلیمرها از هوا بیشتر است . ضریب نفوذ پذیری الکتریکی پایین باعث می شود تا فرکانس های بالاتر نیز مورد استفاده قرار گیرد .

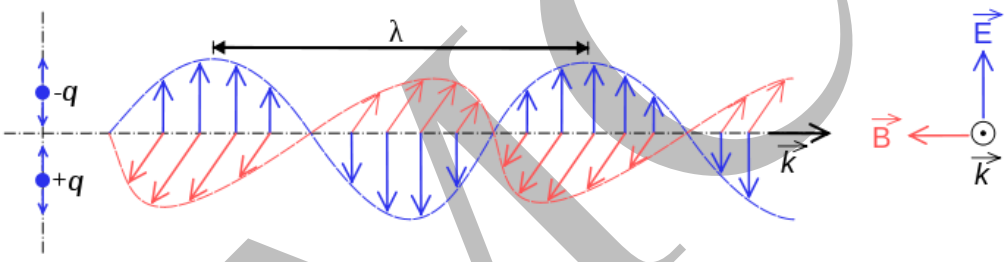
در حالیکه تعداد زیادی از کابل ها از دی الکتریک یکپارچه استفاده می کنند برخی دیگر نیز به صورت فوم و دارای مقداری هوا یا یک گاز دیگر هستند و این امر باعث کاهش تلفات با افزایش قطر هادی می شود . دی الکتریک فوم حدود 15% تلفات را کاهش می دهد اما بعضی از انواع آن در محیط های مرطوب ، رطوبت را جذب می کنند و این امر باعث افزایش تلفات می شود . نگهدارنده های به شکل ستاره یا پره بهتر هستند اما گرانترند و نسبت به نفوذ رطوبت نیز حساس ترند . در برخی کابل های کواکسیال کم تلفات مانند RG-62 هادی داخلی بوسیله یک نگهدارنده از جنس PE به صورت هلیکس نگهداشته می شود تا قسمتی هوا بین لایه هادی مرکزی و بیرونی وجود داشته باشد . ثابت دی الکتریک پایین تر هوا باعث می شود تا در یک امپدانس ثابت قطر هادی بالاتر استفاده کرد و در همان فرکانس قطع قطر بالاتر استفاده نمود و تلفات را کاهش داد .

در روکش نیز از مواد مواد متفاوتی می توان استفاده نمود که عمومی ترین آن PVC است ، اما ممکن است بر اساس کاربرد نیاز به مواد دیگری به عنوان مقاوم در برابر اشعه ماوراء بنفش ، اکسیداسیون ، مقاوم در برابر جوندگان و .... باشد .

3. انتشار سیگنال

خطوط انتقال ، خاصیت ارسال سیگنال الکترومغناطیسی را در فضای بین هادی ها دارد . دارای تلفات کمی است اما خصوصیات نامطلوبی نیز دارد . نمی توان آن را خم کرد یا زوج کرد و یا هرگونه شکلی به آن داد بدون اینکه در امپدانس مشخصه آن تاثیر بگذارد و این امر باعث برگشت سیگنال به سمت منبع می گردد . آنها نمی توانند دفن شوند و یا به هر نوع هادی متصل شوند . جریان در نزدیکی آنها باعث تابش اشعه های ناخواسته می شود . کابل های کواکسیال به دلیل محدود کردن امواج الکترومغناطیسی به فضای داخل کابل ، تا حد زیادی این مشکل را حل کرده اند و می توانند خم شوند و یا دور قطعات فلزی تابیده شوند بدون اینکه این امر باعث ایجاد اثرات نامطلوب گردد .

کابل کواکسیال سیگنال الکترومغناطیسی را منتشر می کند . امواج الکترومغنلطیسی شامل امواج الکتریکی و امواج مغناطیسی هستند که بر یکدیگر عمودند و راستای انتشار توان در آن بر هر دو راستا عمود بوده و باعث انتشار سیگنال می گردد . جهت میدان الکتریکی در عایق به صورت شعاعی از هادی داخلی به سمت هادی بیرونی و میدان مغناطیسی نیز به صورت پیچشی در عایق است که جهت آن با قاعده دست راست مشخص می گردد . از حاصل این دو میدان ، موج الکترومغناطیسی پدید می آید که عمود بر هر دو راستا در جهت طول کابل در درون عایق منتشر می شود.



در شکل بالا خطوط قرمز میدان مغناطیسی B و خطوط آبی میدان الکتریکی E و K راستای انتشار توان الکترو مغناطیسی هستند که راستای آن طبق صفحات راستگرد و قاعده دست راست قابل تعیین است و λ نیز طول موج است .

در فرکانس های رادیویی تا حد چند گیگا هرتز امواج در مود الکترو مغناطیسی عرضی (TEM) منتشر می شوند و این بدین معناست که میدان الکتریکی و مغناطیسی فقط مؤلفه عمود بر راستای انتشار دارند . هرچند در فرکانس بالاتر از فرکانس قطع می توانند موج الکتریکی عرضی (TE) یا موج مغناطیسی عرضی (TM) را نیز منتشر کنند .

موج عرضی موجی است که فقط در عرض راستای انتشار دارای مؤلفه است یا به عبارتی ساده تر مؤلفه ای طولی در راستای انتشار ندارد . موج الکتریکی عرضی بدین معناست که میدان الکتریکی فقط مؤلفه عمودی دارد اما میدان مغناطیسی هم مؤلفه در راستای انتشار و هم در جهت عمود بر راستای انتشار دارد . برای موج مغناطیسی نیز تحلیل به صورتی مشابه است . در میدان الکترومغناطیسی عرضی نیز هر دو فقط مؤلفه ای در راستای عمود بر جهت انتشار دارند . جهت انتشار نیز مسیر انتقال توان یا انتشار توان و همان طول مسیر کابل است .

اینکه در فرکانس بالاتر از فرکانس قطع می توان سیگنال را در موهای TE و TM منتشر کرد نامطلوب است و از آنجا که ممکن است باعث انتشار مودهای مختلف با سرعت فاز متفاوت و تداخل با یکدیگر گردد . قطر بیرونی تقریبا متناسب با معکوس فرکانس قطع است . خطوط میدان الکتریکی برای مود TM مولفه طولی دارد و در نتیجه نیاز به طول خط بالاتر از نیم موج دارد .

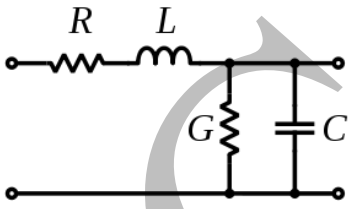
در حالت کلی سه اتفاق را می توان برای کابل کواکسیال بیان کرد

- سیگنال به انتهای دیگر منتقل می شود که مطلوب است

- در طول کابل به صورت حرارت و یا نشت به بیرون کابل تلف می شود
- به طرف منبع بازتاب داده می شود

4. پارامترهای خط انتقال

خط انتقال در مهندسی مخابرات و الکترونیک یک کابل مخصوص و یا یک ساختار طراحی شده ای است که جهت حمل جریان متناوب در فرکانس های رادیویی مورد استفاده قرار می گیرد . مدل خط انتقال شامل یک سری نا متناهی از المانهایی است که در شکل زیر آمده است



- مقاومت خط انتقال R مربوط به مقاومت هادی های مورد که به صورت سری نمایش داده شده است و واحد آن اهم بر واحد طول است .
- اندوکتانس[8] خط انتقال L ناشی از میدان مغناطیسی اطراف سیم به صورت یک سلف سری نمایش داده شده است و واحد آن هانری بر واحد طول است .
- خازن C بین دو هادی مرکزی و شیلد به صورت شنت نمایش داده شده است و واحد آن فاراد بر واحد طول است .
- کانداکتانس[9] G بین سیم رفت و برگشت ناشی از دی الکتریک به صورت شنت نمایش داده شده است و واحد آن زیمنس بر واحد طول است

مدل خط انتقال شامل سری نامتناهی از اجزاء نشان داده شده در شکل بالاست که البته هر کدام از اجزاء R , L , G , C ممکن است تابعی از فرکانس باشند .

اگر ولتاژ و جریان را به صورت تابعی از مسیر (فاصله تا ابتدای مسیر) در نظر بگیریم خواهیم داشت

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} = -(R + j\omega L)I(x)$$
$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} = -(G + j\omega C)V(x)$$

در رابطه بالا $V(x)$ ولتاژ به صورت تابعی از مسیر و $I(x)$ جریان به صورت تابعی از مسیر در نظر گرفته شده است . ω فرکانس زاویه ای با واحد رادیان بر ثانیه است و j نیز نمایشگر قسمت مختلط است . رابطه فرکانس زاویه ای به صورت زیر است که در آن f فرکانس بر حسب هرتز است .

$$\omega = 2\pi f$$

در صورتی که مقدار R , G به اندازه کافی کوچک و قابل صرفنظر باشد ، خط انتقال ساختار بدون تلف در نظر گرفته می شود .

با جایگذاری روابط ولتاژ و جریان در یکدیگر می توان نوشت :

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = \gamma^2 * V(x)$$
$$\frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} = \gamma^2 * I(x)$$

با حل معادلات مرتبه دوم ولتاژ و جریان خواهیم داشت :

$$V(x) = V^+ e^{-\gamma x} + V^- e^{\gamma x}$$
$$I(x) = \frac{1}{Z_c}(V^+ e^{-\gamma x} - V^- e^{\gamma x})$$
$$Z_0 = \frac{V^+}{I^+} = -\frac{V^-}{I^-}$$

که در آن :

$$\mathbf{Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}}$$
$$\boldsymbol{\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) * (G + j\omega C)}}$$

که در آن $V^{\pm}$ و $I^{\pm}$ بر اساس شرایط مرزی تعیین می شوند و Z_0 نیز امپدانس مشخصه است . ثابت انتشار γ نیز در حالت کلی عددی مختلط است که قسمت صحیح آن ثابت تضعیف (α) و قسمت موهومی (β) آن نیز ثابت فاز خوانده می شود .

در خطوط کم تلفات و فرکانس بالا خواهیم داشت :

$$\alpha = Re(\gamma) \approx \frac{\sqrt{LC}}{2}(\frac{R}{L} + \frac{G}{C})$$
$$\beta = Im(\gamma) \approx \omega\sqrt{LC}$$

5. تحلیل الکترومغناطیسی

برای تحلیل الکترومغناطیسی کابل کواکسیال از قوانین ماکسول استفاده می گردد . قوانین ماکسول چهار قانون به شرح زیر است :

$$\nabla x E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\nabla x H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$
$$\nabla . D = \rho$$
$$\nabla . B = 0$$

SIMCO

که در آن E شدت میدان الکتریکی و H شدت میدان مغناطیسی و D چگالی شار الکتریکی و B چگالی شار مغناطیسی است . ρ بار آزاد موجود و J چگالی جریان سطحی است . با استفاده از چهار قانون بالا و بسط تابع کرل (∇x) و فرض $0=J=\rho$ در یک محیط استوانه ای راستای انتشار در جهت محور z و مولفه شعاعی میدان الکتریکی ، اعمال ولتاژ V_0 به هادی مرکزی و 0 به هادی بیرونی خواهیم داشت :

$$V = V_0 \frac{\mathrm{Ln}\left(b/r\right)}{\mathrm{Ln}\left(b/a\right)} e^{-j\beta z}$$

بنابراین برای محاسبه میدان الکتریکی و مغناطیسی به شرح زیر عمل می کنیم

$$E = -\nabla V = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{V_0}{r\mathrm{Ln}\left(b/a\right)} e^{-j\beta z}$$

$$H = \frac{1}{\eta}(\hat{z}xE) = \frac{V_0}{\eta r\mathrm{Ln}\left(b/a\right)} e^{-j\beta z}$$

که در روابط بالا a شعاع هادی مرکزی و b شعاع هادی بیرونی ، z محور راستای انتشار ، r قاصله هر نقطه از مرکز هادی که دارای ولتاژ و میدان مشخصی است و η نیز امپدانس ذاتی محیط و به شکل زیر است :

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r * \mu_0}{\varepsilon_r * \varepsilon_0}} = 120\pi \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}$$

و البته می توان مقدار μ_r را نیز به دلیل محیط غیر مغناطیسی برابر 1 گرفت

برای محاسبه جریان طبق قانون آمپر خواهیم داشت :

$$I = \oint H.dl = 2\pi rH = \frac{2\pi V_0}{\eta \mathrm{Ln}\left(b/a\right)}$$

حال جهت محاسبه امپدانس مشخصه خواهیم داشت :

$$\mathbf{Z_0 = \frac{V}{I} = \frac{\eta}{2\pi} Ln\left(b/a\right)}$$

برای محاسبه اندوکتانس خواهیم داشت :

$$\frac{dV}{dz} = -j\omega LI \quad \Rightarrow \quad L = \frac{\eta}{2\pi}\frac{\beta}{\omega} Ln\left(b/a\right)$$

$$\boldsymbol{L = \frac{\mu}{2\pi} Ln\left(b/a\right)}$$

به طریقی مشابه برای محاسبه خازن خواهیم داشت :

$$\frac{dI}{dz} = -j\omega CV \quad \Rightarrow \quad C = \frac{2\pi}{\eta}\frac{\beta}{\omega Ln\left(b/a\right)}$$

$$\boldsymbol{C = \frac{2\pi\varepsilon}{Ln\left(b/a\right)}}$$

در روابط بالا ε ، ضریب نفوذ پذیری الکتریکی و برابر $\varepsilon_r * \varepsilon_0$ است . همین طور جهت μ ، ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی و برابر $\mu_r * \mu_0$ است و روابط بالا به صورت زیر ساده می شوند .

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} * 10^{-9}$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$$

SIMCO

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \mathrm{Ln}\left(D/d\right) \quad (\Omega)$$

$$L = 200 * \mu_r * Ln\left(D/d\right) \quad (\mu H/km)$$

$$C = \frac{1000*\varepsilon_r}{18*Ln\left(D/d\right)} \quad (nF/km)$$

در روابط بالا D قطر عایق و d قطر هادی جایگزین a , b شعاع هادی و عایق شده اند . هادی در کابل کواکسیال می تواند به صورت مفتولی و یا استرند شده باشد ، برای محاسبه اندوکتانس ، خازن و امپدانس ، در صورتی که هادی استرند شده استفاده گردد به جای قطر هادی d ، از قطر موثر هادی استفاده می گردد . جهت استفاده قطر موثر هادی ضریبی در قطر هادی ضرب می گردد ، این ضریب جهت هادی 7 رشته0.94 و جهت هادی19 رشته0.97 در نظر گرفته می شود .

مرحله بعد محاسبه تضعیف $10^{}$ در هادی و عایق است . تضعیف در یک خط انتقال مجموع تضعیف هادی α_c و تضعیف دی الکتریک α_d است . تضعیف هادی به دلیل هادی کامل نبودن هادی مرکزی و هادی بیرونی است و تضعیف دی الکتریک نیز ناشی از تانژانت تلفات است .

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d$$

جهت این محاسبات جریان سطحی را جها هادی و عایق در نظر می گیریم و سپس توان تلف شده در هادی را محاسبه می کنیم . توان منتقل شده در کابل را نیز محاسبه و در نهایت تضعیف محاسبه می گردد . توان تلف شده P_L و توان کل منتقل شده را نیز با P_T نمایش می دهیم و طبق این شرایط خواهیم داشت :

$$P_L = \frac{1}{2} R_s {I_0}^2$$

$$P_T = \frac{1}{2} Z_0 {I_0}^2$$

در نتیجه برای تضعیف هادی خواهیم داشت :

$$\alpha_c = \frac{P_L}{2P_T} = \frac{R_s}{Z_0}$$

در رابطه بالا R_s مقاومت هادی داخلی و بیرونی است که به صورت یک پوسته با ضخامت δ نا شی از اثر پوستی است . قطر این پوسته جهت هادی مرکزی قطر هادی و جهت هادی بیرونی قطر دی الکتریک است که جهت محاسبه آن می توان به صورت زیر عمل کرد :

$$R_{s\,(a+b)} = \frac{l}{\sigma A} = \frac{1}{\sigma\delta\,(2\pi a)} + \frac{1}{\sigma\delta\,(2\pi b)}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \mathrm{Ln}\left(D/d\right)$$

$$\alpha_c = \frac{P_L}{2P_T} = \frac{R_s}{2*Z_0} = \frac{a+b}{2ab\eta Ln\left(b/a\right)} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$$

جهت محاسبه تضعیف دی الکتریک نیز می توان مستقیما از رابطه ثابت انتشار بدست آورد . ثابت انتشار در یک خط بی تلف به صورت زیر است :

$$\gamma = \sqrt{\hat{z}\hat{y}} = \sqrt{(j\omega\mu) * (j\omega\varepsilon)} = j\omega\sqrt{\varepsilon\mu}$$

که در آن z و y بر اساس روابط زیر هستند :

$$\nabla xE = zH$$
$$\nabla xH = yE$$

که مقداری کاملا موهومی است و مقدار صحیح ندارد . در صورتی که خط دارای تضعیف باشد خواهیم داشت :

$$\gamma = \sqrt{(j\omega\mu) * (\sigma + j\omega\varepsilon)} \approx j\omega\sqrt{\varepsilon\mu}\left(1 + \frac{\sigma}{j\,2\omega\varepsilon}\right)$$
$$tan(\delta) = \frac{\sigma}{\varepsilon\omega}$$
$$\boldsymbol{\alpha_d = \frac{1}{2}\omega\sqrt{\varepsilon\mu} * tan(\delta)}$$

استفاده از روابط بالا جهت محاسبه ثابت تضعیف دشوار هستند و با شروطی می توان آنها را به صورت زیر ساده نمود . با در نظر گرفتن هادی مرکزی و بیرونی مس و محیط غیر مغناطیسی و فرکانس بر حسب M Hz و ابعاد با واحد mm خواهیم داشت :

$$\alpha_C = 0.000692 * \frac{D+d}{Dd * Ln\left(\frac{D}{d}\right)} * \sqrt{f} \quad (Np/m)$$
$$\alpha_d = 0.0105 * \sqrt{\varepsilon_r} * tan(\delta) * f \quad (Np/m)$$
$$\boldsymbol{\alpha\,(dB/m) = 8.686 * (\alpha_C + \alpha_d)}$$

تهیه کننده :

شرکت سیمکو - واحد تحقیق و توسعه

SIMCO