کابل کواکسیال در سیستمهای آنتن مرکزی: بررسی افت ، روشهای محاسبه و معیارهای انتخاب

گرد آورنده و تدوین : شهریار معزی
کارشناس ارشد و پژوهشگر در حوزه سیستمهای آنتن مرکزی ، مهندسی آنتن و RF و برودکستینگ
از سری مقالات تخصصی واحد مطالعات و تحقیقات فنی شرکت طیف گستر پیام (Teleteyf)

چکیده

کابل کواکسیال یکی از اجزای اصلی شبکه‌های آنتن مرکزی و توزیع سیگنال‌های تلویزیونی و ماهواره‌ای است. انتخاب نامناسب کابل یا محاسبه نادرست افت آن می‌تواند باعث کاهش سطح سیگنال در پریزهای مشترکین، ایجاد اختلاف سطح بین کانال‌های مختلف و دشواری در تنظیم تقویت‌کننده‌های شبکه شود.

افت کابل با افزایش فرکانس بیشتر می‌شود؛ بنابراین، در طراحی شبکه‌های MATV و SMATV باید علاوه بر طول مسیر، محدوده فرکانسی مورد استفاده نیز در نظر گرفته شود. این موضوع به‌ویژه در شبکه‌هایی که هم‌زمان سیگنال‌های زمینی و ماهواره‌ای را توزیع می‌کنند اهمیت دارد.

در این مقاله، ساختار کابل کواکسیال، عوامل مؤثر بر افت فرکانسی، مشخصات الکتریکی و مکانیکی کابل‌ها، روش محاسبه افت و معیارهای انتخاب کابل مناسب بررسی می‌شود. همچنین با استفاده از اطلاعات فنی چند نمونه کابل از سازندگان معتبر، مقایسه‌ای کاربردی برای انتخاب کابل در پروژه‌های آنتن مرکزی ارائه خواهد شد.

هدف این مقاله، ارائه راهنمایی فنی و کاربردی برای مهندسان، طراحان و مجریان سیستم‌های MATV و SMATV است.

۱. مفهوم افت کابل کواکسیال (Coaxial Cable Attenuation)

هنگامی که یک سیگنال الکتریکی با فرکانس مشخص وارد کابل کواکسیال می‌شود، بخشی از انرژی آن در طول مسیر به دلیل تلفات هادی‌ها و ماده دی‌الکتریک تلف می‌شود. در نتیجه، دامنه سیگنال در انتهای کابل نسبت به ابتدای آن کاهش پیدا می‌کند.

این کاهش سطح سیگنال را افت کابل یا Attenuation می‌نامند.

افت کابل معمولاً با واحد دسی‌بل (dB) بیان می‌شود. سازندگان کابل نیز اغلب مقدار افت را برحسب dB/100m در فرکانس‌های مختلف اعلام می‌کنند.

برای مثال، اگر افت یک کابل در فرکانس ۸۶۰ مگاهرتز برابر ۲۰ دسی‌بل در هر ۱۰۰ متر باشد، مفهوم آن این است که سیگنال پس از عبور از ۱۰۰ متر کابل، در شرایط تطبیق مناسب، به اندازه ۲۰ دسی‌بل تضعیف می‌شود.

اهمیت افت کابل در طراحی شبکه آنتن مرکزی

افت کابل در طراحی شبکه‌های MATV و SMATV از چند جهت اهمیت دارد:

۱. کنترل سطح سیگنال در پریزهای مشترکین

در ساختمان‌های بلندمرتبه، طول کابل‌های رایزر و انشعاب‌ها ممکن است قابل‌توجه باشد. اگر افت مسیر به‌درستی محاسبه نشود، سطح سیگنال در برخی پریزها ممکن است کمتر از محدوده موردنیاز تجهیزات گیرنده باشد.

۲. ایجاد اختلاف سطح بین کانال‌های مختلف

افت کابل با فرکانس افزایش می‌یابد. بنابراین، در یک مسیر مشخص، کانال‌های فرکانس بالا معمولاً افت بیشتری نسبت به کانال‌های فرکانس پایین دارند.

این اختلاف سطح را باید در طراحی شیب تقویت‌کننده‌ها و تنظیم Equalizer در نظر گرفت.

۳. تأثیر بر کیفیت دریافت سیگنال

افزایش افت کابل باعث کاهش سطح سیگنال دریافتی می‌شود. اگر سطح سیگنال در ورودی گیرنده بیش از حد کاهش یابد، نسبت سیگنال به نویز و در سیستم‌های دیجیتال کیفیت دریافت می‌تواند نامطلوب شود.

البته باید توجه داشت که افت کابل به‌تنهایی معادل افت C/N نیست؛ زیرا نتیجه نهایی به محل تقویت، نویز تجهیزات، سطح سیگنال ورودی و سایر اجزای مسیر وابسته است.

۴. اهمیت کیفیت شیلد و تطبیق امپدانس

ساختار شیلد و کیفیت اتصالات بر میزان نفوذ تداخل‌های خارجی و رفتار بازتابی کابل اثر می‌گذارند. این عوامل می‌توانند کیفیت انتقال سیگنال را تحت تأثیر قرار دهند؛ اما نباید آن‌ها را با افت عبوری کابل یکسان در نظر گرفت.

۲. ساختمان کابل کواکسیال و اجزای تشکیل‌دهنده آن

کابل کواکسیال از دو هادی هم‌محور تشکیل شده است. هادی مرکزی وظیفه انتقال جریان سیگنال را بر عهده دارد و هادی خارجی که معمولاً به شکل بافت فلزی و فویل ساخته می‌شود، مسیر برگشت جریان RF و حفاظ الکترومغناطیسی کابل را تشکیل می‌دهد.

اجزای اصلی کابل کواکسیال عبارت‌اند از:

۲-۱. هادی مرکزی (Center Conductor)

هادی مرکزی معمولاً از مس خالص (Copper) یا فولاد با روکش مس (Copper Clad Steel – CCS) ساخته می‌شود.

قطر هادی مرکزی یکی از پارامترهای مؤثر بر مقاومت الکتریکی و افت کابل است. در شرایط یکسان، افزایش قطر هادی می‌تواند مقاومت AC را کاهش دهد و در نتیجه سهم تلفات هادی کمتر شود.

در کابل‌های مورد استفاده برای شبکه‌های MATV وSMATV ، قطر هادی مرکزی معمولاً در محدوده حدود ۸.۰ تا ۱۳.۱ میلی‌متر یا بیشتر قرار دارد؛ مقدار دقیق آن به نوع کابل و کاربرد موردنظر بستگی دارد.

۲-۲. دی‌الکتریک (Dielectric)

ماده دی‌الکتریک بین هادی مرکزی و هادی خارجی قرار می‌گیرد و وظیفه حفظ فاصله مکانیکی و ایجاد شرایط مناسب انتشار موج الکترومغناطیسی را بر عهده دارد.

جنس و ساختار دی‌الکتریک از پارامترهای مهم طراحی کابل هستند؛ زیرا بر سرعت انتشار موج، ظرفیت خازنی، امپدانس مشخصه و تلفات کابل اثر می‌گذارند.

در کابل‌های باکیفیت معمولاً از پلی‌اتیلن فومی (Foam PE) استفاده می‌شود. ساختار فومی با وارد کردن حفره‌های هوا در ماده عایق، ثابت دی‌الکتریک مؤثر را کاهش می‌دهد و امکان دستیابی به سرعت انتشار بالاتر و خواص الکتریکی مناسب را فراهم می‌کند.

۲-۳. فویل محافظ (Shielding Foil)

فویل فلزی معمولاً از آلومینیوم یا ترکیب لایه‌های فلزی و پلی‌استر ساخته می‌شود و سطح دی‌الکتریک را می‌پوشاند.

وظیفه اصلی فویل، افزایش پوشش حفاظتی و کاهش نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی خارجی به داخل کابل است.

در برخی کابل‌ها، فویل به‌صورت یک‌لایه و در برخی دیگر به شکل چندلایه استفاده می‌شود.

۲-۴. بافت فلزی شیلد (Braided Shield)

بافت شیلد از رشته‌های نازک فلزی تشکیل شده است که به‌صورت شبکه‌ای در اطراف فویل یا دی‌الکتریک قرار می‌گیرند.

جنس رشته‌ها ممکن است مس، مس قلع‌اندود یا آلومینیوم باشد.

در مشخصات کابل، تعداد رشته‌ها، قطر هر رشته و درصد پوشش بافت (Braid Coverage) اهمیت دارند.

درصد پوشش شیلد نشان می‌دهد چه مقدار از سطح مقطع خارجی کابل توسط رشته‌های بافت پوشیده شده است. افزایش پوشش بافت معمولاً باعث بهبود عملکرد حفاظتی کابل می‌شود.

۲-۵. لایه‌های محافظ اضافی

در برخی کابل‌ها از چند لایه فویل و بافت فلزی استفاده می‌شود. این ساختارها با نام‌هایی مانند Double Shield ، Triple Shieldو Quad Shield شناخته می‌شوند.

هدف اصلی این ساختارها افزایش Screening Effectiveness و کاهش نفوذ تداخل‌های الکترومغناطیسی است.

نکته مهم این است که افزایش تعداد لایه‌های شیلد الزاماً به معنای کاهش افت عبوری کابل نیست. افت کابل به مقاومت مؤثر هادی‌ها، هندسه کابل و تلفات دی‌الکتریک وابسته است. بنابراین، تعداد شیلدها و مقدار Attenuation باید به‌صورت دو مشخصه مستقل بررسی شوند.

۲-۶. روکش خارجی (Outer Jacket)

روکش خارجی وظیفه حفاظت مکانیکی و محیطی کابل را بر عهده دارد.

جنس روکش معمولاً PVC یا مواد پلیمری دیگر است. نوع روکش باید با شرایط نصب کابل، از جمله نصب داخلی، فضای باز، مسیرهای دارای رطوبت یا الزامات ایمنی حریق، متناسب باشد.

در انتخاب کابل برای پروژه‌های ساختمانی، علاوه بر مشخصات الکتریکی باید مقاومت روکش در برابر شرایط محیطی و الزامات ایمنی نیز بررسی شود.

۳. مشخصات الکتریکی مهم کابل کواکسیال

برای انتخاب و مقایسه کابل‌های کواکسیال، فقط دانستن قطر کابل یا تعداد رشته‌های شیلد کافی نیست. چند مشخصه الکتریکی و حفاظتی باید به‌صورت هم‌زمان بررسی شوند.

۳-۱. امپدانس مشخصه (Characteristic Impedance)

امپدانس مشخصه یکی از مهم‌ترین پارامترهای کابل کواکسیال است.

در شبکه‌های MATV وSMATV ، امپدانس نامی کابل‌ها و تجهیزات معمولاً ۷۵ اهم است. تطبیق امپدانس بین کابل، تقسیم‌کننده‌ها، تپ‌آف‌ها، تقویت‌کننده‌ها و تجهیزات انتهایی برای جلوگیری از بازتاب سیگنال اهمیت دارد.

برای یک خط کواکسیال ایده‌آل با دی‌الکتریک همگن، امپدانس مشخصه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z_0 = (60 / \sqrt{\varepsilon_r}) \times \ln(b/a)$$

که در آن:

- Z_0 : امپدانس مشخصه برحسب اهم
- ε_r : ثابت دی‌الکتریک نسبی ماده عایق
- a : شعاع هادی مرکزی
- b : شعاع داخلی هادی خارجی

این رابطه نشان می‌دهد که امپدانس مشخصه به نسبت ابعاد هندسی هادی‌ها و خواص الکتریکی دی‌الکتریک وابسته است.

بنابراین، تغییر قطر مغزی، ضخامت دی‌الکتریک یا جنس ماده عایق می‌تواند امپدانس مشخصه کابل را تغییر دهد.

۲-۳. ضریب سرعت انتشار (Velocity Factor)

سرعت انتشار موج در کابل کواکسیال کمتر از سرعت نور در خلأ است.

نسبت سرعت انتشار موج در کابل به سرعت نور در خلأ را Velocity Factor یا VF می‌نامند.

$$\mathbf{VF = v_p / c}$$

بنابراین:

$$\mathbf{v_p = VF \times c}$$

که در آن:

- **v_p:سرعت انتشار موج در کابل**
- **c:سرعت نور در خلأ، تقریباً $C= 3x10^8$ m/s متر بر ثانیه**
- **VF:ضریب سرعت انتشار**

برای مثال، اگر ضریب سرعت یک کابل برابر 0.82 باشد، سرعت انتشار موج در آن برابر است با:

$$v_p = 0.82 \times 3x10^{8} \approx 2.46 \times 10^{8} \quad m/s$$

ضریب سرعت به خواص دی‌الکتریک کابل وابسته است و در محاسبات تأخیر انتشار و طول الکتریکی مسیر کاربرد دارد.

۳-۳. ظرفیت خازنی (Capacitance)

بین هادی مرکزی و هادی خارجی کابل کواکسیال، به دلیل وجود ماده دی‌الکتریک، ظرفیت خازنی تشکیل می‌شود.

ظرفیت خازنی کابل معمولاً برحسب pF/m اعلام می‌شود.

این پارامتر با هندسه کابل و ثابت دی‌الکتریک ماده عایق ارتباط دارد و در کنار Velocity Factor می‌تواند برای بررسی سازگاری مشخصات الکتریکی کابل مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۴. افت کابل (Attenuation)

افت کابل نشان‌دهنده میزان تضعیف سیگنال در طول مسیر است و معمولاً برحسب dB/100m در فرکانس‌های مختلف اعلام می‌شود.

این مشخصه یکی از مهم‌ترین معیارهای مقایسه کابل‌ها در طراحی شبکه‌های MATV و SMATV است.

هنگام بررسی دیتاشیت باید توجه داشت که مقدار افت در فرکانس‌های مختلف متفاوت است. بنابراین، مقایسه دو کابل فقط بر اساس یک مقدار افت، بدون توجه به فرکانس اندازه‌گیری، ممکن است نتیجه نادرستی ایجاد کند.

۳-۵. بازگشت سیگنال (Return Loss)

Return Lossنشان‌دهنده میزان بازگشت سیگنال در اثر ناپیوستگی امپدانس در طول مسیر است.

این مشخصه معمولاً برحسب dB بیان می‌شود.

هرچه مقدار Return Loss بیشتر باشد، میزان بازتاب سیگنال کمتر است.

برای مثال، مقدار Return Loss برابر 28 dB نشان‌دهنده تطبیق بهتر و بازتاب کمتر نسبت به مقدار 20 dB است.

برای مقایسه نمونه‌های بررسی‌شده، در اطلاعات اعلام‌شده:

- Fracarro: مقدار بیش از 28 dB در محدوده 470 تا 862 MHz
- Televes T100plus: حدود 20 dB در همان محدوده فرکانسی

این اعداد باید با توجه به روش آزمون، محدوده فرکانسی و شرایط اندازه‌گیری سازنده تفسیر شوند.

۳-۶. کارایی حفاظتی شیلد (Screening Attenuation)

کارایی حفاظتی شیلد نشان می‌دهد کابل تا چه اندازه می‌تواند از نفوذ تداخل الکترومغناطیسی خارجی به داخل مسیر سیگنال جلوگیری کند.

این مشخصه با افت عبوری کابل متفاوت است.

در دیتاشیت‌ها ممکن است مقادیر Screening Attenuation برحسب dB و در محدوده‌های فرکانسی مختلف اعلام شود.

همچنین برخی کابل‌ها در کلاس‌های حفاظتیA ، +A و کلاس‌های دیگر طبقه‌بندی می‌شوند. برای مقایسه دقیق، باید مقدار عددی و استاندارد آزمون نیز بررسی شود؛ زیرا صرفاً نام کلاس برای تحلیل کامل عملکرد کافی نیست.

استاندارد EN 50117 از مراجع مرتبط با الزامات و روش‌های آزمون کابل‌های کواکسیال مورد استفاده در شبکه‌های ارتباطی است.

۳-۷. مقاومت DC هادی‌ها

مقاومت DC هادی مرکزی و هادی خارجی بر افت ولتاژ در مسیر تغذیه تجهیزات اثر می‌گذارد.

این موضوع در سیستم‌های ماهواره‌ای که گیرنده از طریق کابل کواکسیال ولتاژ موردنیاز LNB را تأمین می‌کند، اهمیت ویژه‌ای دارد.

در مسیرهای طولانی، استفاده از کابل دارای مقاومت DC بالا می‌تواند باعث کاهش ولتاژ رسیده به LNB شود.

بنابراین، هنگام انتخاب کابل ماهواره‌ای، علاوه بر افت RF باید مقاومت DC هادی مرکزی و مسیر برگشت نیز بررسی شود.

۳-۸. طبقه‌بندی واکنش در برابر آتش (CPR)

در پروژه‌های ساختمانی، مشخصات ایمنی حریق کابل نیز اهمیت دارد.

طبقه‌بندی CPR بر اساس الزامات استاندارد EN 50575 انجام می‌شود و ویژگی‌هایی مانند واکنش کابل در برابر آتش، میزان تولید دود، قطرات شعله‌ور و اسیدیته گازهای حاصل از احتراق را در نظر می‌گیرد.

از جمله کلاس‌های قابل مشاهده در دیتاشیت کابل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- Eca
- B2ca
- s1a
- d1
- a1

انتخاب کلاس مناسب باید بر اساس مقررات ساختمانی و الزامات پروژه انجام شود.

۴. بررسی و مقایسه مشخصات فنی کابل‌های کواکسیال

برای انتخاب کابل مناسب در شبکه‌های MATV وSMATV ، بررسی مشخصات فیزیکی و الکتریکی کابل اهمیت زیادی دارد. قطر هادی مرکزی، جنس دی‌الکتریک، ساختار فویل و بافت شیلد، مقاومت DC و میزان افت در فرکانس‌های مختلف از جمله پارامترهایی هستند که باید در کنار یکدیگر بررسی شوند.

در این بخش، مشخصات چند نمونه کابل از سازندگانTeleves ، Fracarro و FTE مقایسه شده است.

۴-۱. مقایسه ساختار فیزیکی کابل‌ها

جدول زیر برخی از مشخصات ساختاری کابل‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

Specifications	Televes SK100 Plus	Televes CXT-1	Televes T100plus	Fracarro PAS4007111	Fracarro PAS4008251	FTE K121EW
Product Code	413705	2127	214102	PAS4007111	287618	K121EW
Central Conductor Material	Pure Copper	CCS	Pure Copper	Pure Copper	Pure Copper	CCS
Central Conductor Diameter	1.0 mm	1.0 mm	1.13 mm	1.13 mm	1.16 mm	Information not available
DC Resistance of Central Conductor	20.7 Ω/km	Less than 120 Ω/km	Less than 20 Ω/km	21 Ω/km	21 Ω/km	Information not available
Dielectric Material	Foam PE	Foam PE	Foam PE	Foam PE	Foam PE	Information not available
Dielectric Diameter	4.6 mm	4.7 mm	4.8 mm	4.8 mm	4.6 mm	Information not available
Shield Construction	Al/PET/Al foil and tinned copper braid	Al/PET foil and aluminum braid	Cu/PET foil and copper braid	Triple-layer construction with CuSn foil and braid	Triple-layer construction with CuSn foil and braid	Al/PET/Al foil and aluminum braid
DC Resistance of Shield Braid	13 Ω/km	Less than 30 Ω/km	Less than 12 Ω/km	Information not available	Information not available	Information not available
Overall Cable Diameter	6.7 mm	6.7 mm	6.6 mm	6.8 mm	7.1 mm	5 mm

Specifications	Televes SK100 Plus	Televes CXT-1	Televes T100plus	Fracarro PAS4007111	Fracarro PAS4008251	FTE K121EW
Declared Screening Effectiveness	94–100 dB	81–86 dB	More than 85 dB	More than 95 dB	More than 95 dB	More than 85 dB
Declared Screening Class	A+	A	A	A	A	A
CPR Class	Not stated in the reviewed information	Not stated in the reviewed information	Eca	Eca	B2ca,s1a,d1,a1	Not stated in the reviewed information

توضیحات تکمیلی جدول:

۱. CCS مخفف Copper Clad Steel است و به هادی فولادی با روکش مس اشاره دارد.

۲. CuSn به معنای مس قلع‌اندود است.

۳. Al/PET/Al و مس/PET به ساختارهای فویل چندلایه اشاره دارند که در آن‌ها لایه فلزی و پلی‌استر به‌صورت ترکیبی استفاده شده‌اند.

۴. اطلاعات کابل FTE K۱۲۱EW در جدول حاضر بر اساس مشخصات موجود در منبع فروش Elettronew تنظیم شده است و برای انتشار نهایی مقاله بهتر است با دیتاشیت رسمی سازنده FTE تطبیق داده شود.

۵. در مواردی که اطلاعات مقاومت DC یا ابعاد در منبع بررسی‌شده موجود نبوده، از درج مقدار تخمینی خودداری شده است.

نکته مهندسی درباره ساختار شیلد

تعداد فویل‌ها و لایه‌های بافت شیلد یکی از عوامل مؤثر بر کارایی حفاظتی کابل است؛ اما افزایش تعداد لایه‌های شیلد الزاماً باعث کاهش افت عبوری کابل نمی‌شود.

برای مثال، یک کابل با دو لایه بافت و سه فویل ممکن است در برابر نفوذ تداخل‌های خارجی عملکرد حفاظتی بهتری از یک کابل تک‌شیلد داشته باشد؛ اما برای اثبات کمتر بودن Attenuation باید مقدار افت عبوری آن در فرکانس‌های یکسان اندازه‌گیری یا با دیتاشیت معتبر مقایسه شود.

بنابراین، در انتخاب کابل باید دو مشخصه زیر جداگانه بررسی شوند:

- Attenuation: میزان افت سیگنال در طول کابل
- Screening Attenuation: میزان تضعیف تداخل الکترومغناطیسی توسط ساختار شیلد

۲-۴. مقایسه افت فرکانسی کابل‌ها

یکی از مهم‌ترین معیارهای انتخاب کابل، مقدار افت آن در فرکانس‌های مورد استفاده در شبکه است.

در شبکه‌های تلویزیونی زمینی، معمولاً محدوده فرکانسی تا 862 MHz اهمیت دارد؛ در حالی که در سیستم‌های ماهواره‌ای، محدوده فرکانسی IF می‌تواند تا 2150 MHz ادامه پیدا کند.

بنابراین، مقایسه کابل‌ها باید در هر دو محدوده انجام شود.

جدول زیر مقادیر افت اعلام‌شده یا تخمین‌زده‌شده از اطلاعات فنی کابل‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول افت کابل‌ها برحسب dB/100m

Cable Type	200 MHz	470–500 MHz	800–862 MHz	1000 MHz	1750 MHz	2150 MHz
Televes SK100 Plus	8.9	12.69 (460 MHz)	19.05 (860 MHz)	21.0	28.0	31.5
Televes CXT-1	9.0	15.0 (500 MHz)	20.0 (800 MHz)	23.0	32.0	35.81*
Televes T100plus	8.0	13.0 (500 MHz)	17.0 (862 MHz)	19.0	25.0	27.0
Fracarro PAS4007111	8.0	12.6 (470 MHz)	16.8 (800 MHz)	18.9	25.5	28.7
Fracarro PAS4008251	9.0	13.0 (470 MHz)	19.0 (800 MHz)	20.9	29.6	33.4
FTE K121EW	—	17.35 (470 MHz)	23.98 (862 MHz)	—	34.89	38.98

*مقدار 35.81 dB/100m برای کابل Televes CXT-1 در 2150 MHz از درون‌یابی بین مقادیر اعلام‌شده در 2050 MHz و 2300 MHz به دست آمده است.

توجه به فرکانس‌های مرجع:

مقادیر داخل پرانتز، فرکانس واقعی نقطه‌ای هستند که مقدار افت از آن استخراج شده است. بنابراین، اعداد جدول در همه ردیف‌ها دقیقاً در فرکانس یکسان اندازه‌گیری نشده‌اند.

برای مقایسه کاملاً دقیق، باید مقادیر همه کابل‌ها در فرکانس‌های یکسان و با روش آزمون یکسان در دسترس باشند. این جدول برای مقایسه اولیه و بررسی روند افت مناسب است، اما نباید آن را جایگزین مقایسه آزمایشگاهی یا دیتاشیت کامل سازندگان دانست.

۳-۴. بررسی تأثیر قطر و ساختار کابل بر افت فرکانسی

یکی از برداشت‌های نادرست در انتخاب کابل این است که تصور شود هرچه قطر خارجی کابل بیشتر باشد، افت فرکانسی آن الزاماً کمتر خواهد بود.

در واقع، قطر خارجی به‌تنهایی معیار مناسبی برای تعیین کیفیت انتقال سیگنال نیست.

برای مثال، دو کابل Fracarro زیر را در نظر بگیریم:

- PAS4007111 با قطر خارجی 6.8 میلی‌متر
- PAS4008251 با قطر خارجی 7.1 میلی‌متر

با وجود اینکه قطر خارجی کابل دوم بیشتر است، مقادیر افت اعلام‌شده آن در فرکانس‌های مورد بررسی لزوماً کمتر نیست.

در فرکانس :800 MHz

- PAS4007111: برابر 8.16 dB/100m.
- PAS4008251: برابر 19 dB/100m

در نتیجه، کابل با قطر خارجی بیشتر در این نقطه فرکانسی افت بیشتری نشان می‌دهد.

این تفاوت را نمی‌توان فقط به قطر دی‌الکتریک یا قطر خارجی نسبت داد؛ زیرا قطر هادی مرکزی، ساختار شیلد، جنس مواد و سایر مشخصات الکتریکی نیز در افت کابل نقش دارند.

بنابراین، برای انتخاب کابل مناسب باید به مقادیر واقعی Attenuation در دیتاشیت توجه کرد، نه صرفاً به ظاهر یا قطر خارجی آن.

جمع‌بندی بخش مقایسه کابل‌ها

بررسی مشخصات کابل‌های مختلف نشان می‌دهد که هیچ‌یک از پارامترهای فیزیکی به‌تنهایی نمی‌تواند معیار قطعی انتخاب کابل باشد.

برای انتخاب کابل در شبکه‌های MATV و SMATV باید مجموعه‌ای از مشخصات شامل موارد زیر بررسی شود:

- جنس و قطر هادی مرکزی
- جنس و ابعاد دی‌الکتریک
- مقاومت DC هادی مرکزی و شیلد
- ساختار فویل و بافت شیلد
- میزان Screening Attenuation
- مقدار افت در فرکانس‌های مورد استفاده
- Return Loss
- شرایط محیطی و کلاس ایمنی کابل

در نهایت، کابل مناسب کابلی است که در محدوده فرکانسی و شرایط نصب پروژه، افت قابل‌قبول، تطبیق امپدانس مناسب، حفاظت کافی در برابر تداخل و مشخصات مکانیکی و ایمنی متناسب با کاربرد داشته باشد.

۵. چرا افت کابل کواکسیال با افزایش فرکانس بیشتر می‌شود؟

افت سیگنال در کابل کواکسیال تابعی از فرکانس است؛ به این معنا که با افزایش فرکانس، معمولاً مقدار تضعیف سیگنال در واحد طول کابل افزایش پیدا می‌کند. این رفتار عمدتاً ناشی از دو سازوکار فیزیکی است:

۱. افزایش تلفات هادی‌ها به دلیل اثر پوستی (Skin Effect).
۲. افزایش تلفات دی‌الکتریک در عایق بین هادی مرکزی و هادی خارجی.

۵-۱. اثر پوستی (Skin Effect)

با افزایش فرکانس جریان متناوب، توزیع جریان در سطح مقطع هادی یکنواخت باقی نمی‌ماند و جریان بیشتر در ناحیه‌ای نزدیک به سطح هادی متمرکز می‌شود.

عمق نفوذ جریان یا Skin Depth از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\delta = \sqrt{(2 / (\omega \times \mu \times \sigma))}$$

که در آن:

- δ: عمق پوستی (عمق نفوذ جریان RF در مقطع هادی) بر حسب متر
- ω: فرکانس زاویه‌ای بر حسب rad/s
- μ: نفوذپذیری مغناطیسی هادی
- σ: رسانایی الکتریکی هادی

برای مس در دمای حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد، مقادیر تقریبی عمق نفوذ عبارت‌اند از:

Frequency	Skin Depth in Copper
5 MHz	29.6 µm
862 MHz	2.25 µm
2150 MHz	1.43 µm

این مقادیر نشان می‌دهند که در فرکانس‌های بالای شبکه‌های ماهواره‌ای، جریان RF در لایه بسیار نازکی از سطح هادی جریان دارد.

در نتیجه، سطح مؤثر عبور جریان کاهش یافته و مقاومت AC هادی نسبت به مقاومت DC افزایش پیدا می‌کند. این پدیده یکی از عوامل اصلی افزایش افت کابل در فرکانس‌های بالا است.

۵-۲. تلفات دی‌الکتریک

عایق بین هادی مرکزی و هادی خارجی، حتی در شرایطی که از مواد با کیفیت مناسب ساخته شده باشد، کاملاً بدون تلفات نیست.

در میدان الکتریکی متناوب، بخشی از انرژی الکترومغناطیسی در ماده دی‌الکتریک به گرما تبدیل می‌شود. این تلفات به عواملی مانند ضریب تلفات دی‌الکتریک (Tangent Loss) ، فرکانس و هندسه کابل وابسته است.

در یک مدل تقریبی، تلفات هادی با $\sqrt{f}$ و تلفات دی‌الکتریک تقریباً متناسب با f افزایش پیدا می‌کند.

بنابراین می‌توان وابستگی افت کابل به فرکانس را به‌صورت تقریبی با رابطه زیر نمایش داد:

$$\alpha(f) \approx k_1 \times \sqrt{f} + k_2 \times f$$

که در آن:

- $\alpha(f)$: ضریب تضعیف کابل در فرکانس f
- k_1: ضریب وابسته به تلفات هادی
- k_2: ضریب وابسته به تلفات دی‌الکتریک

این رابطه یک مدل تقریبی مهندسی است و ضرایب آن باید با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری یا مشخصات سازنده برای کابل موردنظر تعیین شوند. بنابراین نباید آن را یک رابطه عمومی و دقیق برای تمام کابل‌های کواکسیال در نظر گرفت.

۳-۵. تأثیر جنس هادی مرکزی؛ مس در برابر CCS

یکی از تفاوت‌های مهم کابل‌های کواکسیال، جنس هادی مرکزی است.

در کابل تمام‌مسی(Solid Copper) ، هادی مرکزی از مس ساخته شده است؛ اما در کابلCCS ، هادی از فولاد با روکش مسی تشکیل می‌شود.

در فرکانس‌هایRF ، به دلیل اثر پوستی، بخش عمده جریان در لایه سطحی هادی جریان دارد. بنابراین ضخامت و کیفیت لایه مسی در کابل CCS اهمیت زیادی دارد.

با این حال، مقاومت DC کابل CCS معمولاً به‌مراتب بیشتر از کابل تمام‌مسی است. این موضوع به‌ویژه در مسیرهایی که قرار است جریان تغذیه تجهیزات، مانندLNB ، از طریق کابل عبور کند اهمیت پیدا می‌کند.

برای نمونه، در مشخصات دو کابل مورد بررسی:

- Televes SK100 Plus:مقاومت هادی مرکزی حدود 20.7 Ω/km
- Televes CXT-1:مقاومت هادی مرکزی کمتر از 120 Ω/km

بنابراین حتی با در نظر گرفتن حد بالای اعلام‌شده برایCXT-1 ، مقاومت DC هادی مرکزی آن می‌تواند بیش از ۵ برابر مقدار کابل SK100 Plus باشد.

نکته مهم این است که مقایسه مقاومت DC به‌تنهایی برای تعیین افت RF کافی نیست؛ زیرا در فرکانس‌های بالا، مقاومتAC ، ضخامت روکش مسی، هندسه هادی و ساختار هادی خارجی نیز در تلفات مؤثر هستند.

---

۶. روش محاسبه افت کابل کواکسیال

برای محاسبه افت کابل، ابتدا باید مقدار تضعیف کابل در فرکانس کاری مشخص باشد. این مقدار معمولاً در دیتاشیت سازنده بر حسب dB/100m ارائه می‌شود.

اگر ضریب تضعیف کابل در فرکانس موردنظر α و طول کابل ℓ باشد، افت کابل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{cable} = \alpha(f) \times (\ell / 100)$$

که در آن:

- L_cable: افت کل کابل بر حسب dB
- $\alpha(f)$: تضعیف کابل در فرکانس موردنظر بر حسب dB/100m
- ℓ: طول کابل بر حسب متر

۱-۶. محاسبه افت در فرکانس‌های درج‌نشده در دیتاشیت

گاهی فرکانس موردنظر دقیقاً در جدول سازنده وجود ندارد. در این شرایط می‌توان از روش درون‌یابی (Interpolation) استفاده کرد.

برای تقریب رفتار افت کابل در فاصله بین دو نقطه اندازه‌گیری، می‌توان از مدل توانی زیر استفاده کرد:

$$\alpha(f) = \alpha_1 \times (f / f_1)^p$$

که توان p از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p = \ln(\alpha_2 / \alpha_1) / \ln(f_2 / f_1)$$

در این روابط:

- f_1 و f_2: دو فرکانس مرجع
- α_1 و α_2: مقادیر افت متناظر با این دو فرکانس
- f: فرکانس موردنظر و $\alpha(f)$ متناظر با افت کابل در فرکانس f
- p: توان تجربی حاصل از دو نقطه داده (توان تجربی مدل، بیانگر شیب تغییرات افت نسبت به فرکانس در مقیاس لگاریتمی)

دقیقاً p چیست؟

توان p نه توان الکتریکی است، نه توان سیگنال و نه ضریب تلفات به‌تنهایی.

این پارامتر، شیب تغییرات افت کابل نسبت به فرکانس در نمودار لگاریتمی–لگاریتمی (Log-Log) است.

برای درک بهتر، رابطه اصلی را به فرم لگاریتمی تبدیل می‌کنیم:

$$\ln \alpha(f) = \ln \alpha_1 + p \times \ln(f / f_1)$$

بنابراین:

$$p = \Delta \ln(\alpha) / \Delta \ln(f)$$

یعنی p نشان می‌دهد با افزایش نسبی فرکانس، افت کابل با چه نرخ نسبی تغییر می‌کند.

چرا به آن توان تجربی می‌گوییم؟

چون مقدار آن را از داده‌های واقعی دیتاشیت یا اندازه‌گیری کابل استخراج می‌کنیم؛ مقدار ثابتی نیست که برای تمام کابل‌ها برابر باشد.

برای مثال، فرض کنید مشخصات یک کابل چنین باشد:

افت کابل	فرکانس
21 dB/100m	1000 MHz
31.5 dB/100m	2150 MHz

در نتیجه:

$$p = \ln(31.5 / 21) / \ln(2150 / 1000)$$

$$p \approx 0.530$$

حالا اگر بخواهیم افت را در فرکانس 1500 MHz تخمین بزنیم:

$$\alpha(1500) = 21 \times (1500 / 1000)^{0.530}$$

$$\alpha(1500) \approx 25.9 \text{ dB/100m}$$

این مقدار تخمینی است، نه مقدار اندازه‌گیری‌شده سازنده.

.تفسیر فیزیکی مقدارp

در کابل کواکسیال، افت کلی از دو مؤلفه اصلی تشکیل می‌شود:

- **تلفات هادی‌ها(Conductor Loss)**
- **تلفات دی‌الکتریک(Dielectric Loss)**

در شرایط متعارف، مؤلفه تلفات هادی به دلیل اثر پوستی (Skin Effect) تقریباً متناسب با $\sqrt{f}$ افزایش می‌یابد؛ در حالی که رفتار تلفات دی‌الکتریک به خواص ماده عایق و فرکانس وابسته است.

به همین دلیل، توان مؤثر p در یک بازه فرکانسی مشخص می‌تواند با کابل دیگر متفاوت باشد.

.نکته مهم مهندسی

این مدل یک تقریب توانی در بازه فرکانسی مورد بررسی است و نباید آن را قانون عمومی رفتار تمام کابل‌ها بدانیم .همچنین اگر فرکانس هدف خارج از دو نقطه مرجع باشد، دیگر با درون‌یابی خطی (Linear Interpolation) روبه‌رو نیستیم، بلکه برون‌یابی خطی(Linear Extrapolation) انجام می‌دهیم که عدم‌قطعیت بیشتری دارد.

این روش برای تخمین بین دو نقطه داده مناسب است، اما نباید آن را جایگزین داده واقعی سازنده یا اندازه‌گیری آزمایشگاهی دانست.

۶-۲. محاسبه شیب کابل Cable Tilt

در شبکه‌های MATV وSMATV ، یکی از مسائل مهم، اختلاف افت سیگنال در فرکانس‌های پایین و بالا است.

به دلیل افزایش افت کابل با فرکانس، سیگنال‌های فرکانس بالاتر پس از عبور از یک مسیر مشترک معمولاً تضعیف بیشتری پیدا می‌کنند.

اختلاف افت بین دو فرکانس را می‌توان با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$Tilt = [\alpha(f_H) - \alpha(f_L)] \times (\ell / 100)$$

که در آن:

- f_H: فرکانس بالاتر
- f_L: فرکانس پایین‌تر
- ℓ: طول مسیر کابل

مقدار Tilt بر حسب dB بیان می‌شود.

این پارامتر در طراحی شبکه‌های آنتن مرکزی اهمیت دارد؛ زیرا در مسیرهای طولانی ممکن است اختلاف سطح سیگنال بین کانال‌های پایین و بالا قابل‌توجه شود.

۶-۳. تبدیل واحدهای موردنیاز

در محاسبات مهندسی شبکه‌هایRF ، تبدیل صحیح واحدها اهمیت زیادی دارد.

تبدیل Neper به:Decibel

$$1\ Np = 8.686\ dB$$

تبدیل افت کابل:

$$\alpha(dB/m) = \alpha(dB/100m) / 100$$

تبدیل سطح سیگنال dBµV به dBm برای امپدانس ۷۵ اهم:

$$dBm = dB\mu V - 108.75$$

این رابطه برای توان متناظر با ولتاژ RMS در بار مقاومتی ۷۵ اهم به کار می‌رود.

۶-۴. ارتباط Return Loss و ضریب بازتاب

در بررسی تطبیق امپدانس کابل و اتصالات، ضریب بازتاب ولتاژ (Reflection Coefficient) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$|\Gamma| = 10^{(-RL/20)}$$

و نسبت موج ایستاده ولتاژ (VSWR) برابر است با:

$$VSWR = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|)$$

برای مثال، اگر Return Loss برابر 20 dB باشد:

$$|\Gamma| = 10^{(-20/20)} = 0.1$$

بنابراین:

$$VSWR = 1.1 / 0.9 \approx 1.22$$

در این شرایط، نسبت توان بازتاب‌شده به توان فرودی برابر با $|\Gamma|^2$ است؛ بنابراین:

$$P_{reflected} / P_{incident} = 0.01$$

یعنی حدود یک درصد توان فرودی بازتاب می‌شود.

۷. مثال‌های محاسباتی و کاربردی

مثال ۱: محاسبه افت کابل Televes SK100 Plus در طول ۴۵ متر

فرض کنید از کابل Televes SK100 Plus به طول ۴۵ متر در یک مسیر UHF استفاده شده و فرکانس کاری برابر با 862 MHz باشد.

طبق جدول مشخصات کابل:

- افت در 860 MHz برابر 19.05 dB/100m
- افت در 1000 MHzبرابر 21 dB/100m

برای فرکانس 862 MHz ، مقدار افت بسیار نزدیک به مقدار ثبت‌شده در 860 MHz است. با درون‌یابی توانی، مقدار تقریبی زیر به دست می‌آید:

$$\alpha(862) \approx 19.08 \text{ dB/100m}$$

افت کل کابل:

$$L = 19.08 \times (45 / 100)$$

$$L \approx 8.59 \text{ dB}$$

بنابراین افت تقریبی کابل در طول ۴۵ متر و فرکانس 862 MHz برابر با 8.59 dB خواهد بود.

مثال ۲: بررسی اختلاف افت کانال‌های VHF و UHF در یک مسیر ۶۰ متری

فرض کنید در یک شبکهMATV ، سیگنال دو کانال از یک مسیر کابل ۶۰ متری عبور می‌کند:

- کانال E5 با فرکانس مرکزی 177.5 MHz
- کانال UHF 48 با فرکانس مرکزی 690 MHz

برای کابلSK100 Plus ، با استفاده از داده‌های جدول و درون‌یابی، مقادیر تقریبی زیر به دست می‌آیند:

Parameter	E5 Channel	UHF 48 Channel
Center Frequency	177.5 MHz	690 MHz
Approximate Cable Attenuation	8.37 dB/100m	16.51 dB/100m
Cable Length	60 m	60 m
Total Attenuation	5.02 dB	9.91 dB

اختلاف افت دو کانال:

$$\text{Tilt} = 9.91 - 5.02$$

$$\text{Tilt} \approx 4.89 \text{ dB}$$

اگر سطح سیگنال ورودی هر دو کانال 90 dBµV باشد، سطح خروجی پس از کابل تقریباً برابر خواهد بود با:

کانال:E5

$$V_{out} = 90 - 5.02 = 84.98 \text{ dBµV}$$

کانال:UHF 48

$$V_{out} = 90 - 9.91 = 80.09\ dB\mu V$$

بنابراین کانال UHF در خروجی حدود 4.89 dB ضعیف‌تر از کانال VHF خواهد بود.

این اختلاف می‌تواند در طراحی تقویت‌کننده و تنظیم شیب فرکانسی (Slope/Equalization) اهمیت داشته باشد. برای جبران آن، باید تقویت بیشتری در ناحیه فرکانسی بالاتر اعمال شود؛ البته مقدار دقیق اصلاح به افت سایر اجزای شبکه و سطح سیگنال مجاز ورودی و خروجی تقویت‌کننده نیز وابسته است.

مثال ۳: محاسبه افت کابل در محدوده فرکانسی ماهواره

فرض کنید یک مسیر ۴۰ متری از کابل SK100 Plus برای انتقال سیگنال IF ماهواره در محدوده 950 تا 2150 MHz استفاده شده است.

طبق داده‌های کابل:

- افت در 1000 MHz برابر 21 dB/100m
- افت در 2150 MHz برابر 31.5 dB/100m

با استفاده از درون‌یابی، مقدار افت در 950 MHz تقریباً برابر است با:

$$\alpha(950) \approx 20.32\ dB/100m$$

افت در 950 MHz:

$$L_{950} = 20.32 \times 0.4$$

$$L_{950} \approx 8.13\ dB$$

افت در 2150 MHz:

$$L_{2150} = 31.5 \times 0.4$$

$$L_{2150} = 12.60\ dB$$

اختلاف افت دو انتهای باند:

$$Tilt = 12.60 - 8.13$$

$$Tilt \approx 4.47\ dB$$

بنابراین در این مسیر ۴۰ متری، سیگنال در فرکانس 2150 MHz حدود 4.47 dB بیشتر از سیگنال در فرکانس 950 MHz تضعیف می‌شود.

این موضوع در طراحی مسیرهای طولانی ماهواره‌ای و انتخاب تقویت‌کننده‌های خطی دارای شیب قابل تنظیم اهمیت دارد.

مثال ۴: مقایسه افت شش کابل در طول ۸۰ متر

در این مثال، افت تقریبی شش کابل بررسی‌شده در طول ۸۰ متر و در دو فرکانس 862 و 2150 MHz مقایسه می‌شود.

مقادیر جدول بر اساس داده‌های مشخصات سازندگان و درون‌یابی در فرکانس‌های موردنظر محاسبه شده‌اند.

Cable Type	Attenuation at 862 MHz (dB/100m)	Attenuation over 80 m (dB)	Attenuation at 2150 MHz (dB/100m)	Attenuation over 80 m (dB)
Televes SK100 Plus	19.08	15.3	31.5	25.2
Televes CXT-1	20.96	16.8	35.81	28.7
Televes T100plus	17.0	13.6	27.0	21.6
Fracarro PAS4007111	17.48	14.0	28.7	23.0
Fracarro PAS4008251	19.62	15.7	33.4	26.7
FTE K121EW	23.98	19.2	38.98	31.2

تحلیل نتایج

در فرکانس 862 MHz ، اختلاف افت بین بهترین و ضعیف‌ترین کابل جدول حدود 5.6 dB است.

در فرکانس 2150 MHz ، این اختلاف به حدود 9.6 dB می‌رسد.

بنابراین انتخاب کابل مناسب در مسیرهای طولانی ماهواره‌ای اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا اختلاف عملکرد کابل‌ها در فرکانس‌های بالاتر محسوس‌تر است.

با این حال، باید توجه داشت که برخی مقادیر جدول از فرکانس‌های نزدیک به فرکانس هدف درون‌یابی شده‌اند و داده‌های اولیه تمام کابل‌ها دقیقاً در فرکانس‌های یکسان ارائه نشده‌اند. بنابراین این جدول برای مقایسه مهندسی اولیه مناسب است، اما برای رتبه‌بندی قطعی محصولات باید داده‌های رسمی سازندگان در فرکانس‌های کاملاً یکسان بررسی شوند.

۷. مثال‌های محاسباتی و کاربردی ــ ادامه

مثال ۵: محاسبه امپدانس مشخصه کابل با استفاده از Velocity Factor و ظرفیت خازنی

یکی از روش‌های تخمین امپدانس مشخصه کابل کواکسیال، استفاده از سرعت انتشار موج (Velocity Factor) و ظرفیت خازنی واحد طول کابل (Capacitance per Unit Length) است.

برای یک خط انتقال با ساختار TEM و با فرض تلفات ناچیز، رابطه زیر برقرار است:

$$Z_0 = 1 / (VF \times c \times C')$$

که در آن:

- Z_0: امپدانس مشخصه کابل بر حسب اهم
- VF: ضریب سرعت انتشار
- c: سرعت نور در خلأ، تقریباً ۳×۱۰^۸ m/s
- C': ظرفیت خازنی واحد طول بر حسب F/m

نمونه اول: کابل Televes T100plus

فرض کنید مشخصات کابل به‌صورت زیر باشد:

- $VF = 0.82$
- $C' = 55$ pF/m

ابتدا ظرفیت خازنی را به فاراد بر متر تبدیل می‌کنیم:

$$C' = 55 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

اکنون:

$$Z_0 = 1 / (0.82 \times 3 \times 10^8 \times 55 \times 10^{-12})$$

$$Z_0 \approx 73.96\ \Omega$$

بنابراین امپدانس مشخصه تخمینی کابل حدود ۷۴ اهم است.

نمونه دوم: کابل Fracarro

با فرض مشخصات زیر:

- $VF = 0.85$
- $C' = 52$ pF/m

خواهیم داشت:

$$Z_0 = 1 / (0.85 \times 3 \times 10^8 \times 52 \times 10^{-12})$$

$$Z_0 \approx 75.5\ \Omega$$

نکته فنی

این رابطه از روابط خط انتقال بدون تلفات به دست می‌آید و برای یک ساختار TEM با پارامترهای توزیع‌شده معتبر است. در کابل واقعی، وجود تلفات هادی و دی‌الکتریک موجب مختلط شدن ثابت انتشار و امپدانس مشخصه می‌شود.

بنابراین نتیجه این محاسبه را باید یک تخمین مهندسی دانست، نه جایگزین اندازه‌گیری مستقیم امپدانس کابل با TDR یا VNA.

همچنین مقادیر VF و C′ در این مثال‌ها باید با دیتاشیت رسمی همان کابل تطبیق داده شوند؛ در صورت نبود داده رسمی، نباید نتایج را مشخصات قطعی محصول تلقی کرد.

مثال ۶: محاسبه افت ولتاژ DC در کابل تغذیه LNB

در سیستم‌های ماهواره‌ای، گیرنده از طریق کابل کواکسیال علاوه بر دریافت سیگنالRF ، ولتاژ DC موردنیاز LNB را نیز تأمین می‌کند.

در این شرایط، مقاومت DC هادی مرکزی و مسیر برگشت جریان از طریق هادی خارجی کابل، در افت ولتاژ مؤثر هستند.

فرض کنید:

- طول کابل: ۵۰ متر
- جریان مصرفیLNB: 200 mA
- مقاومت هادی مرکزی کابلSK100 Plus: 20.7 Ω/km
- مقاومت هادی خارجی کابلSK100 Plus: 13 Ω/km

مقاومت کل مسیر رفت و برگشت برابر است با:

$$R_{loop} = (20.7 + 13) \times 0.05$$

$$R_{loop} = 1.685\ \Omega$$

افت ولتاژ:

$$V_{drop} = I \times R_{loop}$$

$$V_{drop} = 0.2 \times 1.685$$

$$V_{drop} = 0.337\ V$$

بنابراین افت ولتاژ DC در این مسیر تقریباً ۰٫۳۴ ولت خواهد بود.

مقایسه با کابل CXT-1

طبق مشخصات اعلام‌شده برای کابل CXT-1:

- مقاومت هادی مرکزی: کمتر از 120 Ω/km
- مقاومت هادی خارجی: کمتر از 30 Ω/km

با استفاده از این مقادیر به‌عنوان حدود بالای مشخصات:

$$R_{loop} < (120 + 30) \times 0.05$$

$$R_{loop} < 7.5\ \Omega$$

در نتیجه، برای جریان ۲۰۰ میلی‌آمپر:

$$V_{drop} < 0.2 \times 7.5$$

$$V_{drop} < 1.5\ V$$

این مقایسه نشان می‌دهد که مقاومت DC کابل می‌تواند در انتخاب کابل برای تغذیه LNB اهمیت زیادی داشته باشد.

نکات مهندسی

۱. افت ولتاژ واقعی به جریان مصرفی LNB، طول کابل، دمای هادی و مقاومت اتصالات وابسته است.

۲. در محاسبه مسیر DC باید مقاومت هادی مرکزی و مسیر برگشت جریان هر دو لحاظ شوند.

۳. در کابل‌های دارای فویل و شیلد بافته‌شده، مسیر برگشت جریان می‌تواند از اجزای مختلف هادی خارجی عبور کند. بنابراین مقاومت مؤثر مسیر برگشت الزاماً با یک جمع ساده از مقاومت اجزای منفرد قابل تعیین نیست، مگر آنکه ساختار و نحوه اتصال آن‌ها مشخص باشد.

۴. برای مسیرهای طولانی، علاوه بر افت ولتاژ کابل، افت ولتاژ اتصالات، تقسیم‌کننده‌ها و سایر اجزای شبکه نیز باید بررسی شود.

۵. جریان مصرفی LNB ممکن است در شرایط مختلف تغییر کند؛ بنابراین محاسبه باید با جریان کاری واقعی یا حداکثر جریان موردنیاز تجهیز انجام شود.

۸. معیارهای مهندسی انتخاب کابل کواکسیال

انتخاب کابل مناسب برای شبکه‌های MATV و SMATV نباید صرفاً بر اساس قیمت، قطر خارجی یا یک مقدار مشخص افت در فرکانس پایین انجام شود.

برای انتخاب صحیح، باید مجموعه‌ای از مشخصات الکتریکی، مکانیکی و محیطی بررسی شود.

۸-۱. طول مسیر و بودجه افت (Attenuation Budget)

اولین عامل، طول مسیر کابل و مقدار افت مجاز در شبکه است.

هرچه طول کابل بیشتر باشد، افت کل مسیر افزایش پیدا می‌کند. بنابراین باید افت کابل در بالاترین فرکانس کاری شبکه بررسی شود.

برای مثال:

- در شبکه‌های زمینیVHF/UHF ، بررسی افت تا محدوده 862 MHz اهمیت دارد.
- در شبکه‌های ماهواره‌ای، باید افت در محدوده فرکانسی تا 2150 MHz نیز بررسی شود.

انتخاب کابل صرفاً بر اساس افت در فرکانس 200 یا 500 MHz می‌تواند در مسیرهای ماهواره‌ای نتیجه نامناسبی ایجاد کند.

۸-۲. جنس هادی مرکزی

کابل‌های دارای هادی تمام‌مسی (Copper) معمولاً برای مسیرهایی که علاوه بر انتقالRF ، جریان DC نیز از کابل عبور می‌کند مناسب‌تر هستند.

در مقابل، کابل‌های CCS ممکن است از نظر قیمت و برخی کاربردهای انتقال RF گزینه قابل‌قبولی باشند؛ اما مقاومت DC بالاتر آن‌ها باید در طراحی تغذیه تجهیزات لحاظ شود.

۸-۳. کیفیت شیلدینگ و مقاومت در برابر تداخل

در محیط‌هایی که منابع فرکانس رادیویی قوی وجود دارند، کیفیت شیلدینگ کابل اهمیت زیادی پیدا می‌کند.

برای مثال، در ساختمان‌هایی که فرستنده‌های موبایل، تجهیزات مخابراتی و منابع RF نزدیک به مسیر کابل قرار دارند، انتخاب کابل با مشخصات مناسب Screening Attenuation ساختار شیلد باکیفیت اهمیت بیشتری خواهد داشت.

البته تعداد لایه‌های فویل و بافت به‌تنهایی معیار کافی برای تعیین کیفیت شیلدینگ نیست. جنس، ضخامت، پوشش، پیوستگی الکتریکی و کیفیت اتصالات نیز باید بررسی شوند.

۸-۴. شرایط نصب و محیط بهره‌برداری

کابلی که برای نصب داخل ساختمان انتخاب می‌شود، الزاماً برای نصب در فضای باز یا مسیرهای زیرزمینی مناسب نیست.

موارد زیر باید بررسی شوند:

- مقاومت روکش در برابر اشعهUV
- مقاومت در برابر رطوبت

- نوع روکش PVC یاLSZH
- طبقه‌بندی CPR در صورت الزام پروژه
- مقاومت مکانیکی کابل
- حداقل شعاع خمش مجاز(Minimum Bending Radius)

برای نمونه، در مشخصات برخی کابل‌های بررسی‌شده، شعاع خمش به‌صورت زیر اعلام شده است:

Cable Type	Declared Minimum Bending Radius
Televes SK100 Plus	40 mm
Televes T100plus	33 mm
Fracarro PAS4007111	35 mm

این مقادیر باید هنگام طراحی مسیر کابل‌کشی و اجرای رایزرها رعایت شوند. خمش بیش از حد مجاز می‌تواند هندسه کابل را تغییر دهد و باعث تغییر امپدانس مشخصه، افزایش بازتاب و حتی تغییر افت شود.

۵-۸. تطبیق امپدانس و کیفیت اتصالات

در شبکه‌های MATV وSMATV ، کابل، کانکتور، تقسیم‌کننده، تپ‌آف و سایر اجزای شبکه باید از نظر امپدانس مشخصه با یکدیگر سازگار باشند.

برای شبکه‌های موردبحث، امپدانس اسمی معمولاً ۷۵ اهم است.

استفاده از کانکتور نامناسب، نصب غیراصولی یا اتصال ناقص شیلد می‌تواند موجب افزایش Return Loss و ایجاد بازتاب در مسیر شود.

بنابراین کیفیت نصب کانکتورها به‌اندازه انتخاب کابل مناسب اهمیت دارد.

۹. خطاهای رایج در انتخاب و محاسبه کابل

در طراحی و اجرای شبکه‌های آنتن مرکزی، برخی اشتباهات می‌توانند باعث افت بیش از حد سیگنال یا عملکرد نامناسب شبکه شوند.

۱. انتخاب کابل فقط بر اساس افت در فرکانس پایین

ممکن است کابلی در فرکانس 200 MHz عملکرد مناسبی داشته باشد، اما در فرکانس 2150 MHz افت بسیار بیشتری ایجاد کند. بنابراین باید محدوده کامل فرکانسی شبکه بررسی شود.

۲. انتخاب کابل صرفاً بر اساس قطر خارجی

قطر بیشتر الزاماً به معنی افت کمتر نیست. جنس هادی، قطر هادی مرکزی، نوع دی‌الکتریک، ساختار هادی خارجی و کیفیت ساخت همگی در افت نهایی تأثیر دارند.

۳. نادیده گرفتن مقاومت DC کابل

در مسیرهایی که تغذیه DC تجهیزات از طریق کابل انجام می‌شود، مانند تغذیهLNB ، مقاومت DC اهمیت ویژه‌ای دارد. انتخاب کابل با مقاومت بالا ممکن است موجب کاهش ولتاژ دریافتی تجهیز شود.

۴. توجه نکردن به افت سایر اجزای شبکه

افت نهایی مسیر فقط مربوط به کابل نیست. کانکتورها، تقسیم‌کننده‌ها، تپ‌آف‌ها، فیلترها و سایر اجزای شبکه نیز باید در بودجه افت لحاظ شوند.

۵. اجرای کابل با خمش بیش از حد مجاز

فشار مکانیکی، له‌شدگی یا خمش شدید می‌تواند ساختار هندسی کابل را تغییر دهد و باعث ایجاد عدم تطبیق امپدانس و افزایش افت شود.

۶. استفاده از کابل بدون بررسی دیتاشیت

در خرید کابل باید مشخصات کامل آن، به‌خصوص افت در فرکانس‌های بالاتر، مقاومتDC ، کیفیت شیلدینگ و شرایط نصب بررسی شود.

در مواردی که دیتاشیت کامل یا رسمی در دسترس نیست، بهتر است پیش از استفاده گسترده در پروژه، نمونه کابل از نظر مشخصات الکتریکی اندازه‌گیری و ارزیابی شود.

---

۱۰. پرسش‌های ارزیابی و تمرین محاسباتی

برای بررسی میزان تسلط بر مفاهیم مطرح‌شده، پرسش‌های زیر پیشنهاد می‌شوند.

پرسش ۱

اگر از کابل Televes CXT-1 به طول ۶۰ متر استفاده شود، افت تقریبی کابل در فرکانس‌های 800 و 1000 MHzچقدر خواهد بود؟

داده‌های کابل:

- افت در 800 MHz برابر 20 dB/100m
- افت در 1000 MHzبرابر 23 dB/100m

پاسخ:

در 800 MHz:

$$L_{800} = 20 \times 0.6 = 12 \text{ dB}$$

در :1000 MHz

$L_{1000} = 23 \times 0.6 = 13.8\ dB$

پرسش ۲

اگر افت یک مسیر ۸۰ متری در فرکانس 2150 MHz برابر 28.7 dBباشد، ضریب تضعیف کابل بر حسب dB/100m چقدر است؟

پاسخ:

$\alpha = 28.7 / 0.8$

$\alpha = 35.875 \approx 35.9\ dB/100m$

پرسش ۳

چرا نمی‌توان صرفاً بر اساس قطر خارجی کابل، افت آن را تعیین کرد؟

پاسخ:

زیرا افت کابل به مجموعه‌ای از پارامترها مانند جنس و قطر هادی مرکزی، نوع دی‌الکتریک، ساختار هادی خارجی، مقاومتAC ، اثر پوستی و تلفات دی‌الکتریک وابسته است. بنابراین قطر خارجی به‌تنهایی معیار تعیین افت نیست.

پرسش ۴

تفاوت کابل تمام‌مسی و CCS از نظر انتقال سیگنال RF و تغذیه DC چیست؟

پاسخ:

در انتقالRF ، جریان عمدتاً در لایه سطحی هادی جریان دارد؛ بنابراین کیفیت و ضخامت روکش مسی در کابل CCS اهمیت دارد. اما در تغذیهDC ، جریان در کل سطح مقطع مؤثر هادی عبور می‌کند و مقاومت DC کابل CCS معمولاً بیشتر از کابل تمام‌مسی است.

در نتیجه، برای مسیرهایی که جریان DC قابل‌توجهی از کابل عبور می‌کند، مقاومت DC باید به‌طور جدی در انتخاب کابل لحاظ شود.

توضیح مهم درباره مشخصات کابل‌های معرفی‌شده در این مقاله

هدف از درج نام مدل‌ها و مشخصات تعدادی از کابل‌های کواکسیال تولیدشده توسط شرکت‌های معتبر، فراهم کردن نمونه‌های واقعی برای درک بهتر مفاهیم فنی، آشنایی با پارامترهای مؤثر بر عملکرد کابل و آموزش روش محاسبه و مقایسه افت سیگنال در فرکانس‌های مختلف بوده است.

مقادیر و مشخصات ارائه‌شده در جداول و مثال‌های این مقاله، با رویکرد آموزشی و برای روشن شدن مباحث مطرح‌شده استفاده شده‌اند و نباید به‌عنوان مرجع نهایی یا تضمین‌کننده مشخصات فنی محصولات در نظر گرفته شوند. ممکن است برخی مقادیر، بسته به نسخه محصول، مشخصات فنی اعلام‌شده در زمان تولید یا به‌روزرسانی کاتالوگ سازنده، با اطلاعات فعلی تفاوت داشته باشند.

بنابراین، چنانچه خوانندگان محترم قصد انتخاب، خرید یا استفاده از مدل مشخصی از کابل‌های معرفی‌شده را در یک پروژه اجرایی دارند، توصیه می‌شود برای دسترسی به مشخصات دقیق و به‌روز، به وب‌سایت رسمی شرکت سازنده و دیتاشیت همان محصول مراجعه کنند. همچنین می‌توانند از اطلاعات فنی سایر تولیدکنندگان معتبر کابل‌های کواکسیال استفاده کنند.

تأکید می‌شود که هدف اصلی این مقاله، آموزش اصول شناخت، محاسبه و تحلیل افت کابل کواکسیال و ارائه معیارهای مهندسی برای انتخاب کابل مناسب در شبکه‌های آنتن مرکزی است؛ نه معرفی تجاری محصولات یا انتشار فهرست قطعی مشخصات فنی آن‌ها.

۱۱. منابع و مراجع فنی

برای بررسی دقیق‌تر مشخصات کابل‌ها و مبانی نظری انتقال سیگنال در خطوط کواکسیال، منابع زیر قابل استفاده هستند:

۱- **Televes – Coaxial Cable Catalogue**

https://docs.televes.com/web/catalogo/pdf/f_coaxial_cable.pdf

۲- **Televes – T100plus Coaxial Cable**

https://www.televes.com/en/21410x-coaxial-t100-eca-t100plus-16vrtc-coaxial-cable-eca-euroclass-a-class-shielded.html

۳- **Fracarro – PAS4007111 Datasheet** .

https://fracarro.com/wp-content/uploads/product-downloadable-contents/datasheet/PAS4007111_PAS4007111_en_ds.pdf

۴- **Fracarro – PAS4008251 Datashee** .

https://fracarro.com/wp-content/uploads/product-downloadable-contents/datasheet/287618_PAS4008251_en_ds.pdf

۵- **EN 50117 – Coaxial Cables**

استاندارد مرتبط با کابل‌های کواکسیال مورد استفاده در شبکه‌های ارتباطی و توزیع سیگنال.

۶- **EN 50575 – Construction Products Regulation (CPR)**.

استاندارد مرتبط با الزامات واکنش در برابر آتش برای کابل‌های مورد استفاده در ساختمان‌ها.

۷- . **David M. Pozar – Microwave Engineering**

مرجع مبانی خطوط انتقال، امپدانس مشخصه، انتشار موج و تلفات در ساختارهای RF و.Microwave

تذکر درباره منابع :مشخصات کابل FTE K121EW در جدول مقایسه از اطلاعات منتشرشده توسط فروشنده استخراج شده است و پیش از انتشار نهایی باید با دیتاشیت رسمی سازنده تطبیق داده شود. همچنین مقادیر محاسبه شده از درون‌یابی خطی (Linear Interpolation)، جایگزین داده رسمی سازنده نیستند.