اصول طراحی سیستمهای PCM روی کابل زوجی

دکتر ناصر رضائی
استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده

هدف از این مقاله بررسی پارامترهای موثر در طرح سیستمهای PCM روی کابل زوجی است . تعداد سیستمهائی که می توانند به‌طوررضایت بخش‌روی یک کابل زوجی کار کنند ،به‌وسیله نویز همشنوائی محدود می‌شود . لذا برای بررسی این‌محدودیت ابتداهمشنوائی بین دوسیستم موردتوجه قرار گرفته وسپس براساس توزیع افت همشنوائی در کابل ، نتیجه برای تداخل n سیستم تعمیم داده‌شده . نتایج به‌دست آمده این امکان را به وجود می‌آورد که بتوان براساس اطلاعات آماری افت همشنوائی کابلهای به کار رفته در شبکه ،تعدادسیستمهای PCM را که‌می‌توان روی یک کابل قرار داد مشخص کرد یا اینکه حداقل متوسط افت همشنوائی لازم برای دستیابی به یک احتمال خطای معین در فاصله تکرار کننده را به صورت تابعی از سرعت سیستم ، تعداد سیستمها و فاصله تکرار کننده ها بیان کرد .

۱ ــ مقدمه

با توجه به ویژه‌گیهای سیستمهای رقمی (۱) [۲ و ۱] استفاده از این تکنیک در شبکه های مخابراتی روند افزایشی داشته است‌و در شبکه‌های مدرن ، سیستمهای رقمی به سرعت جای سیستمهای‌قیاسی (۲) را می‌گیرند .[۳] . هرگاه سیر طبیعی گسترش یک شبکه تلفنی را در نظر بگیریم به علت مسائل اقتصادی ،اولین‌قدم در استفاده از سیستمهای انتقال رقمی ، کاربرد سیستم PCM روی کابلهای زوجی موجود در شبکه‌به‌منظور افزایش ظرفیت ترافیکی بین مراکز است . این روندنیزبامعرفی مراکز سوئچینگ رقمی سرعت افزایش بیشتری پیداخواهد کرد . در این شرایط استفاده از یک کابل به‌منظور انتقال چند سیگنال PCM یابه عبارت دیگر افزایش تعداد سیستمهای PCM روی یک کابل موردتوجه قرار خواهد گرفت . لذا در این مقاله سعی شده پارامترهای مختلف موثر در کار چنین سیستمهائی‌معرفی‌شود وبا استفاده از آنها روابط حاکم برطراحی به‌دست‌آید .

اصولا" طرح‌هرنوع سیستم انتقال بستگی به مشخصه محیط انتقال‌آن دارد و معمولا" بقیه قسمتهای سیستم طوری انتخاب می‌شوند که بتوانند ضایعات ایجاد شده در سیگنال به وسیله محیط انتقال را به حدقابل تحمل برسانند . کابل زوجی ،کابل‌هم محور ، فضا وفیبرنوری از محیطهای‌انتقالی هستندکه‌درسیستمهای‌رقمی درسطح وسیعی به کار می‌روند .

باتوجه به تفاوت خصوصیات انتقال دراین محیطها طراحی سیستمهای مربوط ، باتوجه‌به‌مسائل‌خاص خود انجام می‌گیرد ، اگرچه در بسیاری از موارد این سیستمها وجه اشتراک دارند . به طورکلی در سیستمهای انتقال رقمی روی کابل باید موارد زیر مورد توجه قرار گیرد .

الف ــ مشخصه افت : در محیطهای انتقال سیمی‌با تقریب خوب ،افت (برحسب dB) متناسب با $\sqrt{f}$ است [۲۴ و ۵ و ۴] .

ب ــ فرکانس‌قطع پائین : در سیستمهای کابلی‌معمولا" تغذیه تکرار کننده های بین راه از طریق محیط انتقال انجام می‌گیرد . به همین دلیل ورودی‌وخروجی تکرار کننده‌ها به ترانسفور ماتورهای تزویج ac مجهزند . این شرایط باعث به وجود آمدن یک فرکانس قطع پائین در مشخصه خط انتقال می‌شودکه‌انتقال‌سیگنال‌رابامحدودیت‌روبرومی‌کند[۵ و ۴] . این محدودیت استفاده از کد کانال (۳) ویا در بعضی موارد استفاده ازنوعی متعادل کننده (۴) در سیستم را ضرروی می‌سازد [۲۹ و ۶] .

ج ــ نویز حرارتی : این مولفه از نویز که در عناصر فعال وغیر فعال سیستم ایجاد می‌شود ، جزء جدانشدنی و

1-Digital 2- Analogue 3- Channel coding or Transmission Coding
4- Quantized Feedback Equalizer

وناخواسته سیگنال کانال است ومقدار آن بستگی به ترکیب سیستم دارد .

د ـ همشنوائی [۱] : در کابلهای زوجی که تعداد زیادی زوج سیم در کناریکدیگر قرار گرفته‌اند ، سیگنال انتقالی از طریق هرکدام از زوج سیمها تحت تاثیر همشنوائی ناشی از زوج سیمهای دیگر قرار می‌گیرد . بررسیهای انجام شده نشان میدهدکه درسیستمهای رقمی روی کابل زوج اثر نویز همشنوائی در ورودی آشکار بیشتر از اثر نویز حرارتی است . به همین دلیل این سیستمها رابا محدودیت نویز همشنوائی [۲] نامگذاری می‌کنند و طراحی آنها با توجه به مقدار این نویز در ورودی آشکار ساز ، انجام می‌شود .

هـ ـ نویز ضربه‌ای [۳] : درعمل ممکن است شرایطی پیش آید که ترمینالهای PCM در محیطهای بانویز ضربه‌ای زیاد قرار گیرند (مثلا " قرار گرفتن این وسیائل در مراکز سوئیچینگ الکترومکانیکی) . در این شرایط اثر نویز ضربه‌ای باعث افزایش خطا در فاصله تکرار کننده انتهائی خط انتقال می‌شود . اگرچه اهمیت نویز ضربه‌ای دراین شرایط زیاد است ولی متاسفانه‌به‌دلیل‌نبودن اطلاعات کافی ، بررسی دقیق آن دشوار است . لذا در شرایط عملی برای کاهش اثر آن ، طول قسمت تکرار کننده انتهائی سیستم را کمتر از طول معمول در نظر می‌گیرند(افزایش‌دامنه‌سیگنال)وسعی می‌کنند تاحدامکان مسیرهای PCM از مسیرهای‌صوتی‌دورنگه‌داشته‌شود [۳۰ و ۴]

و ـ اِکویا پژواک [۴] : یک فاصله تکرار کننده در خط انتقال ازقسمتهای‌متعددی تشکیل شده . هرگاه در اتصال این قسمتها تطبیق امپدانسی مناسب وجود نداشته باشد انعکاس به‌وجود خواهد آمد . وجود چنین انعکاسهائی باعث پژواک می‌شود و تداخل بین سیمبلها [۵] (isi) را به دنبال خواهد داشت که‌احتمال‌خطای‌سیستم را افزایش می‌دهد .در سیستمهای روی کابل هم محور در فرکانسهای بالا به علت نایکنواختی ساختمان کابل این مساله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۸ و ۷] .

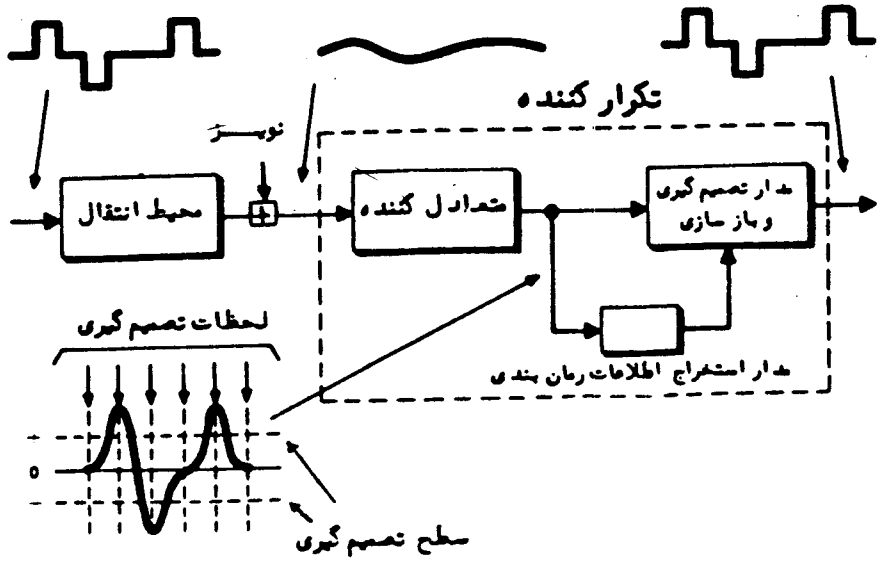
ز ـ سازگاری : در شبکه های مخابراتی اغلب از کابلهائی که هم اکنون در شبکه به منظور تامین سرویسهای تلفنی به‌صورت‌قیاسی‌به‌کارمی‌رود ، برای انتقال سیگنال‌رقمی استفاده می‌شود . دراین شرایط فقط در محلهای مخصوصی (حوضچه‌ها) [۶] دسترسی به کابل امکان پذیر است . لذا باید کوشید که‌از همین نقاط دسترس پذیر برای قرار دادن تکرار کننده هادرمسیراستفاده کرد . به‌عبارت دیگر درچنین شرایطی فاصله تکرار کننده باید به‌عنوان یک پارامتر مشخص یایک‌پارامتر با مقادیر گسسته در نظر گرفته شود [۳۰ و ۴]

علاوه برموارد بالا محدودیتهای طراحی نیز باعث به‌وجودآمدن نویز اضافی در لحظه آشکار سازی و لذا کاهش عمل کرد سیستم می‌شود .بدین ترتیب دیده می‌شود ، عواملی که‌کیفیت‌انتقال از طریق یک سیستم‌ویابه‌بعبارت دیگرطراحی آن‌را تحت تاثیر قرار می‌دهند متعددند . ولی باید دانست که در یک سیستم‌معین تمام عوامل فوق به‌طور همزمان دارای اهمیت نیستند وبه‌علاوه در نظر گرفتن همهٔ عوامل به‌طور همزمان تحلیل سیستم را پیچیده می‌کند ، ضمن اینکه ممکن است‌نتیجه به‌دست آمده نیز از لحاظ عملی چندان با ارزش نباشد .لذادرعمل‌بسته‌به‌سهولت‌ودقت مطلوب در طراحی ، مهمترین‌عوامل کنترل کیفیت را مدنظر قرار می‌دهند و اثر عوامل دیگر را با در نظر گرفتن پارامتری به نام حاشیه طراحی [۷] وارد محاسبات می‌کنند .

۲ ـ عمل کرد سیستم در یک فاصله تکرار کننده

مدل‌یک فاصله تکرار کننده در شکل (۱) نشان داده شده است .پالس‌ارسالی در اثرمشخصه فرکانسی کانال ، تضعیف وگسترده می‌شود ومقداری نویز به آن اضافه می‌شود . بنابراین‌یکی ازنخستین اقدامات درتکرار کننده ، شکل دهی پالس در یافتی (برای آشکار سازی) است . خنثی کردن اثر تابعیت فرکانسی محیط‌انتقال به وسیله متعادل کننده [۸] (EQ) انجام می‌شود . نکته حالب اینکه خنثی کردن کامل این‌تابعیت‌فرکانسی ضرورتی ندارد ، زیرا برای آشکار سازی ، لازم‌نیست پالس‌درست‌شبیه پالس ارسالی (که معمولا " مربعی است) باشد . به‌علاوه تامین چنین شکل پالسی در گیرنده احتیاج به عرض باند زیادی دارد که در سیستمهای عملی

1- Crosstalk 2- Crosstalk Limited Systems 3- Impulsive Noise 4-Echo
5- Intersymbol Interference 6- Manhole 7- Design Margin 8- Equalizer



شکل ۱ ــ مدل یک فاصله تکرار کننده در خط انتقال

نمی‌توان امکان آن را به وجود آورد ضمن اینکه نویز حرارتی نیز افزایش می‌یابد . لذا در عمل مشخصه EQ طوری انتخاب می‌شود که در ورودی آشکار ساز ، یک شکل پالس معین با عرض باند محدود به‌وجود آید . معیار و نحوه انتخاب این شکل پالس به شرح زیر است .

بادرنظرگرفتن $r(t)$ به‌عنوان شکل پالس دریافتی ، سیگنال در ورودی آشکارساز را می‌توان به صورت زیر نوشت .

$$X(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \; r(t-KT) + n_o(t) \qquad (۱)$$

به‌طوری که a_k یکی از M دامنهٔ مجاز ارسالی و $n_o(t)$ نویز در ورودی آشکار ساز است . از این سیگنال در لحظهٔ $t=mT$ نمونه برداری شده وبرای آشکارسازی دامنهٔ ارسالی به کار می‌رود . بنابراین دامنهٔ نمونهٔ حاصل چنین خواهد شد .

$$\begin{aligned} X(mT) &= \sum_k a_k \; r(m-k)T + n_o(mT) \\ &= a_m \; r(o) + \sum_{k\neq m} a_k r(m-k)T + n_o(mT) \end{aligned} \qquad (۲)$$

در این رابطه ، جمله اول ، دامنهٔ سیگنال اصلی در لحظه نمونه برداری ، جمله دوم ، اثر پالسهای مجاور روی پالس در حال آشکار سازی (isi) و جمله‌سوم ،نویز در لحظهٔ نمونه برداری است . طبق رابطه (۲) برای اینکه آشکار سازی پالس دریافتی‌به بهترین صورت انجام گیرد ، باید اثر سیگنالهای‌ناخواستهٔ همراه سیگنال اصلی به حداقل برسد و یا به عبارت دیگر احتمال خطا می‌نیمم شود .

بررسیهای‌انجام‌شده نشان داده که ساختمان گیرنده‌هائی‌که‌بتوانندا‌حتمال خطا را می‌نیمم کنند ، به‌علت پیچیدگی وحساسیت در مقابل محدودیتهای طراحی عملا " زیاد مورد توجه نیستند .به همین دلیل برای انتخاب شکل پالس‌دریافتی در ورودی آشکار ساز دراولین قدم شرط حذف isi و سپس در قدم بعدی مصالحه بین نویز ، جیتر [1] و سهولت در طراحی مورد توجه قرار می‌گیرد .

برای‌حذف isi شکل پالس‌دریافتی‌طوری‌انتخاب می‌شود که شرط نایکوئیست برآورده شود [۹ و ۱] . یکی از مشخصه‌هائی‌که‌از این نظر ، در عمل ، جالب است ، انتخاب $R(f)$ به شکل Raised Cosine با صورت کلی زیر است :

1- Jitter

$$R(f)=\begin{cases} \dfrac{V_r}{f_s} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots & o \leqslant f \leqslant (1-m)f_o \\ \dfrac{V_r}{2f_s}\left[1-\sin\left(\dfrac{\pi}{2}\cdot\dfrac{f-f_o}{mf_o}\right)\right] \cdots\cdots\cdots\cdots & (1-m)f_o \leqslant f \leqslant (1+mf_o) \\ 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots & f \leqslant (1+mf_o) \end{cases} \qquad (۳)$$

در این رابطه

$f_s=\frac{1}{T}$: سرعت انتقال،

$f_o=\frac{1}{2T}$: سرعت نایکوئیست یا حداقل عرض باند انتقال،

$V_r=r(o)$: قلهٔ[1] پالس دریافتی در ورودی آشکارساز،

m: ضریب محدودیت عرض باند سیستم به نام roll-off factor است.

مقدار m در محدوده $o \leqslant m \leqslant 1$ تغییر می‌کند و مقدار مناسب برای آن با درنظرگرفتن سهولت طراحی متعادل‌کننده (EQ) و مصالحه بین جیتر قابل تحمل و نویز حرارتی در ورودی آشکار ساز انتخاب می‌شود. با انتخاب مقادیر بزرگ برای m، یعنی اختصاص عرض باند بیشتر از f_o برای انتقال سیگنال، شیب $r(t)$ در لحظات $t=KT, K=\pm1,\pm2,\ldots$ کاهش می‌یابد، یعنی حساسیت نسبت به جیتر کمتر می‌شود، درحالی که به علت افزایش عرض باند، نویز حرارتی در ورودی آشکار ساز زیاد می‌شود.

بدین ترتیب با فرض اینکه جیتری در سیستم وجود ندارد و شکل پالس دریافتی شرط نایکوئیست را برآورده می‌کند، رابطه (۲) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$X(mT) = a_m V_r + n_o(mT)$$

این رابطه نشان می‌دهد که کیفیت انتقال، تابعی از قلهٔ پالس دریافتی و نویز یا به عبارت دیگر تابعی از نسبت سیگنال به نویز در ورودی آشکار ساز است. هرگاه احتمال وقوع دامنه ارسالی a_i، برابر q_i و نویز ورودی آشکار ساز گوسی با مقدار متوسط صفر و انحراف استاندارد یا مقدار موثر σ باشد، احتمال خطای سیستم چنین می‌شود.

$$q_e=(q_1+q_M)Q\left(\frac{V_r}{2\sigma}\right)+\sum_{i=2}^{M-1} 2q_i Q\left(\frac{V_r}{2\sigma}\right) \qquad (۴)$$

به‌طوریکه

$$Q(k)=\int_k^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2}}dx$$

در کاربردهای عملی معمولاً احتمال خطا را برحسب قلهٔ سیگنال به مقدار موثر نویز[2] بیان می‌کنند. هرگاه این پارامتر را با S/N نمایش دهیم، رابطه (۴) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$q_e=\left[q_1+q_M+\sum_{i=2}^{M-1} q_i\right]Q\left(\frac{1}{2}S/N\right) \qquad (۵)$$

در شرایطی که احتمال وقوع دامنه‌های مختلف یکسان باشد، یعنی $q_i=\frac{1}{M}$ رابطه (۵) به‌صورت زیر در می‌آید.

$$q_e=2\left(1-\frac{1}{M}\right)Q\left(\frac{1}{2}S/N\right) \qquad (۶)$$

در سیستمهای PCM روی کابل زوجی، سیگنال ارسالی معمولاً به‌صورت AMI یا HDB3 کد می‌شود. در این صورت هرگاه احتمال وقوع ارقام o و 1 در سیگنال دوروئی[3] (قبل از کد شدن) یکسان و برابر $\frac{1}{2}$ فرض شود، برای سیگنال AMI ارسالی، احتمال دامنه‌های ±1، برابر $\frac{1}{4}$ و احتمال دامنه o، برابر $\frac{1}{2}$ می‌شود. لذا کیفیت کار سیستم طبق رابطه (۵) چنین خواهد شد.

$$q_e=\frac{3}{2}Q\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{S}{N}\right) \qquad (۷)$$

در این صورت هرگاه کیفیت قابل قبول برای کار تکرارکننده را $q_e=10^{-7}$ در نظر بگیریم، $\frac{S}{N}$ مورد لزوم در ورودی آشکار ساز برابر 20.3 dB خواهد شد. رابطه (۷) با تقریب خوب برای شرایطی که از کد HDB3 استفاده شود نیز قابل کاربرد است.

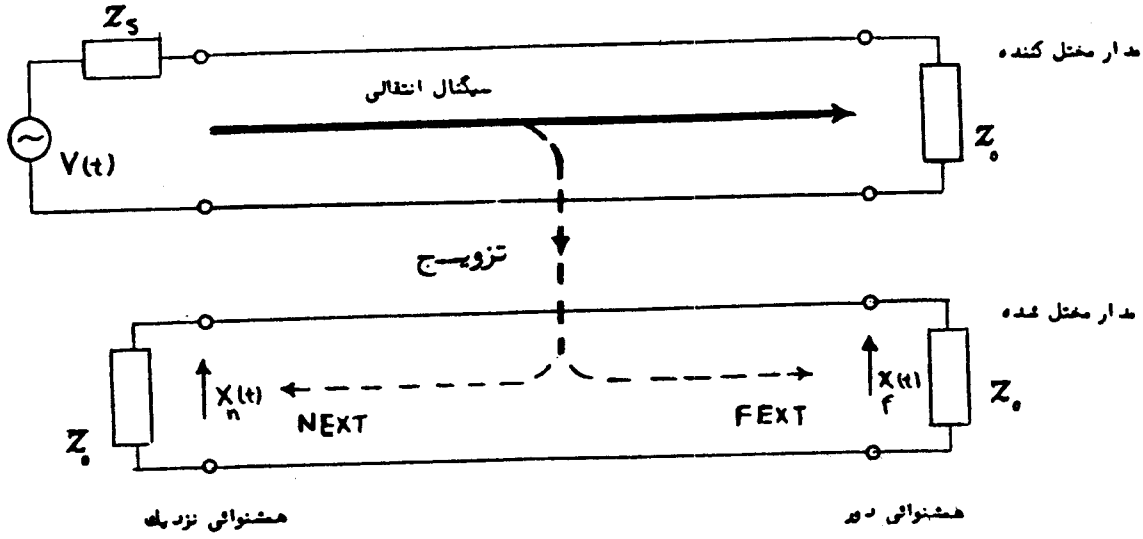
مسالهٔ اساسی در طرح سیستمهای رقمی، انتخاب پارامترها در قسمت تکرار کننده به منظور تامین یک احتمال خطای معین در آشکارسازی است. طبق رابطه (۴)، این احتمال بستگی به نسبت سیگنال به نویز در ورودی آشکار ساز دارد. بنابراین به عنوان اولین قدم

1- Peak 2- Peak signal to rms Noise Ratio 3- Binary

در طرح سیستمها باید نسبت سیگنال به نویز و یا به عبارت دیگر قدرت نویز در ورودی آشکار را محاسبه کرد . دو مولفه مهم از نویز در ورودی آشکار ساز (درصورت حذف isi و نداشتن - جیتر)نویز حرارتی ونویز همشنوائی است . اهمیت این مولفه‌ها بستگی به نوع سیستم دارد . به طوری که در سیستمهای روی کابل زوجی همشنوائی ودر سیستمهای‌روی کابل هم محور ، نویز حرارتی اهمیت پیدا می‌کند [۴] . لذا در قسمت بعد تنها نویز همشنوائی‌را در نظر می‌گیریم .

۴ ــ نویز همشنوائی در کابل زوجی

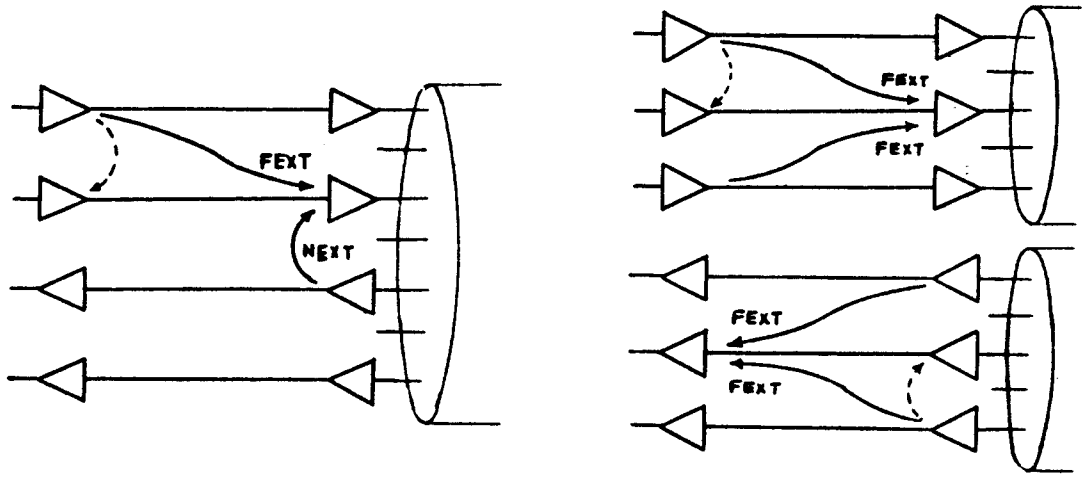
همشنوائی درکابل زوجی به علت وجود تزویج‌الکترو مغناطیسی‌بین‌زوجهای مختلفی که از لحاظ فیزیکی از هم‌مجزا هستند ، به‌وجود می‌آید . تزویج الکتریکی به علت وجود خازن عدم تعادل [1] و تزویج مغناطیسی به علت قرار گرفتن یک زوج سیم در حوزه مغناطیسی زوج سیم دیگر (در اثر اندوکتانس متقابل) . میزان‌این تزویجها بستگی به موقعیت هندسی زوج سیمها ، مخصوصا " نزدیکی آنها به یکدیگر دارد و معمولا " کم و بیش یکنواخت در طول خط توزیع می‌شوند . دراثر این تزویجها سیگنالی که از طریق یک زوج سیم انتقال می‌یابد به خطوط دیگر منتقل می‌شود . سیگنال تداخلی ناخواسته‌ای‌که‌بدین صورت به‌وجود می‌آید همشنوائی خوانده می‌شود (شکل ۲) .



شکل (۲) ــ همشنوائی بین دومدار

همشنوائی ایجادشده در مدار مختل شده می‌تواند دردوجهت منتشر شود . هرگاه‌جهت انتشار همشنوائی وجهت انتشار سیگنال‌اصلی در خلاف جهت هم‌باشند ، همشنوائی‌را از نوع نزدیک (۲) (NEXT) ، در صورتی که جهت انتشار این دو سیگنال یکسان باشد ، همشنوائی را از نوع دور (۳) (FEXT) گویند (شکل ۲) . اگر چه هر دو نوع همشنوائی می‌توانندبطور همزمان وجود داشته باشند ، ولی بسته به نوع سیستم ، نحوهٔ تاثیر آنها متفاوت است و ممکن است اثر یکی در مقابل‌دیگری‌ناچیز باشد . به عنوان مثال ، هرگاه یک کابل برای انتقال دردو جهت (جهت رفت وجهت برگشت) به‌کار رود (۴) در این‌صورت NEXT و FEXT همزمان به وجود می‌آید ولی به‌علت‌تفاوت سطح سیگنال در دوحالت ، معمولا " قدرت NEXT خیلی بیشتر از FEXT است درنتیجه‌اهمیت بیشتری دارد .به‌همین دلیل ،طراحی سیستم در این حالت با درنظر گرفتن NEXT انجام می‌شود (شکل ۳) . به همین ترتیب FEXT در شرایطی اهمیت‌پیدا می‌کند که‌از یک کابل برای انتقال در یک جهت‌استفاده‌شود ، یعنی برای رفت و برگشت ، دوکابل‌جداگانه‌یادوقسمت‌جداگانه ازیک‌کابل به کار رود (۵) . البته در کابلهای زوجی همشنوائیهای نوع دیگر نیز وجود دارند که دارای اهمیت کمتری هستند [۱۰].

1- unbalance Capacitance 2- Near End X-Talk 3- Far End X-Talk
4- One Cable Operation 5- Tow-Cable Operation



شکل (۳) : همشنوائی بین سیستمهای هم جهت و غیر هم جهت

در سیستمهای روی کابل به‌منظور ایجاد سهولت در مدل بررسی همشنوائی، افت همشنوائی (۱) نزدیک و همشنوائی دوربا توجه بشکل (۲)، به صورت زیر تعریف می‌شوندکه‌اصطلاحا "به‌آن‌همشنوایی‌همسطح (۲) گفته‌میشود [۱۰]

$$\text{افت NEXT} = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_n}\right) \quad dB$$

$$\text{افت FEXT} = 10 \log \left(\frac{P_o}{P_f}\right) \quad dB \qquad (۸)$$

۴ ـ ۱ : محاسبهٔ قدرت همشنوائی

محاسبهٔ دقیق همشنوائی‌بین دوخط به‌علت‌ناآگاهی ازموقعیت‌هندسی‌آنهامشکل وبه‌علاوه‌کاربرد عملی آن محدود است .لذادر طراحی سیستمهامعمولا "از روش ساده‌ای برمبنای فرضهای زیر استفاده می‌شود [۱۱ و ۱۰].

الف ـ سیگنال تداخل کننده سینوسی است .

ب ـ تزویجهای ظرفیتی والقایی، یکنواخت درطول خط توزیع شده اند و به وسیله‌مقادیرشان در واحد طول بیان می‌شوند .

ج ـ خطوط به‌امپدانس مشخصه ختم شده‌اند .

برای‌بررسی‌همشنوائی دراین‌شرایط ، دو خط انتقال بامشخصات Z_o, γ_1 ، Z_o, γ_2 طول l رامطابق‌شکل(۴ ـ الف) درنظرمی‌گیریم و فرض می‌کنیم خازن عدم تقارن واندوکتانس متقابل برای واحدطول به‌ترتیب برابر C_u و M_c باشد . دراین صورت بادرنظر گرفتن مدار معادل ، تزویج بین دو خط برای قطعه dx رامی‌توان مطابق شکل (۴ ـ ب) نشان داد [۱۰] که‌جریان NEXT و جریان FEXT در این قطعه از مدار مختل شده به وسیله روابط زیر قابل بیان است .

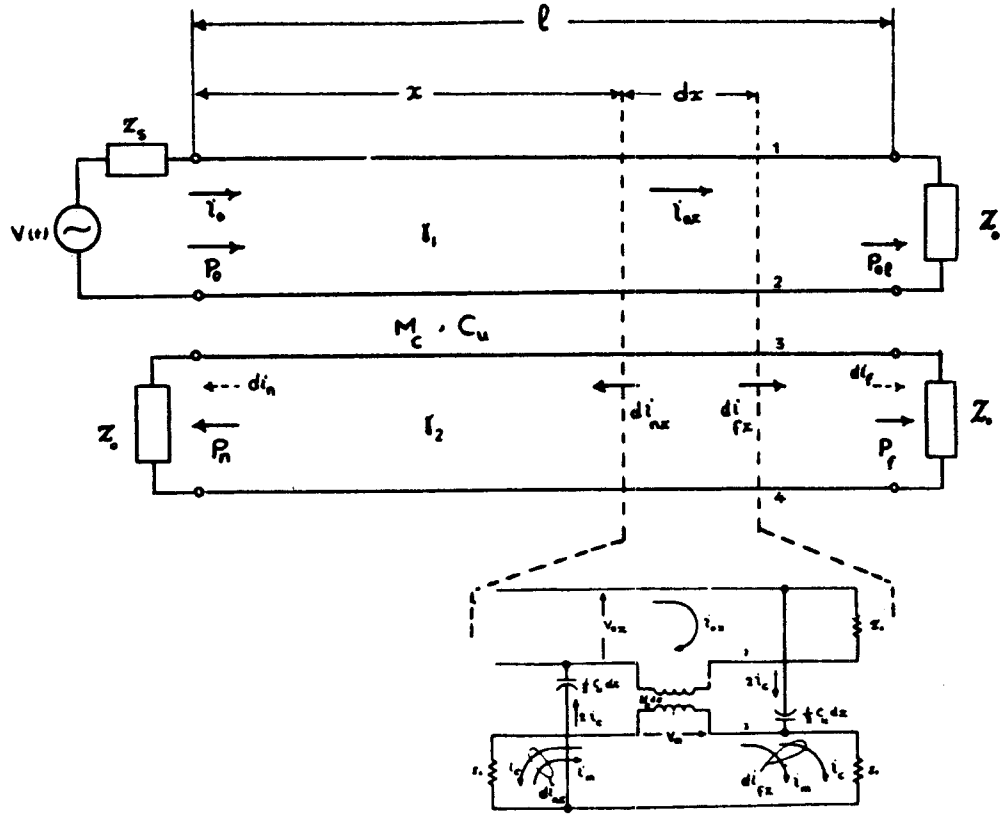
$$\frac{di_{nx}}{i_{ox}} = jw\left(\frac{Z_o C_u}{8} + \frac{M_c}{2Z_o}\right) dx = jwC_n \, dx \qquad (۹)$$

$$\frac{di_{fx}}{i_{ox}} = jw\left(\frac{Z_o C_u}{8} - \frac{M_c}{2Z_o}\right) dx = jwC_f dx \qquad (۱۰)$$

با توجه‌به روابط(۹) و (۱۰) نتایج کلی زیر حاصل می‌شود :

ـ اثر تزویجهای‌ظرفیتی‌والقایی در یک حالت باهم جمع ودرحالت دیگر از هم کم می‌شوند بنابراین نمی‌توان با ترمیم یک نوع تزویج در مقابل تزویج دیگر، NEXT و FEXT را می‌نیمم کرد .

1- X-Talk Loss 2- Equal Level X-Talk



شکل (۴) ــ همشنوائی بین دو مدار طویل

ــ در مدارهای‌باامپدانس‌زیاد (مثلا " دربانداصوتی تزویج ظرفیتی ودرمدارهای‌با امپدانس کم (مثلا " فرکانسهای بالا) تزویج القایی از اهمیت برخوردار است .

۴ــ۱ــ۱ــ : محاسبه NEXT

رابطه (۹) میزان NEXT در قطعه به طول dx و به فاصله x از منبع‌تداخل‌کننده را مشخص می‌کند . برای محاسبه NEXT ایجاد شده درمدار مختل شده باید اثر NEXT ناشی از قطعه dx را درابتدای‌مدار مختل شده محاسبه کرد و سپس ازجمع اثر قطعه های مختلف در طول مدار، NEXT در ابتدای خط رابه دست‌آورد .برای این منظورپارامترهای زیر را درنظر می‌گیریم :

i_o = جریان در ترمینال ارسال مدار مختل کننده

di_n = اثر جریان NEXT ناشی از جزء dx در ابتدای مدار مختل شده . در این‌صورت می‌توان نوشت :

$$i_{ox}=i_o\, e^{-\gamma_1 x},\quad di_n=di_{nx}\, e^{-\gamma_2 x},\quad \gamma_{1,2}=\alpha_{1,2}+J\beta_{1,2}$$

با قرار دادن این مقادیر در رابطه (۹) نتیجه می‌شود .

$$\frac{di_n}{i_o}=\left[J\omega C_n\, e^{-(\gamma_1+\gamma_2)X}\right]dx$$

حال اگر فرض کنیم ، همشنوائی ناشی از اجزاء مختلف خط به یکدیگر ربط ندارند [1] ،یعنی برای جمع اثرها روش جمع قدرتی را به‌کاربریم وبه علاوه توجه کنیم که در کابلهای زوجی ، افت با $\sqrt{f}$ متناسب است (یعنی $\alpha_{1,2}=K_{1,2}\sqrt{f}$) می‌توان نوشت :

$$\frac{P_n}{P_o}=\int_0^l \left(\frac{di_n}{i_0}\right)^2 dx=\frac{4\pi^2 f^2 C_n^2}{2(K_1+K_2)}\left(1-e^{-2(\alpha_1+\alpha_2)l}\right)$$

1- Uncorrelated

برای مدارهای نسبتا " طویل (افت بیشتر از 10 dB) ازجمله دوم داخل کروشه می‌توان صرف نظر کرد . در این صورت می‌توان نوشت .

$$\frac{P_n}{P_o} = K_n \cdot f^{3/2} \qquad (۱۱)$$

بنابر رابطهٔ بالا ، افت همشنوائی نزدیک برحسب dB چنین می‌شود :

$$X_{ND} = 10 \log(\frac{P_o}{P_n}) = -10 \log K_n - 15 \log f \qquad (۱۲)$$

با در نظر گرفتن X_{ON} به عنوان افت NEXT در فرکانس f_o می‌توان نوشت :

$$X_{ON} = -10 \log K_n - 15 \log f_o$$

یا

$$X_{ND} = X_{ON} - 15 \log(f/fo) \qquad (۱۳)$$

با توجه به بررسی‌های بالا ، خصوصیات کلی زیر را می‌توان برای NEXT ذکر کرد .

الف ــ افت NEXT تابعیت فرکانسی دارد وباافزایش فرکانس با شیب 4.5dB/oct. کاهش می‌یابد . با توجه به این مشخصه ملاحظه می‌شود که اندازه‌گیری افت NEXT در یک فرکانس برای بررسی خصوصیات همشنوائی کفایت می‌کند ، زیرا افت همشنوائی در سایر فرکانسها را می‌توان با داشتن این مقدار به دست آورد [۱۳] .

ب ــ با در نظر گرفتن رابطه (۱۳) ، تابع تبدیل NEXT به‌صورت زیر خواهد شد .

$$|X_N(f)|^2 = 10^{-0.1X_{ND}} = K_n f^{3/2} \qquad (۱۴)$$

ج ــ افت NEXT بستگی به طول مدار ندارد .

۴ــ۱ــ۲ : محاسبه FEXT

با در نظرگرفتن di_f به عنوان اثر جریان FEXT ناشی ازجزء dx در انتهای مدار مختل شده ، به همان ترتیبی که برای NEXT عمل شد ، با استفاده از رابطه (۱۰) می‌توان نوشت :

$$\frac{di_f}{i_o} = jwc_f\left[e^{-\gamma_2(l-x)} \quad e^{-\gamma_1 x}\right]dx$$

هرگاه همشنوائی ناشی ازقطعه‌های خط را بایکدیگر بی‌ربط در نظر بگیریم ، خواهیم داشت :

$$\frac{P_f}{P_o} = \int_o^l \left|\frac{di_f}{i_o}\right|^2 dx$$

$$= \frac{w^2 c_f^2 e^{-2\alpha_2 l}}{2(\alpha_1-\alpha_2)}\left[1-e^{-2(\alpha_1-\alpha_2)l}\right] \qquad (۱۵)$$

و یا با در نظر گرفتن سیگنال اصلی در انتهای مدار مختل کننده ، یعنی $P_{ol}=P_o e^{-2\alpha_1 l}$ رابطه (۱۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\frac{P_f}{P_{ol}} = \frac{w^2 c_f^2}{2(\alpha_1-\alpha_2)}\left[e^{-2(\alpha_2-\alpha_1)l}\right]\left[1-e^{-2(\alpha_1-\alpha_2)l}\right] \qquad (۱۶)$$

هرگاه شرایط عملی را که بررسی همشنوائی بین زوجهای مختلف از یک کابل است ، در نظر بگیریم ، می‌توان فرض کرد $\alpha_1=\alpha_2$. در این صورت رابطه (۱۶) برای زوجهای مشابه به‌صورت زیر ساده می‌شود :

$$\frac{P_f}{P_{ol}} = w^2 c_f^2 \, l = K_f . l . f^2 \qquad (۱۷)$$

وبا در نظر گرفتن روابط (۸) و (۱۷) ، افت FEXT برحسب dB چنین می‌شود .

$$X_{FD} = -10 \log K_f - 10 \log - 20 \log f \qquad (۱۸)$$

با در نظرگرفتن X_{of} به عنوان افت FEXT در فرکانس f_o برای مدرا به‌طول l_o می‌توان نوشت :

$$X_{oF} = -10 \log K_f - 10 \log l_o - 20 \log f_o$$

یا

$$X_{Fd} = X_{of} - 20 \log (f/f_o) - 10 \log (l/l_o) \qquad (۱۹)$$

بدین ترتیب خصوصیات کلی زیر را می‌توان برای FEXT بین دو مدار مشابه ذکر کرد .

الف ــ افت FEXT تابعیت فرکانسی دارد و با افزایش فرکانس با شیب 6dB/oct کاهش می‌یابد . لذا

اندازه گیری FEXT در یک فرکانسی برای بررسی خصوصیات همشنوائی کفایت می‌کند [۱۳].

ب ــ با توجه‌به رابطه (۱۹)، تابع تبدیل FEXT به صورت زیر خواهد شد.

$$\left|X_F(f)\right|^2 = 10^{-0.1X_{FD}} = K_f \cdot 1.f^2 \quad (۲۰)$$

ج ــ افت FEXT بستگی به‌طول مدار دارد.

علاوه برموارد یاد شده برای خصوصیات NEXT و FEXT نکات‌کلی‌زیرراکه در طرح سیستمهای‌روی‌کابل زوجی دارای اهمیت اند، می‌توان ذکر کرد.

الف: بررسیهای انجام شده نشان داده که افت همشنوائی (برحسب dB) بین زوجهای مختلف از یک کابل (یعنی X_{ON} و X_{oF}) را برای کاربردهای عملی می‌توان تقریبا" گوسی در نظر گرفت [۱۴]. به همین دلیل در طراحی‌سیستمهای PCM روی کابل‌زوجی‌اغلب‌از توزیع گوسی [۱۷ ــ ۱۵ و ۱۰] ویادرصورت‌نیاز به دقت بیشتر از توزیع گوسی بریده شده (۱) استفاده می‌شود [۲۰ ــ ۱۸].

ب: ازنقطه‌نظرهمشنوائی‌بین‌کابلهای‌باعایق‌کاغذی، عایق‌پلاستیکی خشک‌وعایق‌پلاستیکی‌روغنی، تفاوتهائی وجود دارد.به‌این‌ترتیب که‌متوسط افت‌همشنوائی در کابهای باعایق کاغذی‌حدود 3dB کمتر از کابلهای باعایق پلاستیکی است. این شرایط برای‌حالتی‌است‌که هردو نوع‌کابل دارای ساختمان یکسان باشند واندازه‌گیری همشنوائی روی یک قرقره‌ازکابل انجام شده باشد. علت این تفاوت وجود تعداد پیچشهای کمتر در کابلهای باعایق کاغذی در مقایسه با کابل با عایق پلاستیکی است. این‌محدودیت را می‌توان با استفاده ازمفصل بندی تصادفی (۲) در کابلهای کاغذی از بین برد. زیرا این نوع مفصل بندی جلو انباشته شدن منظم (۳) همشنوائی را می‌گیرد، درنتیجه همشنوایی کاهش می‌یابد. تجربیات‌عملی نشان داده که درکابلهای باعایق پلاستیکی استفاده از مفصل بندی تصادفی باعث بهبود همشنوائی نمی‌شود. علت آن نحوه ساخت این‌نوع کابلها است که در آن از تعداد پیچشهای زیاد استفاده شده. در صورت استفاده از کابلهای روغنی‌افت‌همشنوائی‌به‌میزان dB 2تا1 نسبت‌به‌کابلهای خشک افزایش می‌یابد.

با توجه به نکات بالا وتجربیات عملی‌انجام شده به‌طورکلی‌می‌توان‌گفت، در شرایطی که‌کابلهای فوق در سیستم استفاده شده باشند از نقطه نظر همشنوائی فرق چندانی با یکدیگر ندارند.

۵ ــ بررسی سیستمهای روی کابل زوجی

با توجه به تابع تبدیل تعریف شده برای NEXT و FEXT، مدل سیستم جهت محاسبه توان نویز در ورودی آشکارساز (نقطه X) برای‌سیستمهای هم جهت وغیر هم‌جهت در یک‌کابل‌را می‌توان به‌صورت نشان داده شده درشکل (۴) در نظر گرفت. پارامترهای سیستم برای این بررسی به شرح زیرند:

$n+1$ = تعداد سیستمهای PCM در حال کار (بهره‌برداری) در یک کابل

f_o = فرکانس نایکوئیست یا نصف سرعت انتقال

L_o, a_o = به‌ترتیب افت محیط انتقال (زوج سیم) در هر قسمت تکرار کننده در فرکانس f_o برحسب N_p و dB

σ_N, m_N = به ترتیب میانگین وانحراف‌استاندارد توزیع افت NEXT در فرکانس f_o (یعنی مشخصات توزیع X_{oN})

σ_f, m_f = به ترتیب میانگین وانحراف استاندارد توزیع افت FEXT در فرکانس f_o (یعنی مشخصات توزیع X_{oF})

$P(f)$ = طیف قدرت سیگنال PCM ارسالی

$C(f), H_c(f)$ = به ترتیب‌تابع‌تبدیل وافت محیط انتقال، $H_c(f)=1/c(f)$

$E(f)$ = تابع تبدیل متعادل کننده

$X_F(f), X_N(f)$ = به ترتیب تابع تبدیل FEXT, NEXT

$r(t), S(t)$ = به ترتیب‌شکل‌پالس ارسالی (خروجی تکرار کننده) و شکل پالس دریافتی (خروجی متعادل کننده)

$R(f), S(f)$ = به‌ترتیب طیف دامنه برای شکل پالسهای ارسالی ودریافتی

$S_r(f), S_s(f)$ = به‌ترتیب طیف‌انرژی برای شکل پالسهای ارسالی ودریافتی

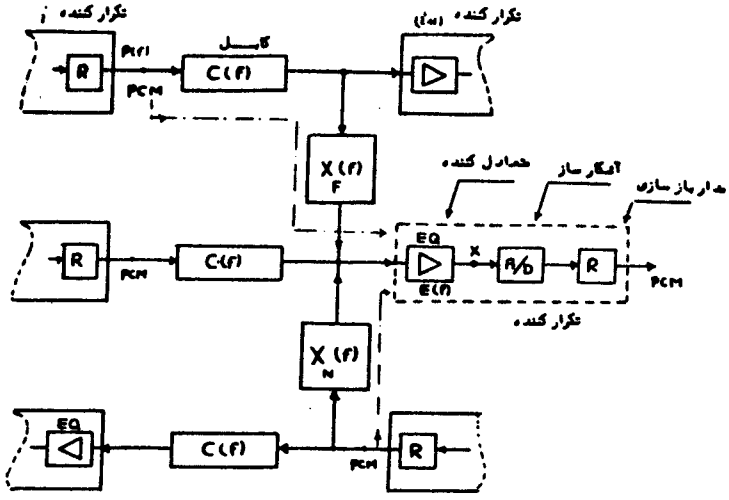
بدین‌ترتیب‌باتوجه‌به‌نکات‌بالا، روابط زیر رامی‌توان

1- Truncated Normal Distribution 2- Random Splicing 3- Systematic

بین پارامترهای مختلف در یک فاصله تکرارکننده نوشت و براساس آن قدرت NEXT و FEXT را در نقطه X محاسبه کرد .

$$R(f)=S(f)\ \frac{E(f)}{C(f)} \qquad (۲۱)$$

$$S_r(f)=S_s(f)\,.\,\frac{|E(f)|^2}{|c(f)|^2}$$



شکل (۴) ــ مدل بررسی همشنوائی در سیستمهای روی کابل زوجی

۵ ــ ۱ : محاسبهٔ قدرت NEXT

در صورت استفاده از یک کابل به منظور انتقال سیگنال در دو جهت ، NEXT و FEXT در کیفیت سیستم تاثیر خواهند داشت . ولی به‌دلیل اهمیت بیشتر NEXT معمولا "طراحی براساس این‌نوع نویز انجام می‌شود . با توجه به‌این نکته وبا در نظر گرفتن شکل (۴) ملاحظه می‌شود که NEXT د رنقطهX در اثر سیگنال PCM ارسالی از طریق سیستم (۱) ایجاد می‌شود . برای محاسبه قدرت این همشنوائی از سطح زیر طیف قدرت آن استفاده می‌کنیم .در این صورت‌با توجه به مسیر مشخص شده روی شکل و با تعریف پارامترهای :

$P_N(l)$, $P_N(l)$ که به ترتیب قدرت NEXT در نقطه تصمیم گیری برای یک منبع تداخل کننده برحسب mw و dB_m اند می‌توان نوشت :

$$P_N(l)=10^{0.1P_N(l)}=\int_{-2f_o}^{2f_o} P(f)\,.\,|X_n(f)|^2\,.\,|E(f)|^2\,df$$

و یا با در نظر گرفتن روابط (۲۱)

$$P_N(l)=2\int_o^{2f_o}\frac{P(f)}{S_s(f)}\,.\,|X_N(f)|^2\,S_r(f)\,.\,|C(f)|^2\,df \qquad (۲۲)$$

سیگنال PCM خروجی تکرار کننده را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت

$$u(t)=\sum_k a_k S(t-kT)=\left[\sum_k a_k\,\delta(t-kT)\right]*S(t)$$
$$=g\ (t)*S(t)$$

در رابطه فوق ، علامت * ، علامت Convolution و g(t)) یک سیگنال PAM ضربه‌ای‌است . هرگاه طیف‌قدرت سیگنال PAM ضربه‌ای رابا $S_g(f)$ نمایش دهیم ، طبق رابطه بالا می‌توان نوشت :

$$P_g(f)=S_g(f)\,.\,S_s(f) \qquad (۲۳)$$

همچنین بادرنظرگرفتن l به عنوان طول کابل در قسمت تکرارکننده (فاصله بین تکرار کننده‌ها) و a به عنوان افت در واحد طول کابل برحسب N_p، می‌توان نوشت :

$$C(f)=e^{1a\sqrt{f}}=e^{ao\sqrt{f/f_o}} \qquad (۲۴)$$

بدین ترتیب با ترکیب روابط (۱۴)، (۲۳)، (۲۴)، (۲۲) نتیجه می‌شود.

$$P_N(1)=10^{-0.1\,X_{oN}}\left[2\int_o^{2f_o} S_g(f).S_r(f).(f/f_o)^{3/2}.e^{2a_o\sqrt{f/f_o}}\,df\right] \qquad (۲۵)$$

حال با در نظر گرفتن قلهٔ پالس دریافتی، $V_r=r(o)$ که یکی‌ازپارامترهای‌مهم درمحاسبه نسبت سیگنال به نویز است، می‌توان نوشت:

$$S_r(f)=V_r^2 \cdot S'_r(f) \qquad (۲۶)$$

در رابطه بالا $S'_r(f)$، طیف انرژی شکل پالس دریافتی نرمالیز شده (قلهٔ به مقدار ۱) است.

در این‌صورت ازترکیب روابط (۲۵)، (۲۶) نتیجه می‌شود.

$$P_N(1)=-X_{oN}+10\log(V_r)^2+10\log\left[2\int_o^{2f_o}(f/f_o)^{3/2}\cdot S_g(f).S'_r(f).e^{2a_o\sqrt{f/f_o}}\,df\right] \qquad (۲۷)$$

هرگاه جمله دوم رابطه فوق را که بستگی به نوع شکل دهی و افت فاصله تکرار کننده دارد با D_N نمایش دهیم، خواهیم داشت:

$$P_N(1)=-X_{oN}+10\log(V_r^2)+D_N \qquad (۲۸)$$

$$D_N=10\log\left[2\int_o^{2f_o}(f/f_o)^{3/2}.S_g(f).S'_r(f).e^{2a_o\sqrt{f/f_o}}\right]$$

با توجه به رابطه بالا ملاحظه می‌شود.

الف ــ مقدار همشنوائی با افزایش عرض‌باند انتقال (عرض باند $S_r(f)$) افزایش می‌یابد.

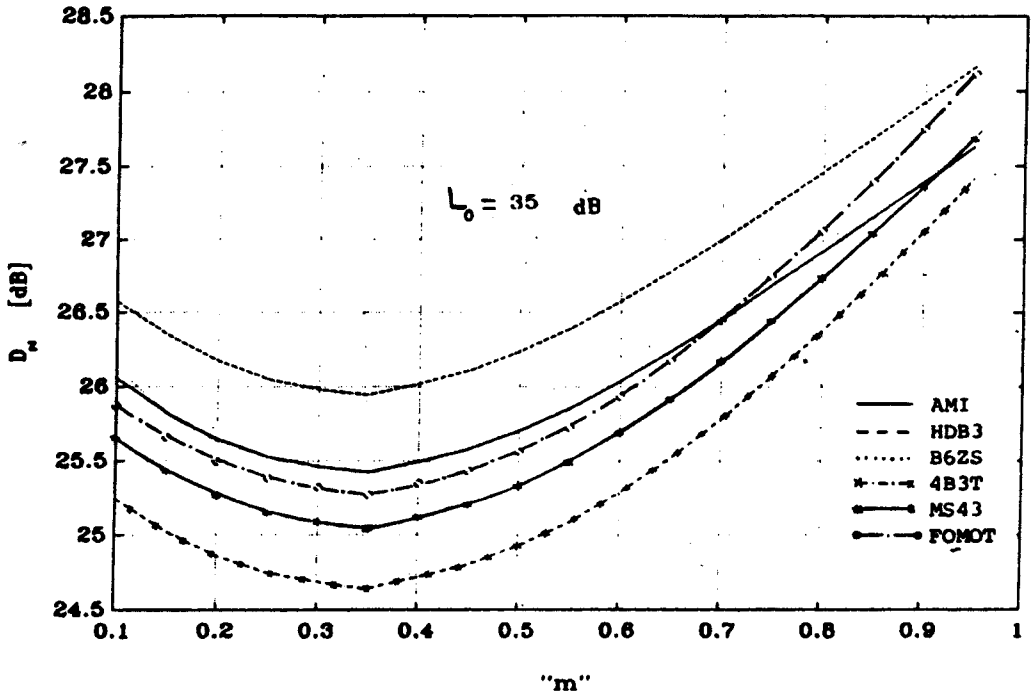
ب ــ مقدار همشنوائی، بستگی به شکل طیف قدرت سیگنال PCM ارسالی‌دارد. لذااهمیت استفاده از کد انتقال به‌منظورکاهش‌اثرفرکانسهای بالای‌سیگنال انتقالی و همچنین محدود کردن‌عرض‌باند، برای‌کاهش نویز همشنوائی به خوبی از رابطه (۲۸) مشاهده می‌شود. برای بررسی این اثر، بادر نظر گرفتن‌مشخصهٔ Raised Cosine برای $R(f)$ واستفاده ازطیف‌قدرت سیگنال PCM [۲۱و۲۲]، مقدار D_N برحسب مقادیرمختلف m (ضریب افزایش‌عرض‌باند یا roll-off)، محاسبه‌ودر شکل (۵) رسم شده است. چنانکه دیده می‌شود برای مقادیر $m>0.5$ مقدار همشنوائی شروع به افزایش می‌کند. نکته جالب اینکه بین کدهای AMI، HDB_3 و B_6ZS که معمولا" در سیستمهای فاصله کوتاه (روی کابل زوجی) از آنها استفاده می‌شود، از نظر همشنوائی تفاوت چندانی وجود ندارد (کمتراز 0.6 dB).

رابطه (۲۸) همچنین نشان می‌دهد که مقدار NEXT بستگی به افت فاصله‌تکرار کننده a_o دارد، لذا مقدار آن را می‌توان به وسیله این پارامتر تحت کنترل درآورد. ازاین خاصیت می‌توان برای مصالحهٔ نویز ضربه‌ای و فاصله تکرار کننده در قسمت انتهائی خط انتقال استفاده کرد. شکل (۶)، چگونگی تغییرات D_N برحسب a_o را نشان می‌دهد. چنانکه دیده‌می‌شود این تغییرات برای کدهای مختلف تقریبا" یکسان است.

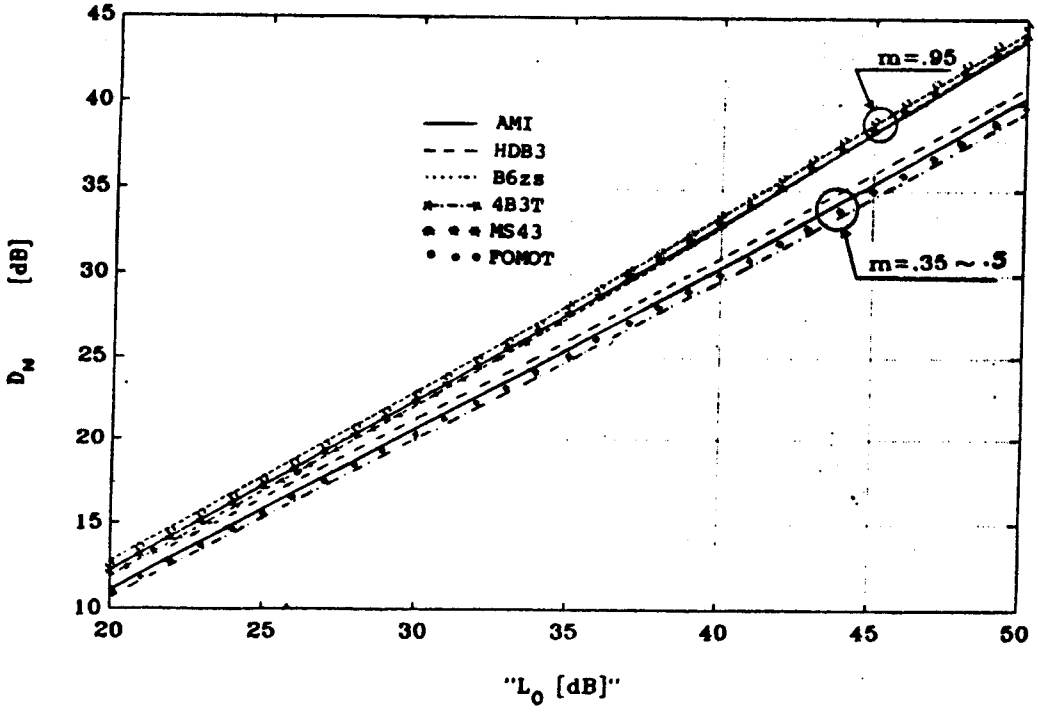
انتخاب شکل‌گوسی برای $R(f)$، به علت سهولتی که درمحاسبات ایجاد می‌کند، در بعضی مواقع جالب است. ولی‌بررسیهای‌انجام شده‌نشان‌داده‌که‌شکل Raised Cosine دارای تولرانس بیشتری نسبت به همشنوائی است [۲۳]. تاثیر نوع شکل دهی در میزان همشنوائی در مرجع [۱۸] بررسی شده.

رابطه (۲۸)، قدرت NEXT در نقطه تصمیم‌گیری را وقتی که‌تنها یک منبع تداخل کننده وجود داشته باشد، نشان می‌دهد.

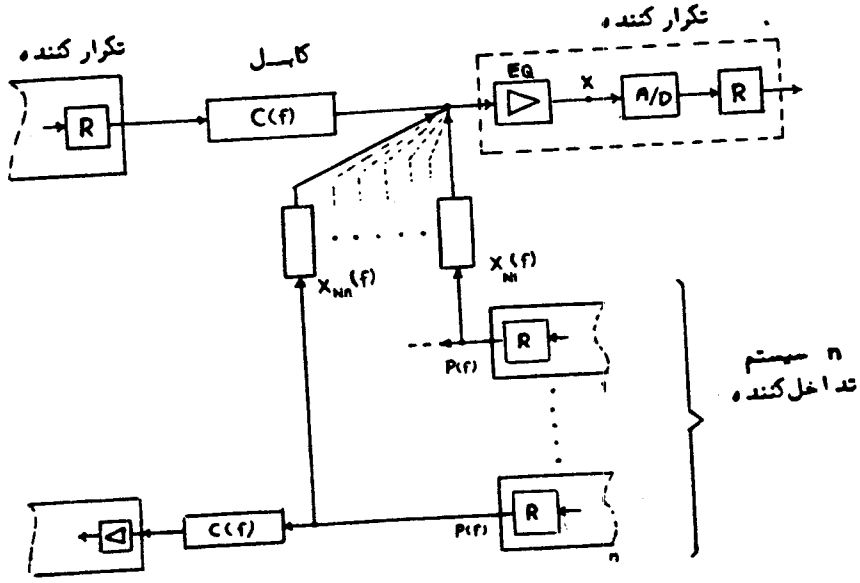
هرگاه در یک کابل از n+1 سیستم PCM (با جهت رفت وبرگشت) استفاده شده باشد. در این صورت‌در نقطه تصمیم گیری مطابق شکل (۷)، n مولفه NEXT خواهیم داشت که توان مولفه i ام آن طبق رابطه (۲۸) برابر $P_N(i)$ خواهد شد.



شکل (۵) ــ تغییرات D_N برحسب m برای کدهای مختلف



شکل (۶) ــ تغییرات D_N برحسب افت فاصله تکرار کننده (L_0) برای کدهای مختلف



شکل (۷) ــ محاسبه قدرت NEXT در حالت استفاده‌از یک کابل برای n+1 سیستم PCM

بنابراین‌بافرض‌ربط نداشتن (۱) سیگنالهای‌تداخلی سیستمهای مختلف ، توان NEXT کلی چنین‌می‌شود .

$$P_N(n)=10\log\left[\sum_{i=1}^{n} P_N(i)\right]$$

$$=10\log\sum_{i=1}^{n}10^{-0.1\,X_{ONi}} \qquad (۲۹)$$

$$=X_n+10\log(V_r^2)+D_N$$

با در نظر گرفتن اینکه X_{ON} دارای توزیع نرمال با مقدار متوسط m_N وانحراف استاندارد σ_N است ، می‌توان نشان داد [۲۵ – ۲۳ و ۱۹ – ۱۷ و ۱] که X_n با تقریب قابل قبول دارای‌توزیع نرمال‌با مشخصات $\bar{X}_n$ و σ_{XN} طبق رابطهٔ (۳۰) است . لذامی‌توان‌نتیجه‌گرفت‌که $P_N(n)$ دارای توزیع گوسی است .

$$\begin{cases} \bar{X}_n = -m_N + I_N \\ \sigma_{XN}=6.593\left\{\log\left[\dfrac{(n-1)+\exp(0.053\,\sigma_N^2)}{n}\right]\right\}^{1/2} \\ I_N=5\log\left[\dfrac{n^3\exp(0.053\,\sigma_N^2)}{(n-1)+\exp(0.053\,\sigma_N^2)}\right] \end{cases} \qquad (۳۰)$$

در شرایط ایده‌ال ،پارامترهای‌همشنوائی بایدطوری انتخاب شود که درتمام‌شرایط ، احتمال خطای سیستم ازحد مورد نظر بیشتر نشود . ولی با توجه‌به‌گوسی بودن توزیع $P_N(n)$ تامین این شرایط محدودیت شدیدی‌رادر سیستم ایجادمی‌کند .زیرااحتمال‌وقوع‌بدترین‌شرایط (یعنی توانهای زیادبرای‌همشنوائی)خیلی کم است . بنابراین‌مناسب‌تراست که risk معینی را برای‌وقوع شرایط بدی‌که باعث ایجاد احتمال‌خطای بیشتر از حد مجاز می‌شود ،قبول کرد و چنین محدودیتی راکه‌باعث غیر اقتصادی شدن طرح می‌شود ، در سیستم‌به‌وجود نیآورد [۱۵] . هرگاه این risk را به میزان ۱ % در نظربگیریم با توجه به گوسی بودن توزیع $P_N(n)$ ، می‌توان‌نتیجه‌گرفت‌که برای ۹۹ % موارد (یا تکرار کننده ها) قدرت همشنوائی از مقدار زیر کمتر خواهد بود .

$$P_N=\bar{X}_n+10\log(V_r^2)+D_N+2.33\,\sigma_{XN}$$

$$=-m_N+10\log(V_r^2)+D_N+I_N+2.33\,\sigma_{XN}$$

1- Uncorrelated

با استفاده‌ازاین مقدار (که برای ۹۹ % موارد صادق خواهد بود) ، نسبت سیگنال به نویز در نقطه تصمیم گیری ، چنین‌می‌شود :

$$(S/N)_d = 10\log (V_r^2) - P_N \qquad (۳۱)$$
$$= m_N - D_N - I_N - 2.33\sigma_{XN} \quad dB$$

نکته جالب دیگر اینکه ، در نقطه تصمیم‌گیری فقط نویز همشنوائی نیست که باعث به وجود آمدن خطا می‌شود ، بلکه‌عوامل‌دیگری مثل isi ، نویزحرارتی ، جیتروهمچنین عدم‌اطمینان‌درمقادیر در نظر گرفته شده برای محاسبه قدرت همشنوائی نیز موثر است وباعث کاهش کیفیت یا افزایش نویز می‌شود [۲۸،۲۶،۱۵] . هرگاه اثر این عوامل را با پارامتر M_e مشخص کنیم ،مقدار S/N کلی در نقطه تصمیم‌گیری چنین می‌شود .

$$(S/N)_d = m_N - D_N - I_N - 2.33\sigma_{XN} - M_e \quad dB \qquad (۳۲)$$

پارامتر M_e به نام حاشیه طرح خوانده می‌شود و مقدارآن بستگی به‌شرایط طرح داردومعمولا "برایش مقداری درمحدوده ۱۲dB تا ۶ در نظر گرفته می‌شود [۲۰ – ۱۸] .

حال فرض کنید توزیع دامنه نویز کلی در نقطه تصمیم‌گیری ،گوسی‌باشد (۱) و میزان S/N مجاز برای تامین‌یک احتمال خطای معین برابر $(S/N)_{od}$ باشد (این مقدار با استفاده ازرابطه ۷ قابل محاسبه است) ، در این صورت برای داشتن‌کیفیت‌قابل‌قبول‌درسیستم‌بایدرابطه زیر برقرار باشد :

$$(S/N)_d \geqslant (S/N)_{od}$$

یا

$$m_N - D_N - I_N - 2.33\sigma_{XN} - M_e \geqslant (S/N)_{od}$$

یا

$$m_N \geqslant (S/N)_{od} + D_N + I_N + 2.33\sigma_{XN} + M_e \qquad (۳۳)$$

بدین ترتیب هرگاه بخواهیم از یک کابل برای انتقال (n+1) سیستم PCM (شامل‌مداررفت وبرگشت) با کیفیت مورد نظر استفاده کنیم ،باید رابطه (۳۳) بین پارامترهای مختلف آن برقرار باشد . همان طور که ملاحظه‌می‌شود حداقل افت NEXT بستگی به σ_N, a_o و n دارد . بایدتوجه داشت که m_N مقدار متوسط افت در فرکانس f_o است . برای فرکانسهای دیگر باید از شیب 4.5 dB/oct. استفاده کرد و مقدار آن رامحاسبه کرد ویا برعکس هرگاه مشخصه افت همشنوائی در فرکانسی غیراز f_o اندازه‌گیری شده باشد ،بایدبااستفاده از شیب فوق مقدار آن‌را در فرکانس f_o برای محاسبات بالا دست آورد .

محاسبات‌فوق‌براساس اطلاعات آماری مربوط به‌افت همشنوائی بین زوجهای مختلف کابل بنا نهاده شده‌اند ، لذا این امکان‌رابه‌وجودمی‌آورندکه‌بتوان‌بدون‌انجام‌آزمایش Pair Selection (که نیاز به وقت زیاد ، نیروی انسانی ووسایل‌اندازه‌گیری‌دارد)سیستم PCM را روی‌زوجهائی که به‌تصادف انتخاب می‌شوند ، به‌کار برد . در صورتی که بخواهیم با استفاده از روش Pair Selection زوج سیمهای مناسب برای یک سیستم PCM را انتخاب کنیم ، باید رابطه (۲۸) را به‌کار بریم . دراین صورت قدرت NEXT چنین می‌شود .

$$P_N(1) = -X_{ON} + D_N + 10\log (V_r^2)$$

یا

$$(S/N)_d = X_{ON} - D_N \geqslant (S/N)_{od} + M_e$$

یا

$$X_{ON} \geqslant (S/N)_{od} + D_N + M_e \quad dB \qquad (۳۴)$$

بنابراین دراین شرایط باید زوج سیمی را انتخاب کرد که مقدار افت NEXT بین آنها در فرکانس f_o از حد فوق کمتر نشود .

مثال ۱ ــ در سیستم با مشخصات زیر

ــ نوع کد : AMI
ــ نوع شکل دهی Raised Cosine با m=o.5
ــ افت فاصله تکرار کننده : L_o=35 dB
ــ احتمال خطای مجاز $P_e=10^{-7}$ برای فاصله تکرار کننده

بادر نظر گرفتن M_e=12 dB ، حداقل افت همشنوائی بین دو زوج سیم مورد نظر چنین به دست خواهد آمد .

(۱) ــ به دلیل وجود عوامل مختلف وبه دلیل صادق بودن قضیه حد مرکزی ، فرض قابل قبولی است .

با استفاده از رابطه (۷) $(S/N)_{od}=20.3dB$

با استفاده از شکل (۵) $D_N=25.7$

با استفاده ازرابطه (۳۴) $X_{ON}\geqslant 58$ dB

هرگاه این‌کابل‌برای‌انتقال ۲۰ سیستم (دردو جهت) به‌کار رود، با انتخاب $\sigma_N=8dB$ و با در نظرگرفتن روابط (۳۰) و (۳۳) خواهیم داشت

$I_N=18.15$ dB , $\sigma_{XN}=4.17$ dB

$m_N\geqslant 85.87$ dB

۵ – ۲ : محاسبهٔ قدرت FEXT

در صورتی‌که سیستمهای استفاده شده روی یک کابل دارای‌جهتهای یکسان‌باشند، FEXT از اهمیت برخوردار خواهد بود. دراین شرایط با استفاده از روش به‌کار رفته در قسمت قبل‌وبا توجه به شکل (۵)، قدرت FEXT ناشی از یک سیستم تداخل کننده در نقطه X چنین می‌شود.

$$p_F(l)=10^{0.1P_F(l)}$$

$$=2\int_0^{2f_o} S_g(f).\left|X_F(f)\right|^2 S'_r(f)\,df$$

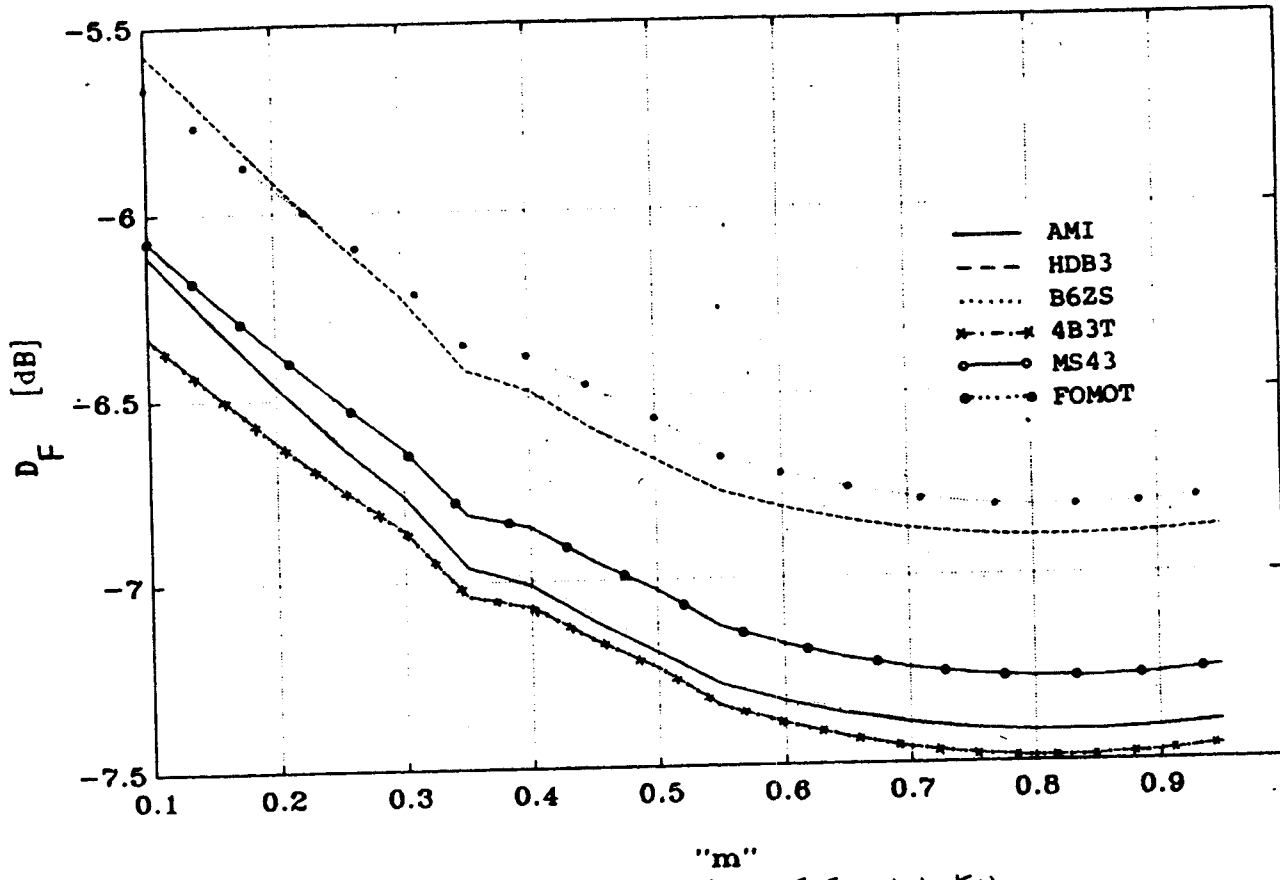
یا با در نظر گرفتن تابع تبدیل FEXT طبق رابطه (۲۰) می‌توان‌نوشت:

$$P_F(l)=-X_{OF}+10\log\left(V_r^2\right)+10\log(l/l_o)+D_F$$

$$D_F=10\log\left[2\int_0^{2f_o}(f/f_o)^2.S_g(f).S'_r(f)\,df\right] \quad (۳۵)$$

چنانکه دیده می‌شود D_f، مستقل از افت فاصله تکرار کننده است و تنها بستگی به‌نوع کد گذاری ونوع شکل دهی دارد. با انتخاب مشخصه Raised Cosine برای R(f)، چگونگی تغییرات D_f برحسب m (ضریب افزایش عرض باند) برای کدهای مختلف در شکل (۸) رسم شده.

در شرایطی که‌ازیک کابل یا قسمتی از یک کابل‌برای انتقال n+1 سیستم PCM (جهت رفت یا برگشت) استفاده شود، قدرت FEXT درنقطه X ازجمع اثرهای n منبع تداخل کننده به‌وجودخواهد آمد. این قدرت همان طورکه دربخش قبلی‌ذکرشد، وقتی‌که‌برحسب dB_m نمایش داده شود، دارای توزیع گوسی‌است‌ومقدارآن‌برای۹۹٪موارد (یا تکرارکننده‌های) کمتراز مقدارزیر خواهد بود.



(شکل (۸) – چگونگی تغییرات D_F برحسب m برای کدهای مختلف

$$P_F=-m_f+10\log V_r^2+10\log(l/l_o)+D_f+I_f+2.33\sigma_{xf}$$
$$\sigma_{XF}=6.593\left\{\log\left[\frac{(n-1+\exp(0.053\sigma_F^2))}{n^2}\right]\right\}^{1/2}$$
$$I_F=5\log\left[\frac{n^3\exp(0.053\sigma_f)}{(n-1)+\exp(0.053\sigma_f^2)}\right] \qquad (۳۶)$$

بنابراین بادرنظرگرفتن $(S/N)_{od}$ به عنوان سیگنال به‌نویز مورد لزوم برای تامین احتمال خطای مجاز، نتیجه می‌شود.

$$m_F \geq (S/N)_{od}+D_F+I_F+2.33\sigma_{XF}+M_e+10\log(l/l_o)\ dB$$
(۳۷)

بدین ترتیب هرگاه بخواهیم از یک کابل برای انتقال n+1 سیستم PCM هم‌جهت (جهت رفت یا برگشت) با کیفیت مورد نظر استفاده کنیم، باید رابطه (۳۷) بین پارامترهای مختلف آن برقرار باشد.

فرض کنید بخواهیم دریک کابل با استفاده از روش Pair Selection زوج‌سیم‌های مناسب برای استفاده دو سیستم PCM را انتخاب کنیم، دراین صورت باید افت FEXT اندازه‌گیری شده بین دو زوج سیم انتخاب شده در فرکانس f_o در رابطه زیر صدق کند.

$$X_{oF} \geq (S/N)_{od}+D_F+M_e+10\log(l/l_o) \qquad (۳۸)$$

مثال ۲ ــ برای سیستمهای PCM با مشخصات داده شده در مثال (۱) نتیجه‌می‌شود.

با استفاده از شکل (۸): $D_F=-7.3$ dB

با استفاده ازرابطه (۳۸) وبا در نظرگرفتن $l=l_o$، حداقل افت همشنوائی لازم (برای n=1) چنین $X_{oF} \geq 20.3-7.3+12 \rightarrow X_{oF} \geq 25$ dB هرگاه این کابل‌برای انتقال 20 سیستم (هم‌جهت) به‌کار رود، باانتخاب $\sigma_F=8$ dB وبادرنظر گرفتن روابط (۳۶)، (۳۷) خواهیم داشت.

$$I_F=18.15\ dB\ ,\ \sigma_{XF}=4.17\ db$$
$$m_F \geq 52.87\ dB$$

نکته ۱: روابط به‌دست آمده برای قدرت همشنوائی حاصل از n منبع تداخل کننده در قسمتهای قبل (روابط ۲۹، ۳۶) برمبنای ناهمزمان‌بودن سیستمهای PCM مختلف بنانهاده شده. در صورتی که از یک کابل برای انتقال سیگنالهای PCM همزمان استفاده شود، مقدارهمشنوائی به علت جمع سیستمهاتیک مولفه‌ای مختلف آن ممکن‌است ازمقدارمحاسبه شده به‌وسیله روابط ۲۹ و ۳۶ تجاوز کند.

این مساله هنگامی‌اهمیت پیدامی‌کند که در شبکه از مراکز سوئیچینگ رقمی استفاده شود. دراین شرایط سیگنالهای PCM خروجی مرکز تلفن دارای‌ساعت (۱) مشترک ودر نتیجه همزمان خواهندبود.

بررسیهای‌انجام‌شده‌درمورد انتقال سیگنالهای PCM همزمان نشان‌داده [۲۷] که درمورد NEXT، شرایط تفاوتی‌نمی‌کندوروابط به‌دست آمده‌برای‌سیستمهای‌ناهمزمان، برای‌سیستمهای‌همزمان‌نیزقابل‌کاربرداست. در موردFEXT، نتیجه بستگی به شرایط سیگنالهای انتقالی از طریق زوج سیمهای تداخل کننده دارد. در صورتی که این سیگنالها نسبت به‌هم بی‌ربط باشند، یعنی‌پلاریته ارقام در سیگنالهای انتقالی‌برای سیستمهای‌مختلف‌تصادفی‌باشند (که عملا" نیز چنین‌است) تفاوت‌چندانی‌بین‌سیستمهای‌همزمان و ناهمزمان وجودندارد. بنابراین‌می‌توان‌نتیجه‌گرفت‌که عملا "سیستمهای همزمان را می‌توان از لحاظ همشنوائی شبیه سیستمهای ناهمزمان فرض کرد. بدترین شرایط برای همشنوائی هنگامی به‌وجود می‌آید که سیستمهای تداخل کننده دائما" رقم ۱ را ارسال کنند (مثلا" در سیستم PCM-30، همگی در حال ارسال Alarm باشند) که‌احتمال به‌وجود آمدن آن خیلی کم است.

نکته ۲ ــ اندازه‌گیریهای همشنوائی در کابلها، اغلب به‌وسیله سیگنالهای سینوسی انجام می‌شود (مقادیر X_{oF} و X_{oN})، درحالی‌که‌برای سیستمهائی که در عمل به کار می‌رود، منابع تداخل‌کننده عرض‌باندوسیع دارند. بنابراین از این نقطه‌نظرباید یک ضریب تصحیح برای مقدار همشنوائی محاسبه‌شده‌درنظرگرفت. بررسیهای انجام‌شده نشان می‌دهد [۲۰] که مقدار متوسط همشنوائی برای دو حالت یکسان است‌ولی‌انحراف استانداردداراى تفاوت جزئی است. رابطه به دست آمده بین انحراف‌استاندارد برای دوحالت نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سیگنالهای باند وسیع، انحراف استاندارد نسبت به حالت سیگنال سینوسی کمی کاهش پیدا می‌کند (شکل ۹ از مرجع ۲۰).

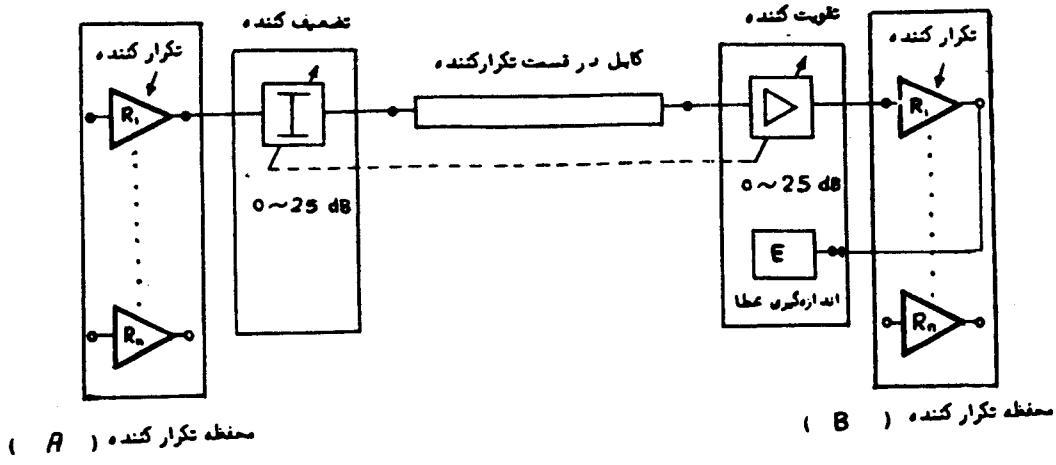
۶ ــ اندازه‌گیری حاشیه کارتکرار کننده ها

از آنجا که روز به روز برتعداد سیستمهای PCM در حال کار، افزوده می‌شود. برای کسب اطمینان از اینکه مفروضات درنظرگرفته‌شده برای طرح هنوز قابل اعتمادهستند

1- Clock

یانه ، اندازه‌گیری تولرانس تکرارکننده‌ها ضروری است . برای این اندازه‌گیری ، ITT سیستمی پیش نهاد کرده که اصول کار آن راشکل (۹) نشان می‌دهد .چنانکه دیده می‌شود ، سیگنال خروجی تکرارکننده قبل ازوارد شدن به محیط انتقال ، تضعیف و پس‌ازگذشتن ازکابل وقبل از وارد شدن به تکرار کننده بعدی به همان اندازه تقویت می‌شود . در نتیجه نویز حرارتی و نویز همنشوائی ناشی ازسیستمهای دیگر تقویت می‌شود . بنابراین آن مقدار ازتضعیفی‌که باعث می‌شوداحتمال خطای سیستم از حد مجاز در نظر گرفته شده ، تجاوز کند ، میزان تولرانس یا حاشیه کار تکرار کننده را مشخص می‌سازد [۳۱ ، ۲۸] .

اندازه‌گیری حاشیه‌کار ازجنبه دیگری نیز حائز اهمیت است .باتوجه‌به اینکه برای طراحی سیستم از یک حاشیه طرح استفاده می‌شود ، عمل کرد سیستم در هنگام نصب ، بهتر از حد موردنظراست ، مخصوصا "اگراندازه‌گیری در شرایطی انجام شود که‌درجه حرارت کابل پائین باشد . اما این شرایط پایدار نخواهدماند ، زیرا اگر احتمال خطا چند ماه پس‌ازنصب اندازه‌گیری‌شود ، مقدارآن بیشتراز زمان نصب خواهد بود . از از این نقطه نظر بهتر است هنگام نصب ، حاشیه کار تکرار کننده‌ها را اندازه‌گیری‌کردتا بتوان تکرار کننده های باحاشیه کم را که ممکن است پس‌ازگذشت زمان ، در دسربیافرینند ، شناسائی‌کرد .زیراتعویض‌سیستم درهنگام نصب خیلی راحت‌تر است تا پس‌ازمدتی کار .



شکل (۹) ــ اندازه‌گیری حاشیه کاربرای تکرار کننده ها

۷ ــ نتیجه

نفوذ روزافزون تکنیک رقمی در شبکه های قیاسی ، استفاده از سیستمهای PCM روی کابلهای زوجی موجود در شبکه رااجتناب‌ناپذیرکرده . به‌علاوه معرفی مراکز سوئیچینگ رقمی درشبکه ،روندااستفاده از این سیستمها را سرعت خواهد بخشید . یکی‌ازمسائلی که‌دراین شرایط اهمیت پیدا خواهد کرد، استفاده‌از یک کابل برای ارسال چند سیگنال PCM با سرعت 2.048 Mb/s است که اقتصادی شدن طرح شبکه را به دنبال خواهد داشت .

حداکثر تعدادسیستمهای PCM که می‌توان روی یک کابل قرار داد تابعی از همشنوائی در فرکانسهای بالاست .

از آنجا که اندازه‌گیری همشنوائی قبل‌از نصب هر سیستم غیر اقتصادی‌است ، روشهای جدید طراحی برمبنای استفاده از اطلاعات آماری افت همشنوائی در کابلهای زوجی بنا نهاده شده .این اطلاعات را می‌توان با انتخاب نمونه‌های‌مختلف‌از کابلهای‌متفاوت به‌کاررفته در سطح شبکه به‌دست آورددچنانکه دیدیم ،بااستفاده از این اطلاعات می‌توان به‌منظوردستیابی به یک احتمال خطای مجاز در فاصله تکرار کننده ، تعداد سیستمهای PCM قابل انتقال ازطریق‌یک کابل را مشخص‌کرد ویااینکه‌حداقل متوسط افت همشنوائی لازم را به‌صورت تابعی از سرعت سیستم ، ظرفیت انتقال کابل وفاصله تکرار کننده‌ها

بیان کرد .

برای به‌دست‌آوردن روابط بالا ، ابتدا کیفیت در یک فاصله تکرارکننده‌مورد توجه قرار گرفت و پارامترهای موثر در عمل کردسیستم معرفی شد ونتیجه گرفته شد که در سیستمهای روی‌کابل‌زوجی ، نویز همشنوائی مهمترین عامل کنترل کیفیت است .لذامحاسبه‌این نوع نویزدر ورودی آشکار ساز موردتوجه قرار گرفت .برای این منظور ابتدا نحوه ایجاد همشنوائی در کابل زوجی بررسی وبه کمک آن مدل سیستم رقمی روی کابل زوجی تعیین‌شد .بااستفاده از مدل به دست آمده اتبداقدرت نویزهمشنوائی درورودی آشکار ساز برای یک سیستم تداخل کننده وسپس براساس آن با استفاده از مشخصات آماری افت همشنوائی ، قدرت همشنوائی در ورودی آشکار ساز وقتی که n سیستم تداخل کننده وجود داشته باشد تعیین شد . این بررسی برای دوحالت زیر انجام گرفت .

الف ــ سیستم با محدودیت NEXT: این شرایط موقعی برقرارخواهد بود که کابل برای انتقال در دو جهت به کار رود .

ب ــ سیستم بامحدودیت FEXT : دراین‌شرایط برای هر جهت انتقال‌ازیک کابل استفاده‌می‌شود یا اینکه در صورت استفاده‌ازیک‌کابل قسمتی‌ازمقطع آن به جهتهای رفت وقسمت دیگر به‌جهت‌های برگشت اختصاص داده می‌شود .

در مواردی که بخواهیم قابلیت اطمینان سیستم را در مقابل خرابیهای کابل افزایش دهیم ، طرح استفاده از دو کابل جداگانه ، توصیه می‌شود .

روابط به‌دست آمده‌برای‌طراحی کلی است و می‌تواند برای هر نوع کدگذاری ، فاصله تکرار کننده و سرعت انتقال به‌کار رود . این روابط برای کاربردهای عملی ، تقریب قابل قبولی دارد واین امکان را به‌وجود می‌آورد که بتوان انتخاب زوج سیم را برای کاربرد PCM به‌طورتصادفی انجام داد . البته‌دراین انتخاب ممکن‌است برای بعضی از سیستمها احتمال خطا ازحد مجاز فراتر رود .

۸ ــ قدردانی

از آقایان مهندس محمد مسعود زرگری و مهندس شاه‌آبادی‌که‌درانجام محاسبات کامپیوتری‌زحمت‌فراوان‌کشیدند صمیمانه تشکر می‌کنم .

فهرست منابـــع

۱ ــ دکتر ناصر رضائی ، سیستمهای انتقال مخابراتی رقمـــی ، گروه برق دانشکده فنی دانشگاه تهران ، جزوه درســی

2 - Bellamy, "Dijital Telephony ", John Wiley, 1982, ch.2

3 - Hans Baur ,"Transmission Technol ogy: Signals for the Next century," Siemens Rev. , 56, March/ April 89, pp.4-7

4 - P.Bylanski D.G.w. Ingram, "Dijital Transmission Systems", Peter Peregrinus Ltd. 1982, ch.7

5 - E. Iwahashi & W. Sakurai, "Designing a Pcm - 16 M SYstem Repeated Line," Rev. of Elect. comm Lab., Vol. 17, Nos. 5-6, May - June 1969

6 - E.D. waldhauer, Quantized Feedback in an Experimental 280 - Mb/s Digital Repeater For coaxial transmission", IEEE trans. on Commun., Vol. coM- 22, pp.1-5 , Jan. 1974

7 - A.M. Giacometti & ph. Uythoven, " The 565 Mb /s 8TR640 SYstem: Equalization Design and performance Analysis," philips Telecom. Rev., Vol. 41, No 3, No. 3,Sep. 83,pp. 175 - 192

8 - W. Kobl, etal, "coaxial Line Eguipment For 34 to 565 Mo/s," Elect. Comm., 1982, 57 (3), pp. 243 - 250

9 - K.S. Shanmugam, "Digital &Analog Communication System, gohn wiley, 1979, p. 194

10 - Bell Staff, "Transmission Systems For communidations, "Bell Lab. Inc., 4th ed. 1970, Ch.11

11- P.G. fontolliet, telecommunication Systems," Artech House Inc., 1986, ch.3

12 - E.D. Sunde, Communication Systems Engineering Theory," John Wiley, 1969, Ch. 11

13 - L. Tachimowicz, etal, Transmission properties of Filled Thermoplastic Insulated and Jacketed Telephone Cables at voice and carrier Frequencies, "LEEE Trans. on commun., Vol. COM - 21, pp. 203 - 209, March 1973

14 - S.H. Lin, " Statistical Behavior of Multipair crosstalk, "Bell SYs. Tech. J. , Vol. 59, No6, July - Aug. 1980, pp. 955-974

15 - B.R. Jacobsen, "Cable Crosstalk Limits Low Capaciry pulse Code Modulation Systems', Elect. Comm. Vol. 48,No. I&& 2, 1973

16 - M. Balas, " Dimensioning of Digital Line Realized on Symmetricpair Cables", Buduvox, no 3, 1987

17 - A.Gibbs & R. Addie," The Covariance of Near End Crosstalk and its Application to PCM SYstem Engineering in Mnltipair Cable", IEEE Trans. on Comm., Vol. Vol. COM - 27,No.2, Feb. 1979, pp. 469 - 477

18 - B.R. Narayama Murthy " Loss Requirements for pcm Transmission", LEEE Trans. on commun. Vol. COM -24, No.1,Jan 1976, pp.88-97

19 - S.D. Bradley, "Crosstalk consideration for a 48 channel PCM Repeated Line', IEEE Trans. on Commmun., Vol. Com-23, NO.7 July 1976, pp. 722 - 728

20 - E.S Usher, etal, "Analysis of Crosstalk Data for Maximizing PCM

System Application", IEEE Trans. on Commun., Vol. COM - 27, NO.11,NoV. 1979, pp. 1737 - 1745

21 - j.B. Buchner, "Ternary Line Codes", Philips Telecom. Rev., Vol. 34, No.2 June 1976, pp.72-86

22 - K.W. Cattermole & J.J.O, Reilly, Mathematical Topics in Tele - Communications; Vol.2, problems of Randomness in communication Engineering",pentech press, 1984, Ch. 15

23 - L.J. Millott, "Aspects of PCM Regenerator Design for crosstalk Limited Enviroments", LEEE Trans. on commun. Vol. COM - 29, Sep. 1981

24 - N.A. Marlow," A Normal Limit Theorem for power sums of Independent Random Variables", BellSSys. J., Nov. 1967, p. 2081

25 - I. Nasell, "Some properties of power Sums of Truncated Normal Random Variables", Bell Sys. Tech. J., Nov. 1967, pp. 2091-2110

26 - S.G. Mc Elvonney, etal, "Design and performance of Digital Transmission Systems operating pairs", British Telecom. Eng. J.,Vol. 3, oct. 1984, pp.187-196

27 - A. Kanemasa, etal, "Multipair Crosstalk in synchronous PCM Systems", Icc 84, paper 23.7

28 - R.J. Catchpole, etal, "planning and Implementation of pCM Systems on Symmetric pair cables", Elect. Conmm., Vol. 57, No. 3, 1982 , pp. 180 - 186

29 - K. Trondle &G. Soder, "Optimization of Digital Transmision Systems", Artech House, 1987

30 - J.Whetter &N.J. Richman, 30- Channel Pulse code Modulation System: part - 2: 2.048 Mb/s Digital Line System, British post office Elect. Eng. J., Vol. 71, July 1978, pp. 82-89

31 - G.J. Semple &A.J. Gibbs, Assessment of Methods for evaluating the Immunity of PCM Regenerator to Near End Crosstalk", IEEE Trans. on Commun. Vol. COM - 30, No. 7, July 1982, pp. 1791 - 1797

* چندمرجع مفید دیگر دراین زمینه جهت اطلاعات بیشتر:

32 - D.Navaro, etal, "Transm ssion of 8.448 Mb/s over Pair cable," IEE 143, Second Int. Conf. on : Telecommunication Transmission Into the Digital era" , 17-20 March 1981, pp. 178 - 181

33 - R.D. Hall & J. Whetter. "the Application of 2Mb/s Digital Line Systems to Symmetric Pair cables", ibid, pp, pp. 164 - 167

34 - W.Altmann, etal," An 8448 Kbit/s Digital Line System for paper-cored Quad cables", ibid, pp. 173 - 177

35 - V. Schmidt & K.V. Winnicki, Digital Transmission on Balanced Copper pairs", Telecom report 10 (1987) Special Multiplexing and Line Transmission, pp.137 - 143