مخابرات

(بخش اول)

استاد صافی

www.mohandesyar.com

مخابرات (استادصادقی)

منبع: سیستم های مخابراتی (کارلسون) ترجمه ی محمود دیانی

ارزشیابی: پایان ترم ۱۲ نمره میان ترم ۶ نمره ۹۹ تکالیف ۲ نمره

مهلت تحویل تکالیف ۲ هفته بعد

سرفصل مطالب:

فصل اول: مقدمه
فصل دوم: انتقال سیگنال
فصل سوم: مدولاسیون خطی
فصل چهارم: مدولاسیون زاویه ای
فصل پنجم: سیستم های مخابراتی آنالوگ
فصل ششم: احتمال و متغیرهای تصادفی (یادآوری - در امتحان نیست)
فصل هفتم: فرایندهای تصادفی و نویز
فصل هشتم: انتقال سیگنال در حضور نویز

فصل اول کتاب: ۱-۱ کامل
۱-۲ تا سری گذاری } تشریحی

فصل سوم کتاب: ۳-۲ کامل
۳-۳ تا سری فوریه

فصل چهارم: ۴-۱ تا سری انتقال میانگذر
۴-۲ کامل
۴-۳ کامل بجز ساختمان گیرنده
۴-۴ تا سری VSB
۴-۵ کامل

www.mohandesyar.com

فصل اول : مقدمه

تعریف سیستم مخابراتی : سیستم مخابراتی سیستمی است که اطلاعات را از یک نقطه (مبدا) به نقطه‌ی دیگر (مقصد) می‌فرستد.

(انتقال اطلاعات)

انتقال اطلاعات ← تصویر ← صوت
                ← داده

پیام : تجسم فیزیکی اطلاعات تولید شده توسط منبع ← آنالوگ
                                                ← دیجیتال

پیام آنالوگ : کمیتی فیزیکی است که به صورت پیوسته و متغیر با زمان (مانند دمای محیط، شدت نور، ولتاژ گرفته از میکروفن، صدای محیط).

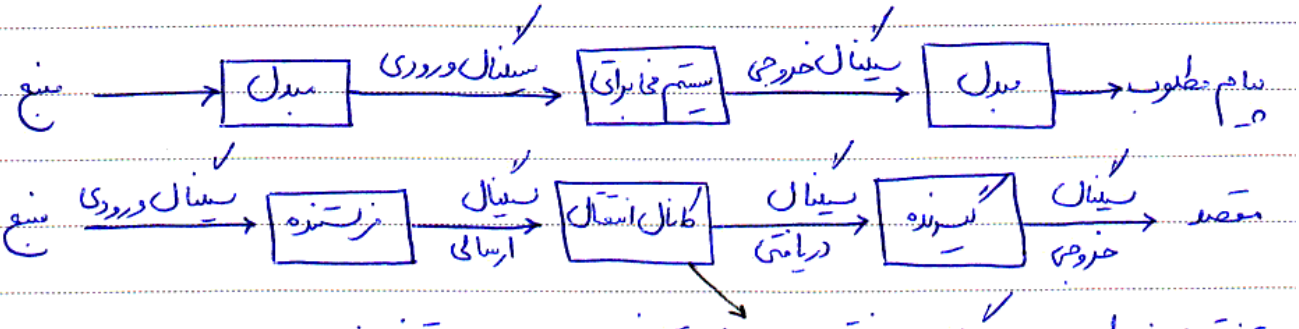
پیام دیجیتال : رشته‌ای مرتب از نمادها است که این نمادها از یک مجموعه متناهی از عناصر گسسته انتخاب شده است.

(گروه خونی افراد، متنی که در یک کتاب وجود دارد، دمای محیط در هر ساعت، متوسط قیمت هر شنبه در هر روز (جمعه‌ها که به صورت یک عدد یا نماد است که بهترین دقت آن گسسته بودن است.)

سیگنال : اغلب پیام تولید شده توسط منابع دنیای غیرالکتریکی است، لذا (ورودی و خروجی سیستم‌های مخابراتی از مبدل‌ها استفاده می‌شود. این مبدل‌ها ورودی پیام را به سیگنال الکتریکی (ولتاژ یا جریان) و در خروجی سیگنال الکتریکی را به پیام مطلوب تبدیل می‌کنند.

www.mohandesyar.com

مبدل: مثل سنسور نور، بلندگو، سنسورها (ترانزیستور، فتوریزیستور، سنسورهای گرمایی)



آفات ناخواسته در سیگنال دریافتی: نویز، تداخل، اعوجاج، تضعیف

کار فرستنده: سیگنال ورودی را به گونه‌ای پردازش می‌کند که سیگنالی مناسب با مشخصات کانال فراهم آورد.

معمولاً پردازش شامل تقویت، مدولاسیون و کدینگ و ... می‌شود.

کانال انتقال: محیطی الکتریکی است که واسط بین منبع و مقصد است و ممکن است یک زوج سیم، کابل هم‌محور، فضا و غیره باشد.

گیرنده: هر کانال مقداری تضعیف دارد (تلفات) که با افزایش فاصله بیشتر می‌شود. سیگنال خروجی کانال را دریافت کرده و سیگنال مناسبی را برای مبدل خروجی فراهم می‌کند. گیرنده به تنهایی جبران‌سازی اثر تضعیف عمل تقویت صورت می‌دهد. همچنین دیکدینگ، دمدولاسیون و ... نیز انجام می‌شود.

اثرات ناخواسته کانال:

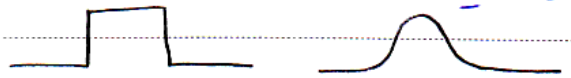
تضعیف: سطح سیگنال کم می‌شود یعنی توان سیگنال کاهش می‌یابد.

www.mohandesyar.com

نویز : شکل موج تغییر می کند بلکه توان آن تغییر می کند.

اعوجاج : تغییر شکل موج سیگنال است که در اثر پاسخ ناقص سیستم به سیگنال مطلوب ایجاد می شود.

برای جبران سازی اعوجاج از نوع خاصی از فیلترها به نام اکولایزر (تعدیل کننده) استفاده می شود.



تداخل :

در اثر وارد شدن سیگنال های ناخواسته (یا منبع انسانی) به سیگنال اصلی صورت می گیرد. در تداخل، گیرنده نمی تواند چند سیگنال را با هم دریافت می کند. چنانچه سیگنال های تداخلی در محدوده ی فرکانسی دیگری غیر از محدوده ی سیگنال اصلی باشند با فیلتر کردن می توان اثرات آن را کاهش داد.

نویز : سیگنال های الکتریکی، تصادفی و غیرقابل پیش بینی هستند که روی سیگنال های اطلاعات سوار شده و سیستم را تا حد زیادی خراب می کنند و از بین می برند که با فیلتر کردن می توان کلی یا بخشی از نویز را کاهش داد.

انواع سیستم های مخابراتی از نظر ارسال و دریافت اطلاعات :

۱) سیستم های یک طرفه (Simplex) (SX) : (رادیو، تلویزیون) : یک طرف فرستنده و طرف دیگر فقط گیرنده است.

۲) سیستم های دوطرفه کامل (full duplex) : (FDX) : سیستمی که هر دو طرف هم فرستنده هم گیرنده هستند و به طور همزمان ارسال و دریافت انجام می دهند. مثل تلفن و تلفون.

www.mohandesyar.com

۳) سیستم‌های نیمه دوطرفه (Half duplex) (HDX) : هر دو طرف هم ارسال شده هم دریافت می‌کنند ولی به صورت غیرهم‌زمان یعنی در هر لحظه یا ارسال‌کننده و یا گیرنده هستند مثل بی‌سیم.

* در انتقال اطلاعات به صورت الکترونیکی دو محدودیت اساسی وجود دارد :

۱) پهنای باند : هرچه تغییرات یک سیگنال نسبت به زمان بیشتر باشد سیگنال واجد بخش‌های بالاتری را شامل می‌شود و در نتیجه محدوده‌ی فرکانسی آن گسترده‌تر خواهد بود و به عبارت دیگر پهنای باند سیگنال بیشتر خواهد بود.

منظور از پهنای باند سیستم : گستره‌ی فرکانسی است که در آن سیستم می‌تواند تغییرات سیگنال را انتقال دهد چون طبیعی سیستم‌های الکترونیکی شامل عناصر ذخیره‌کننده‌ی انرژی هستند (مثل خازن و سلف و ...) و انرژی ذخیره شده نمی‌تواند تغییرات ناگهانی داشته باشد لذا هر سیستم فیزیکی، دارای پهنای باند محدودی است که باعث محدود شدن پهنای باند سیگنال می‌شود و چنانچه پهنای باند سیستم کافی نباشد، سیگنال دچار اعوجاج می‌شود.

۲) نویز : در هر دمای بالاتر از صفر مطلق، انرژی گرمایی موجب حرکت تصادفی ذرات باردار می‌شود که در نتیجه‌ی آن جریان‌ها و ولتاژهایی به نام نویز حرارتی تولید می‌شود.

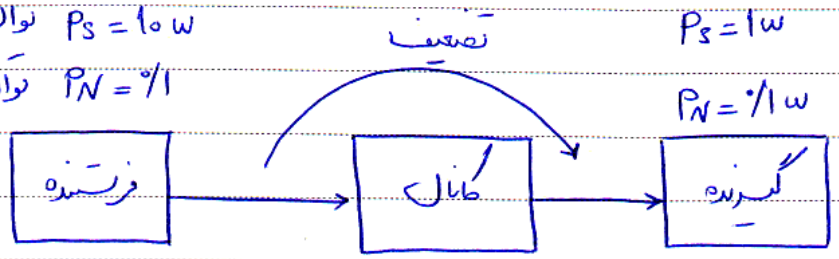
نسبت سیگنال به نویز را برحسب نسبت توان آن‌ها بیان می‌کنیم و با SNR یا (S/N) نمایش می‌دهیم.

معمولاً توان نویز گرمایی بسیار کم است و لذا SNR عدد بزرگی می‌شود. در خطوط راه دور به علت تضعیف در

www.mohandesyar.com

کانال انتقال توان سیگنال دریافتی بسیار کاهش یافته و به خود نویز می‌رسد. لذا SNR عددی نوشته شده

و تقویت سیگنال نیز بی‌فایده است زیرا توان نویز نیز به همراه سیگنال مطلوب افزایش می‌یابد.



$SNR = 100$ $\quad SNR = \frac{\text{توان سیگنال } P_S}{\text{توان نویز } P_N}$ $\quad SNR = 10$

جلسه دوم

فصل دوم: انتقال سیگنال

اعوجاج سیگنال در انتقال — سیگنالی که شکل یا تقویت و تضعیف شود اعوجاج پیدا کرده.

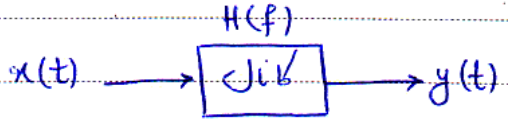
انتقال بدون اعوجاج: انتقالی است که در آن سیگنال خروجی همان شکل سیگنال ورودی را داشته باشد

به بیان دقیق‌تر برای سیگنال ورودی $x(t)$ خروجی در صورتی بدون اعوجاج خواهد بود که تفاوت آن با سیگنال ورودی

تنها در یک ضریب ثابت (مثلاً K) و یک تأخیر زمانی معین (t_d) باشد.

$\begin{cases} K<1 \rightarrow \text{تضعیف} \\ K>1 \rightarrow \text{تقویت} \end{cases}$

به عبارت دیگر:



که در آن K و t_d مقادیر ثابت هستند. $\quad y(t) = K\,x(t - t_d) \rightarrow$ بدون اعوجاج

برای انتقال بدون اعوجاج در حوزه‌ی فرکانس داریم: (تبدیل فوریه)

$$Y(f) = K\,e^{-jwt_d}\,X(f) \qquad (w = 2\pi f)$$

P4PCO

www.mohandesyar.com

چنانچه تابع تبدیل سیستم انتقال را با $H(f)$ نمایش دهیم ؛

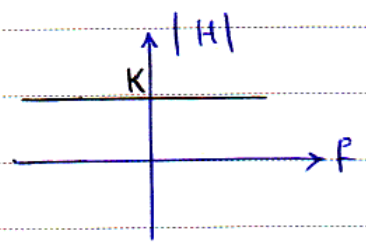
$$H(f)=\frac{Y(f)}{X(f)}=k e^{-j\omega t_d}$$

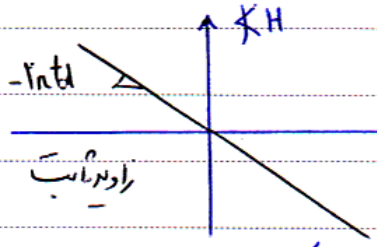
$$=k\, e^{-j2\pi f t_d}$$

← کنترل می‌توانند بدون اعوجاج باشد تابع تبدیل آن به صورت روبرو باشد

$|H(f)|=K \qquad \angle H(f)=-2\pi f t_d$

یادآوری : $re^{j\theta}$ → اندازه r ، θ





یک خط با زاویه‌ی $-2\pi f t_d$

یادآوری : $y=-2x$ → یک خط با زاویه‌ی -3

مشاهده می‌شود که بهای باند این سیستم بی‌نهایت است (چون تمام طیف‌ها را عبور می‌دهد) که در عمل چنین چیزی امکان‌پذیر نیست و لذا همواره میرایی اعوجاج در کانال ایجاد می‌شود.

به طور کلی ۲ نوع اعوجاج ممکن است رخ دهد ؛ ۱ـ اعوجاج خطی ۲ـ اعوجاج غیرخطی

۱ـ اعوجاج خطی : خود به دو دسته‌ی اعوجاج دامنه‌ای و اعوجاج تأخیری تقسیم می‌شود.

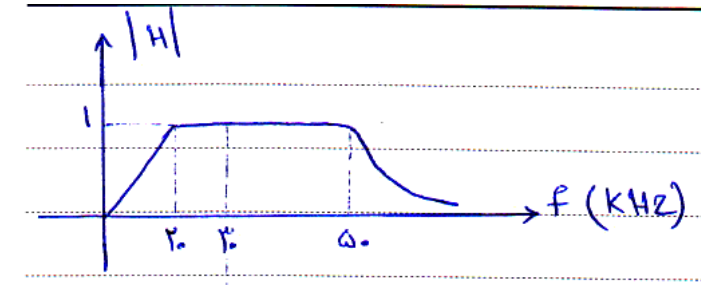
الف) اعوجاج دامنه‌ای : در صورتی ایجاد می‌شود که $|H(f)|$ مخالف K (یک مقدار ثابت) باشد. $|H(f)|\neq K$

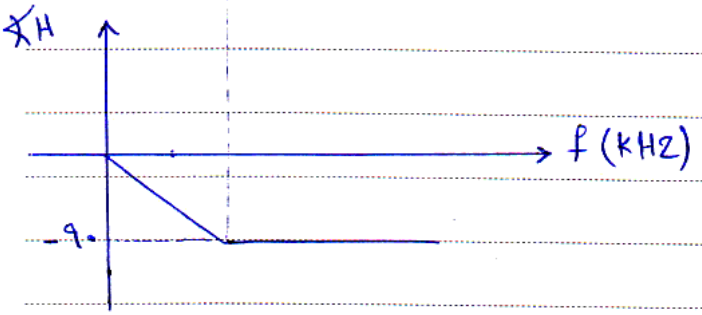
ب) اعوجاج تأخیری : در صورتی ایجاد می‌شود که $\angle H(f)\neq -2\pi f t_d$ باشد. خطی که از مبدأ عبور نکند

۲ـ سیستم غیرخطی : در صورتی ایجاد می‌شود که سیستم شامل عناصر غیرخطی باشد.

مثال) چنانچه پاسخ فرکانسی یک سیستم اعوجاج به صورت زیر باشد طرح ؛

www.mohandesyar.com





پاسخ: فیلتر بالاگذر چون فرکانس ۰ را در ۰ ضرب میکند و فرکانس ۲۰ را در ۱ ضرب میکند یعنی فرکانس های بالا را بیشتر عبور می دهد.

$f < 20\,kHz$ ⟵ اعوجاج دامنه‌ای

$20^{k} < f < 30^{k}$ ⟵ نزول اعوجاج

$30^{k} < f < 50^{k}$ ⟵ اعوجاج تأخیری

$f > 50\,K$ ⟵ هم اعوجاج دامنه‌ای هم تأخیری ⟵ اعوجاج خطی است.

مشاهده می‌شود بهترین محدوده‌ی ارسال سیگنال از بین این سیگنال $20^{k} < f < 30^{k}$ است.

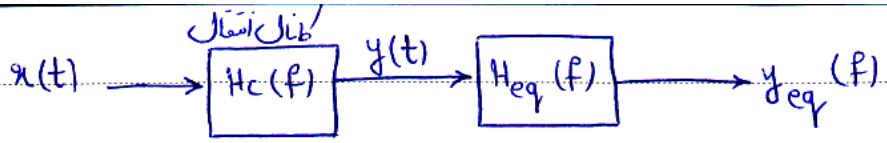
نکته: گوش انسان به اعوجاج تأخیری حساس نیست، بنابراین می‌توان سیگنال‌های صوتی را در محدوده‌ی $30^{k} < f < 50^{k}$ هم ارسال کرد.

تعدیل کننده یا اکولایزر: مسأله‌ی اعوجاج خطی با استفاده از شبکه‌های تعدیل حل شدنی است.

در شکل زیر یک تعدیل کننده یا تابع تبدیل $H_{eq}(f)$ با کانال انتقال دارای اعوجاج $H_C(f)$ سری شده است.

اکولایزر

www.mohandesyar.com



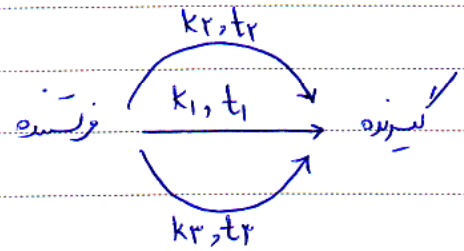
$H(f) = H_c(f)\, H_{eq}(f)$ تابع تبدیل کل سیستم

خروجی نهایی در صورتی بدون اعوجاج خواهد بود (در صورتی اعوجاج جبران سازی می‌شود) که:

$$H(f) = k e^{-j\omega t_d}$$

$$\Rightarrow H_c(f)\, H_{eq}(f) = k e^{-j\omega t_d} \Rightarrow \boxed{H_{eq}(f) = \frac{k e^{-j\omega t_d}}{H_c(f)}}$$

مثال) اعوجاج چندمسیره: در سیستم‌های رادیویی گاهی اوقات دو یا چند مسیر انتشار بین فرستنده و گیرنده اعوجاج چندمسیره ایجاد می‌شود که عملاً به صورت اکو (پژواک) مشاهده می‌شود.



فرض کنیم اعوجاج ۲ مسیره باشد:

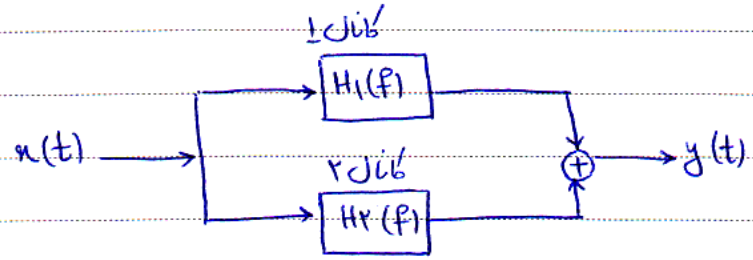
اکو

$$y(t) = k_1 x(t - t_1) + k_2 x(t - t_2)$$

$t_2 > t_1$

$k_2 < k_1$

سیگنال اصلی — چون تضعیف بیشتری شامل حال شده.



$$H_1(f) = k_1 e^{-j\omega t_1}, \quad H_2(f) = k_2 e^{-j\omega t_2}$$

یادآوری: تابع تبدیل دو سیستم موازی از جمع دو تابع تبدیل حاصل می‌شود.

www.mohandesyar.com

تابع تبدیل کل مدار $\Rightarrow H_c(f) = H_1(f) + H_2(f) = k_1 e^{-j\omega t_1} + k_2 e^{-j\omega t_2}$

$$\Rightarrow H_c(f) = k_1 e^{-j\omega t_1}\left(1 + \frac{k_2}{k_1} e^{-j\omega \frac{(t_2 - t_1)}{t_0}}\right)$$

$$\Rightarrow H_c(f) = k_1 e^{-j\omega t_1}\left(1 + K e^{-j\omega t_0}\right) \quad K$$

$$H_{eq}(f) = \frac{k e^{-j\omega t_d}}{H_c(f)} = \frac{k e^{-j\omega t_d}}{\left(1 + K e^{-j\omega t_0}\right) k_1 e^{-j\omega t_1}}$$ مقادیر k، t_d را خواهند.

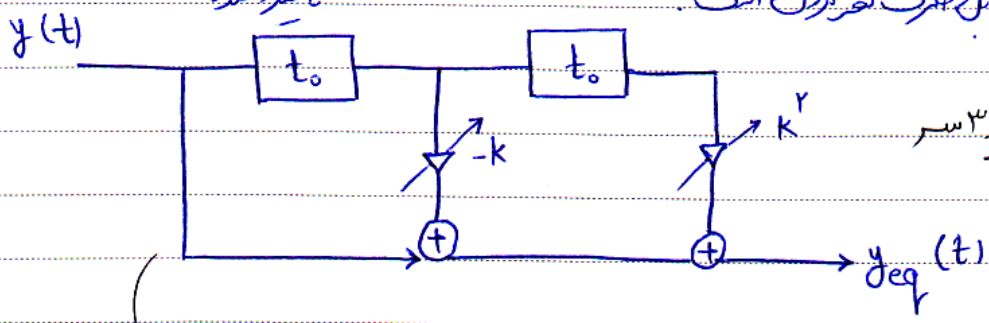
با فرض $K = k_1$ ، $t_1 = t_d$:

$$H_{eq}(f) = \frac{1}{1 + K e^{-j\omega t_0}} = \left(1 + K e^{-j\omega t_0}\right)^{-1}$$

بادآوری: بسط دوجمله‌ای $(a+b)^n = a^n + n a^{n-1} b + \frac{n(n-1)}{2!} a^{n-2} b^2 + \cdots$

$$H_{eq}(f) = 1 - K e^{-j\omega t_0} + K^2 e^{-2j\omega t_0} + \text{جملات بعدی}$$

با فرض وجود آلوی ضعیف چون $K = \frac{k_2}{k_1}$ ، $k_2 < k_1$ لذا K^n برای nهای بزرگ‌تر از ۲ ($n > 2$) به صفر میل می‌کند و قابل صرف نظر کردن است.



خط تأخیر ۳ سر

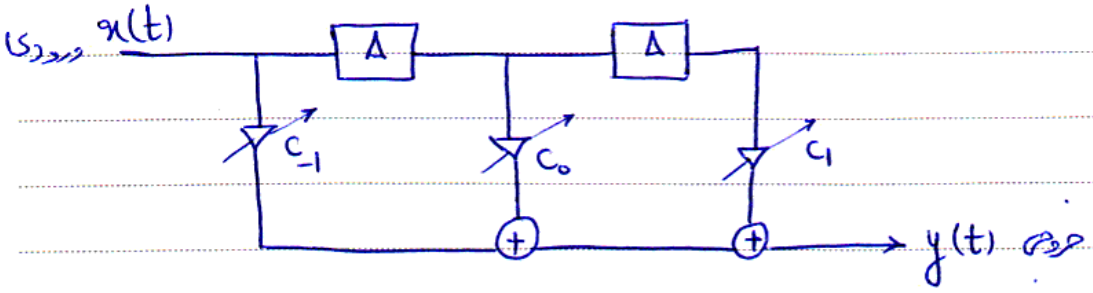
سلول‌های عرضی (آلوانیزرهای دارای خط تأخیر چندسر):

$$y_{eq}(t) = 1 \times x(t) - k x(t - t_0) + k^2 x(t - 2t_0)$$

$$Y_{eq}(f) = x(f) - k e^{-j\omega t_0} x(f) + k^2 e^{-j\omega 2t_0} x(f) \Rightarrow H_{eq}(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

www.mohandesyar.com

برای مثال فیلتر عرضی دارای ۲ خط تأخیر سه سر داریم : (فیلتر عرضی دارای ۲ تأخیر دهنده یا ۲ خط تأخیر)



$$y(t) = C_{-1}x(t) + C_0 x(t-\Delta) + C_1 x(t-2\Delta)$$

$$Y(f) = C_{-1}X(f) + C_0 X(f)e^{-j\omega\Delta} + C_1 X(f) e^{-j\omega 2\Delta}$$

$$H_{eq} = \frac{Y(f)}{X(f)} = C_{-1} + C_0 e^{-j\omega\Delta} + C_1 e^{-j\omega 2\Delta} = e^{-j\omega\Delta}\left(C_{-1}e^{j\omega\Delta} + C_0 + C_1 e^{-j\omega\Delta}\right)$$

در صورتیکه تعداد خطوط تأخیر $2M$ باشد ($1+2M$ سر داشته باشیم) (آخرین خط $2M\Delta$ باشد) برای بود

به صورت زیر تعمیم داده می‌شود :

$$H_{eq}(f) = e^{-j\omega M\Delta}\left(\sum_{m=-M}^{M} C_m e^{-j\omega m\Delta}\right)$$

تابع سینک

عبارت داخل پرانتز بسط سری فوریه‌ای با دوره تناوب $\frac{1}{\Delta}$ است.

از عبارت $e^{-j\omega m\Delta}$ می‌توانیم صرف تأخیر، زیرا معادل یک تأخیر در حوزه زمانی است.

$$H_{eq}(f) = \frac{k\, e^{-j\omega t_d}}{H_C(f)}$$

* اگر تابع کانال $H_C(f)$ باشد ؛

حتی‌الامکان سعی بر این است معادلیزر بود را با سری فوریه‌ای که دوره تناوب آن بزرگ‌تر از بهای باند سیگنال است ،

www.mohandesyar.com

$(W < \frac{1}{\Delta})$ تقریب بزنیم و تعداد جمله‌های مهم آن را مشخص کنیم Δ و M تعیین می‌شوند، بهره‌ی برهانیز برابر

صرایب سری فوریه هستند.

حل تمرین

مثال) تابع تبدیل یک کانال به صورت $H_c(f) = (1 + 2\alpha \cos wT)\, e^{-jwT}$ است، T یک مقدار ثابت $H(f) = k e^{-jwt_d}$ است.

الف) نوع اعوجاج را مشخص کنید؟ تذکری: اگر t_d ثابت باشد در حالیکه اینجا T ثابت است.

ب) خروجی $y(t)$ را برحسب $x(t)$ (ورودی) بیان کرده و نشان دهید خروجی شامل دو ورودی و دو یا چند جمله‌ی تأخیری است.

ج) یک انگیزه برای حرکت سازی اعوجاج این کانال با فرض $\alpha \ll 1$ طراحی کنید؟

د) برای انگیزه طراحی شده، تابع تبدیل کل را به دست آورید؟ راهنمایی؟

$$\cos\alpha = \frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2}$$

الف) اعوجاج دامنه‌ای دامنه بازگانی تغییر می‌کند

$$\begin{cases} |H_c(f)| = 1 + 2\alpha \cos wT & \alpha f \\ \angle H_c(f) = -wT \end{cases}$$

ب)
$$\frac{Y(f)}{X(f)} = (1 + 2\alpha \cos wT)\, e^{-jwT} = \left(1 + \alpha e^{jwT} + \alpha e^{-jwT}\right) e^{-jwT} =$$

$$e^{-jwT} + \alpha + \alpha e^{-2jwT} \Rightarrow Y(f) = e^{-jwT} X(f) + \alpha X(f) + \alpha e^{-2jwT} X(f)$$

عکس تبدیل فوریه

$$\longrightarrow y(t) = x(t-T) + \alpha x(t) + \alpha x(t-2T)$$

- $x(t-T)$: الوی اول — تعداد T ثانیه به عقب
- $\alpha x(t)$: سیگنال اصلی — تضعیف شده چون $\alpha \ll 1$
- $\alpha x(t-2T)$: الوی دوم — تعداد $2T$ ثانیه به عقب

P4PCO

www.mohandesyar.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

$$(1+x)^{-1} = 1-x \quad x \ll 1$$

ج) اعوجاج نداشته

$$x(t) \rightarrow \boxed{H_c(f)} \xrightarrow{y(t)} \boxed{H_{eq}(f)} \rightarrow y_{eq}(t)$$

$$H_{eq}(f) = \frac{k e^{-j\omega t_d}}{H_c(f)} \overset{k=1}{=} \frac{e^{-j\omega nT}}{(1+2\alpha\cos\omega T)e^{-j\omega T}} = e^{-j\omega mT}(1+2\alpha\cos\omega T)^{-1} =$$

حول تقویت و تضعیف برای ما مهم نیست.

$t_d = nT$

$$e^{-j\omega mT}(1-2\alpha\cos\omega T) = e^{-j\omega mT}(1-\alpha e^{-j\omega T} - \alpha e^{j\omega T}) \overset{m=1}{=} e^{-j\omega T} - \alpha e^{-2j\omega T} - \alpha$$

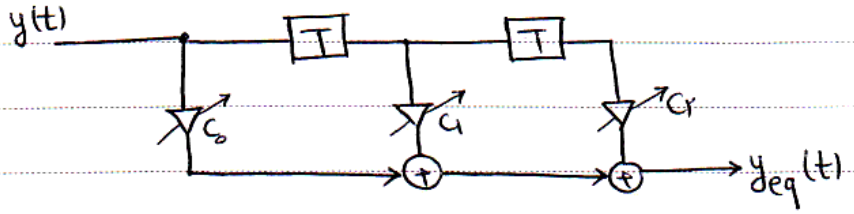
(تقدم / تأخیر / نه تقدم نه تأخیر (هم زمان))

علی است (در واقعیت می‌تواند رخ دهد)

سیستم به تقدم داشته باشد وجود ندارد پس m را یک انتخاب می‌کنیم.

اگر سئوال تقدم نیاز داشتیم می‌توانستیم m را صفر در نظر بگیریم.

* جمله‌ی $\alpha e^{j\omega T}$ بیانگر تقدم نیاز است و نه تأخیر نیاز، لذا سیستم غیر علی است. پس باید m را به گونه‌ای انتخاب کنیم که حاصل ضرب $e^{-j\omega mT}$ در این جمله، تأخیری ایجاد کند.



$C_0 = -\alpha$

$C_1 = 1$

$C_2 = -\alpha$

د)

$$H_t(f) = H_c(f)H_{eq}(f) = \left[\alpha + \alpha e^{-2j\omega T} + e^{-j\omega T}\right]\left[-\alpha + e^{-j\omega T} - \alpha e^{-2j\omega T}\right]$$

$(a-b)(a+b)$

$a^2 - b^2$

$$= e^{-2j\omega T} - \left(\alpha + \alpha e^{-2j\omega T}\right)^2$$

$\alpha^2(\quad)$

$\alpha^2 \to 0$

بنابراین کل سیستم مسابقت تأخیر به اندازه‌ی $2T$ است.

ه) تابع تبدیل کلی به صورت $H_c(f) = e^{-j(\omega T - \alpha\sin\omega T)}$ است.

آیا نوع اعوجاج را مشخص کنید؟

www.mohandesyar.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

$$x(t)y(t) \xrightarrow{\text{تبدیل فوریه } \mathcal{F}} X(f) * Y(f)$$

ب) بازه‌ی $|\alpha| \ll \frac{\pi}{2}$ بسان دهیدروجی شامل یک اتم کربن متصل به اتم اکسیژن می‌باشد.

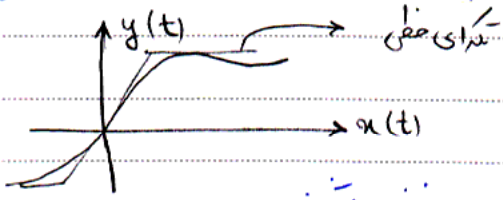
ج) بازه‌ی $\alpha = \pi/2$ یک اتم یا یون جهت جذب سازی اعوجاج طراحی نشده.

د) تابع تبدیل کل سیستم را به دست آورید. راهنمایی:

$$\sin \omega T = \frac{e^{j\omega T} - e^{-j\omega T}}{2j}$$

اعوجاج غیرخطی:

سیستم غیرخطی را می‌توان تابع تبدیل نامید که ورودی مقادیر لحظه‌ای ورودی و خروجی هر لحظه‌ی آن را توسط یک تابع ریاضی به هم مربوط می‌سازد. این تابع ریاضی، مشخصه‌ی تبدیل نام دارد.



می‌توان مشخصه را به صورت تندای خطی نشان داد و یا توسط یک چند جمله‌ای تخمین زد.

$$y(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + \cdots$$

$$\xrightarrow{\text{تبدیل فوریه}} Y(f) = a_1 X(f) + a_2 X(f) * X(f) + a_3 X(f) * X(f) * X(f) + \cdots$$

در واقع جمله‌ی دوم به بعد باعث ایجاد اعوجاج می‌شود.

چنانچه $x(t)$ دارای پهنای باند محدود W باشد، خروجی تندای خطی نیز فقط در $|f| < W$ دارای مولفه‌های فرکانسی است ولی در تندای غیرخطی، خروجی شامل $X(f) * X(f)$ با پهنای باند $2W$ و $X(f) * X(f) * X(f)$ با پهنای باند $3W$ و ... خواهد بود؛ لذا در خروجی سیستم‌های غیرخطی، فرکانس‌های وجود دارد در

www.mohandesyar.com

Subject: با خرید پسته حیدری !

Year. Month. Date. ( )

$$\cos(2\pi f_0 t) \xleftrightarrow{F} \frac{1}{2}\left[\delta(f-f_0)+\delta(f+f_0)\right]$$
$$\sin(2\pi f_0 t) \xleftrightarrow{F} \frac{1}{2j}\left[\delta(f-f_0)-\delta(f+f_0)\right]$$

ورودی بوده اند. از طرف دیگر حیدری $x(f)*x(f)$ دارای مولفه‌هایی در $|f|<W$ بیشتر هست تا $x(f)$

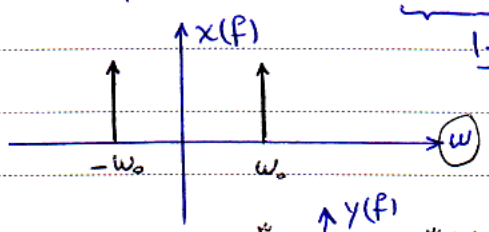
هم بوسای دارد حتی اگر توسط فیلتر ایوان مولفه‌های اضافی لبه‌ی $|f|>W$ را حذف کرد، روش مناسبی جهت حذف

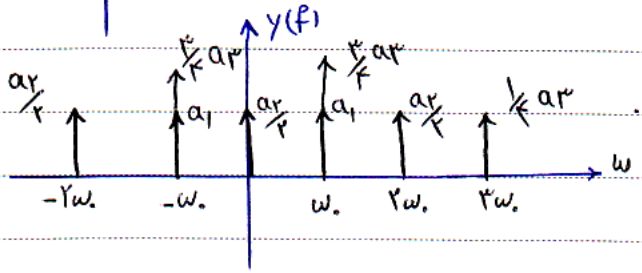
$$\begin{cases}\cos^2 u = \dfrac{1+\cos 2u}{2} \\ \cos^3 u = \dfrac{3}{4}\cos u + \dfrac{1}{4}\cos 3u\end{cases}$$

مولفه‌های اضافی لبه‌ی $|f|<W$ وجود ندارد.

مثال: اگر $x(t)=\cos w_0 t$ را به عنوان ورودی یک سیستم غیرخطی اعمال کنیم داریم:

$$y(t) = a_1\cos w_0 t + a_2\cos^2 w_0 t + a_3\cos^3 w_0 t$$
$$\frac{1+\cos 2w_0 t}{2} \qquad \frac{3}{4}\cos w_0 t + \frac{1}{4}\cos 3w_0 t$$





DC فرکانس آن صفر است.

$$y(t) = \left(\frac{a_2}{2} + \frac{3a_4}{8} + \dots\right) + \left(a_1 + \frac{3}{4}a_3 + \dots\right)\cos w_0 t +$$
$$\left(\frac{a_2}{2} + \frac{a_4}{4} + \dots\right)\cos 2w_0 t + \dots$$

هارمونیک دوم، فرکانس آن دوبرابر فرکانس اصلی است.

$$\text{اعوجاج هارمونیک دوم} = \frac{\text{دامنه‌ی هارمونیک دوم}}{\text{دامنه‌ی هارمونیک اصلی}} \times 100\% = \frac{\frac{a_2}{2} + \frac{a_4}{4} + \dots}{a_1 + \frac{3}{4}a_3 + \dots}$$

نکته: اگر $x(t)=\cos w_0 t \cos w_1 t$ به عنوان ورودی یک سیستم غیرخطی اعمال شود هارمونیک‌های f_1، f_2، f_1-f_2،

f_1+f_2، f_1-2f_2، ... نیز ظاهر می‌شوند.

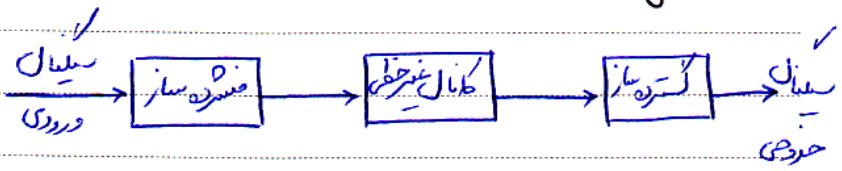
www.mohandesyar.com

روش Companding :

Companding

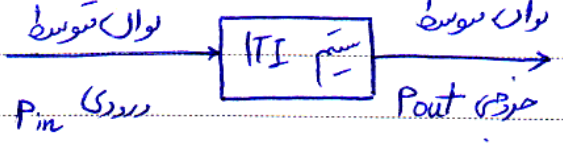
فشرده سازی Compressing

گسترده سازی expanding



به راه برای حذف یکی از اثرهای غیرخطی، از بین بردن سیگنال در محدوده‌ی خطی سیگنال است. بدین ترتیب که ابتدا با استفاده از فشرده سازی در ورودی، دامنه‌ی سیگنال ورودی را طوری داده و در محدوده‌ی خطی کانال قرار می‌دهیم. پس از ارسال، در گیرنده با استفاده از گسترده سازی، سیگنال را به شکل اولیه‌ی خودش برمی‌گردانیم.

تضعیف (افت) در انتقال :



بهره توان : $g = \frac{P_{out}}{P_{in}}$

در سیستم‌های با بهره توان بسیار بالا (بالا) و پایین (بسیار پایین) بهتر است g به صورت dB (دسی بل) نوشته شود.

$$g_{dB} = 10 \log_{10} g \Rightarrow g = 10^{(g_{dB}/10)}$$

مزیت استفاده از dB : توان‌های ۱۰ را به ضرب ما تبدیل می‌کند.

مثال)

$$g = 10^m \Rightarrow g_{dB} = 10 \log_{10} 10^m = 10m$$

* اگر $g<1 \Rightarrow$ تضعیف $\Rightarrow g_{dB} < 0$

www.mohandesyar.com

* بهره واحد : $g=1 \Rightarrow g_{dB}=0$ همان چیزی که ارسال شده دریافت می‌شود.

* تقویت : $g>1 \Rightarrow g_{dB}>0$

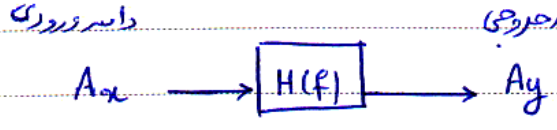
گاهی اوقات خود توان (و نه نسبت توان) را بر حسب dB بیان کنیم، در این صورت آن را بر 1W یا 1mW تقسیم می‌کنیم.

$$P_{dBW}=10\log_{10}\frac{P}{1W}$$

$$P_{dBm}=10\log_{10}\frac{P}{1mW}$$

$$P_{out}=gP_{in} \Rightarrow \frac{P_{out}}{1mW}=g\frac{P_{in}}{1mW} \xrightarrow{\text{لگاریتم}} P_{out\,dBm}=g_{dB}+P_{in\,dBm}$$

ضرب و تقسیم به جمع و تفریق تبدیل می‌شوند.



$$|H(f)|=\frac{A_y}{A_x}$$

$$P_x=\frac{1}{2}A_x^2$$

با فرض توان نرمالیزه شده به صورت $\frac{V^2}{2}$ داریم:

$$P_y=\frac{1}{2}A_y^2=\frac{1}{2}A_x^2|H(f)|^2=|H(f)|^2P_x \Rightarrow \frac{P_y}{P_x}=|H(f)|^2=g$$

مثال) اگر $H(f)=ke^{-jwt_d}$ سیستم خطی است چون تابع تبدیل دارد.

$|H(f)|=K \Rightarrow g=K^2=\text{const}$ ثابت

برای مرحله‌های مختلف بهره توان یکی است.

اگر $H(f)\neq ke^{-jwt_d}$ در این صورت $|H(f)|^2$ تغییرات g را بر حسب مرحله نشان می‌دهد.

$$|H(f)|^2=K^2f^2=g$$

www.mohandesyar.com

تضعیف: جایی که $P_{in} > P_{out}$ باشد یعنی توان از تضعف استفاده می‌کنیم.

$$L = \frac{1}{g} = \frac{P_{in}}{P_{out}} \qquad L_{dB} = -g_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{L} \Rightarrow P_{out_{dBm}} = P_{in_{dBm}} - L_{dB}$$

نکته: برای خطوط انتقال، کابل‌های هم‌محور و موج‌برها، توان خروجی با افزایش طول به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

یک خط انتقال برای انتقال انواع

$$P_{out} = 10^{-\frac{\alpha d}{10}} P_{in}$$

d: طول مسیر

α: ضریب تضعیف برحسب $\frac{dB}{km}$

$$L = \frac{P_{in}}{P_{out}} = 10^{\frac{\alpha d}{10}}$$

$$L_{dB} = 10 \log_{10} L = 10 \log_{10} 10^{\frac{\alpha d}{10}} = 10 \times \frac{\alpha d}{10} = \alpha d \Rightarrow \boxed{L_{dB} = \alpha d}$$

α برای خط‌های انتقال مختلف و برای هر کابس حصر مختلف متفاوت است.

مثال) وقتی که طول یک کابل انتقال با ضریب تضعیف $\alpha = 3 \frac{dB}{km}$ برابر $20\,km$ است. در این صورت

$$\begin{cases} \alpha = 3 \frac{dB}{Km} \\ d = 20\,km \end{cases} \Rightarrow L_{dB} = \alpha d = 90\,dB \Rightarrow L = 10^{\frac{L_{dB}}{10}} = 10^{9}$$

دایم:

$$\Rightarrow P_{in} = 10^{9} P_{out}$$

چنانچه طول مسیر ۲ برابر شود:

$$L_{dB} = 2\alpha d = 180\,dB$$

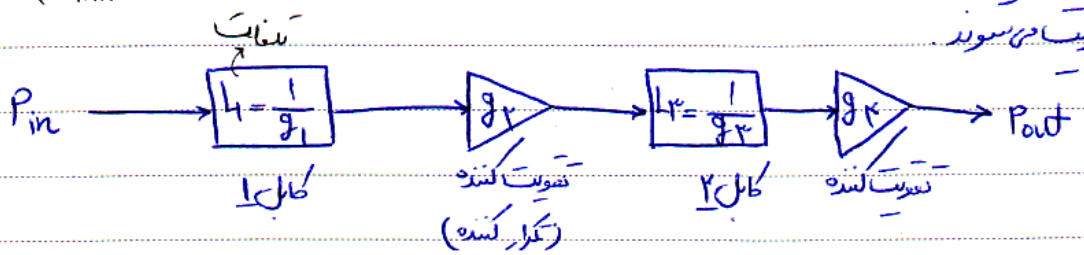
$$L = 10^{18} \Rightarrow P_{in} = 10^{18} P_{out}$$

www.mohandesyar.com

به‌عنوان مثال حداقل $P_{in}=1G\frac{W}{}$ باشد $P_{out}=1mW$ خواهد بود.

در هنگام تضعیف زیاد، برای افزایش توان خروجی به تقویت نیاز داریم. تقویت کننده را باید در طول مسیر قرار دهیم زیرا اگر در انتها عمل تقویت انجام شود سطح توان سیگنال بسیار ضعیف یافته و به حد نویز می‌رسد و لذا هم سیگنال و هم نویز تقویت می‌شوند.

100mW 25mW



$$P_{out}=g_1 g_2 g_3 g_4 P_{in}=\frac{g_2 g_4}{L_1 L_3}P_{in}$$

$$P_{out\,dBm}=g_{2\,dB}+g_{4\,dB}-L_{1\,dB}-L_{3\,dB}+P_{in\,dBm}$$

مثال ۲) یک سیستم تقویت کننده با طول کابل ۳۰۰۰ km از m قطعه کابل یکسان با ضریب تضعیف $\alpha=0.4\frac{dB}{km}$ و m تقویت کننده‌ی یکسان تشکیل شده است. m را طوری بیابید که $P_{out}=P_{in}=100\,mW$ شود. توان ورودی؟

هر تقویت کننده حداکثر $25\,mW$ باشد. (حداقل m چقدر باشد.) ابتدا d را حساب می‌کنیم.

بهره‌ی توان تقویت کننده‌ها را برای m به دست آمده حساب کنید.

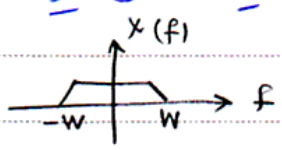
www.mohandesyar.com

فصل سوم: مدولاسیون خطی

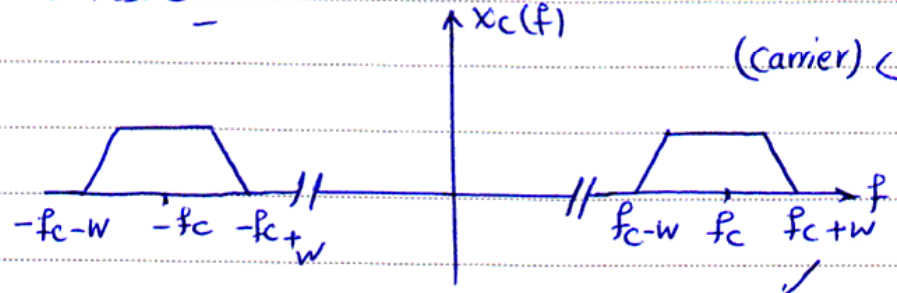
مدولاسیون: فرآیندی است خطی که در آن یک سیگنال پایین گذر به یک سیگنال میان گذر تبدیل می‌شود. سیگنال پایین گذر سیگنالی است که طیف آن فقط در محدوده‌ی فرکانس های پایین مقدار دارد. برعکس عمل مدولاسیون، دمدولاسیون می‌گوییم.

هدف از مدولاسیون ایجاد سیگنالی مطابق ویژگی های کانال است.

$x(t)$: سیگنال پیام ⇒ سیگنال پایین گذر



$x_c(t)$: سیگنال مدوله شده



f_c: فرکانس حامل (carrier)

در مدولاسیون علاوه بر سیگنال پیام، یک سیگنال دیگر به نام موج حامل نیز داریم. در واقع در مدولاسیون، یک ویژگی موج حامل، متناسب با سیگنال پیام تغییر می‌کند.

مزایای مدولاسیون:

۱) انتقال برد زیاد: با استفاده از ویژگی جابجایی فرکانسی در مدولاسیون می‌توان اطلاعات را بر موج حاملی سوار کرد که

www.mohandesyar.com

فرکانس آن بیشترین بازده (کمترین تلفات) را داشته باشد.

مثلاً در انتشار امواج رادیویی، طول آنتن باید حدود ۱/۰ طول موج سیگنال باشد چنانچه برای سیمی بهنای باند

برابر ۱۰۰ KHz باشد طول آنتن:

$$f = 100\,HZ \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\times10^8}{10^2} = 3\times10^6\,m = 3000\,Km$$

$$\text{طول آنتن} = \frac{1}{10} \times 3000\,km = 300\,km$$

اگر در همین سیستم مدولاسیون انجام شود (فرکانس حامل 100 MHZ باشد):

$$f = 100\,MHZ$$

$$\lambda = \frac{3\times10^8}{10^8} = 3m \Rightarrow \text{طول آنتن} = 30cm$$

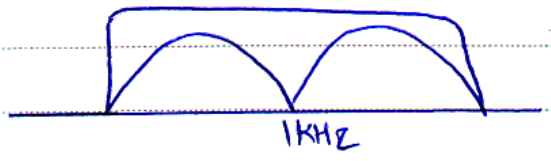
۲) رفع محدودیت های سخت افزاری: قیمت و دسترسی به انواع سخت افزارها به فرکانس کاری آن ها بستگی دارد.

با استفاده از مدولاسیون، فرکانس سیگنال را در محدوده ای قرار می دهیم که محدودیت های سخت افزاری از بین برود.

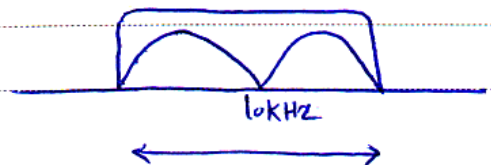
به عنوان مثال برای سیلترها، چنانچه بهنای باند سیگنال در محدوده ۱ تا ۱۰ KHz باشد، پیچیدگی و هزینه های سخت افزاری

را حداقل خواهد نمود.

$$\text{بهنای باند نسبی} = \frac{B}{f_c} = \frac{\text{بهنای باند}}{\text{فرکانس مرکزی}}$$



$$\text{بهنای باند نسبی} = \frac{200}{1K} = 0.2 \text{ یا } 20\%$$



$$\text{بهنای باند نسبی} = \frac{200}{10K} = 2\%$$

P4PCO

www.mohandesyar.com

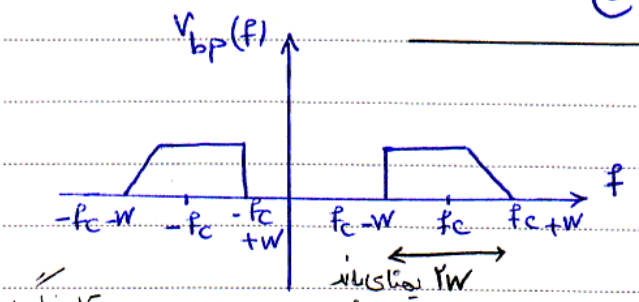
۳) کاهش نویز تداخل و اعوجاج: برگشتی برخی از روش‌های مدولاسیون که نویز و تداخل است به عنوان مثال نویز متعارف هیچ اثری بر سیگنال مدوله شده‌ی FM ندارد. همچنین با انتخاب پهنای باند کانال در روش‌های مختلف می‌توان فرکانس حامل را به گونه‌ای انتخاب کرد که کمترین اعوجاج را داشته باشد.

۴) تخصیص فرکانس: با اختصاص فرکانس‌های حامل متفاوت به ایستگاه‌ها، امکان جداسازی سیگنال مورد نظر توسط فیلتر ایجاد می‌شود.

۵) امکان دسترسی چندگانه به کانال (Multiplexing): با تقسیم‌بندی فرکانسی می‌توان چند سیگنال را به طور همزمان توسط یک کانال ارسال کرد.

۶) ایجاد امنیت در محاوره‌ی تلفنی و ارسال پیام با تغییرات سریع فرکانس حامل.

سیگنال‌های پیوسته گذر:



شکل طیفی سیگنال پیوسته در حوزه‌ی فرکانس:

$$\begin{cases} V_{bp}(f) = 0 & |f| > f_c+W \quad , \quad |f| < f_c-W \\ V_{bp}(f) \neq 0 & f_c-W < |f| < f_c+W \end{cases}$$

شکل طیفی در حوزه‌ی زمان:

$$V_{bp}(t) = A(t)\cos\left(\omega_c t + \phi(t)\right)$$

کوچک

www.mohandesyar.com

$$V_{bp}(t) = V_i(t)\cos\omega_c t - V_q(t)\sin\omega_c t$$

Subject:

Year. Month. Date. ( )

فاز سیگنال : $\phi(t)$ — دامنه (پوش) سیگنال : $A(t)$

فرکانس حامل : f_c — فرکانس زاویه‌ای سیگنال : $\omega = 2\pi f_c$

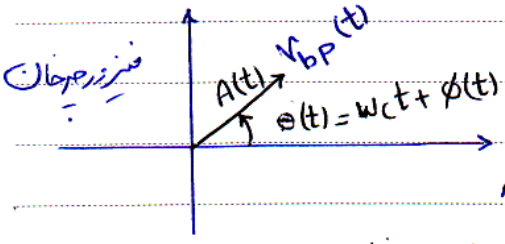
$$\text{فرکانس لحظه‌ای} = \frac{1}{2\pi}\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi}\frac{d(\omega_c(t)+\phi(t))}{dt} = \frac{1}{2\pi}\left(\omega_c + \frac{d\phi(t)}{dt}\right)$$

$$= f_c + \frac{1}{2\pi}\phi'(t)$$

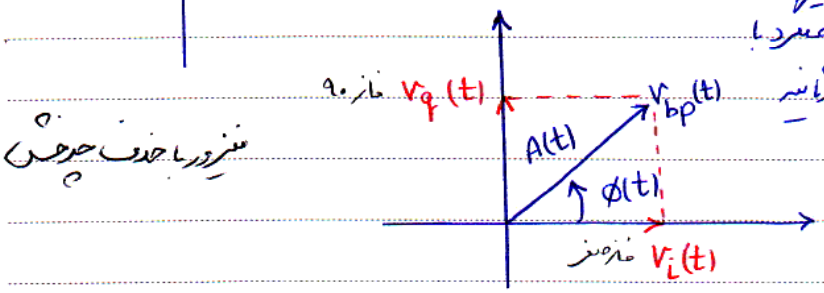
$A(t) \geq 0$ فرض می‌شود

مقادیر مثبت دامنه با افزودن $\pm 180°$ به فاز اعمال می‌شود.

نمایش برداری (بیزوری) سیگنال :



فرکانس حامل $\omega_c t$: حرکت پادساعتگرد با سرعت f_c دور در ثانیه



مولفه‌ی هم‌فاز $V_i(t) = A(t)\cos\phi(t)$

$$A(t) = \sqrt{V_i^2(t) + V_q^2(t)}$$

مولفه‌ی ربعی $V_q(t) = A(t)\sin\phi(t)$

$$\phi(t) = \tan^{-1}\frac{V_q(t)}{V_i(t)}$$

از حوزه‌ی دیگر داریم :

$$V_{bp}(t) = A(t)\cos\underbrace{(\omega_c t}_{\alpha} + \underbrace{\phi(t)}_{\beta}) =$$

$$A(t)\left[\cos\omega_c t\cos\phi(t) - \sin\omega_c t\sin\phi(t)\right] =$$

$$V_i(t)\cos\omega_c t - V_q(t)\sin\omega_c t = V_i(t)\cos\omega_c t + V_q(t)\cos(\omega_c t + 90)$$

فاز ۹۰ — فاز صفر

هم‌فاز — ربعی

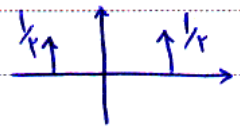
PqPCO

www.mohandesyar.com

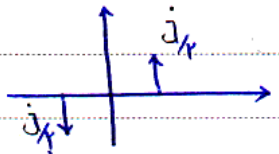
نکته ۱) توصیف سیگنال براساس مولفه‌های هم‌فاز و ربعی جهت تعیین سیگنال در حوزه‌ی زمان مفید است.

یادآوری:

$$\cos w_c t \xrightarrow{F} \frac{1}{2}\left[\delta(f-f_c)+\delta(f+f_c)\right]$$



$$\sin w_c t \xrightarrow{F} \frac{j}{2}\left[\delta(f+f_c)-\delta(f-f_c)\right]$$



$$v_i(t)\cos w_c t \xleftrightarrow{F} \frac{1}{2}V_i(f) * \left(\delta(f-f_c)+\delta(f+f_c)\right)$$

$$= \frac{1}{2}V_i(f-f_c)+\frac{1}{2}V_i(f+f_c)$$

$$v_q(t)\sin w_c t \xleftrightarrow{F} \frac{j}{2}V_q(f-f_c)-\frac{j}{2}V_q(f+f_c)$$

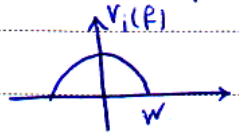
$$v_i(t) \xleftrightarrow{F} V_i(f) \qquad v_q(t) \xleftrightarrow{F} V_q(f)$$

تبدیل دوربه عبارت آخر به تحلیل

$$V_{bp}(f) = \frac{1}{2}V_i(f-f_c)+\frac{1}{2}V_i(f+f_c)+\frac{j}{2}V_q(f+f_c)-\frac{j}{2}V_q(f-f_c)$$

نکته ۲) توابع هم‌فاز و ربعی (V_i ، V_q) سیگنال‌های باس‌باند هستند، یعنی برازای $|f|>w$:

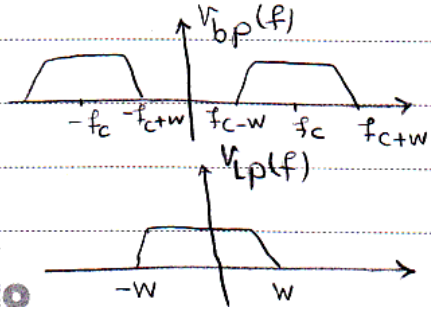
$$|f|>w \;:\; V_i(f)=V_q(f)=0$$



نتیجه: $V_{bp}(f)$ از روی طیف باس‌باند $V_i(f)$ و $V_q(f)$ تشکیل شده است نه اسپکتروم باس‌باند (سیگنال باند

شده) و $V_q(f)$ به اندازه‌ی ۹۰° تغییر فاز یافته است.

طیف هم‌ارز باس‌باند یک سیگنال میان‌باند:



PAPCO

www.mohandesyar.com

$u(f) = \begin{cases} 0 & f<0 \\ 1 & f>0 \end{cases}$ $\quad u(f-f_c) = \begin{cases} 0 & f<f_c \\ 1 & f>f_c \end{cases}$

low pass

$$V_{Lp}(f) = \frac{1}{2}\left(V_i(f) + jV_q(f)\right) = V_{bp}(f+f_c)\,u(f+f_c)$$

به عبارت دیگر $V_{Lp}(f)$ همان بخش مثبت $V_{bp}(f)$ است که به حول مبدا منتقل شده است.

$$V_{Lp}(t) = \frac{1}{2}\underbrace{V_i(t)}_{A(t)\cos\phi(t)} + \frac{j}{2}\underbrace{V_q(t)}_{A(t)\sin\phi(t)} = \frac{1}{2}A(t)\,e^{j\phi(t)}$$

تبدیل پایین گذر به میان گذر و (حوزه زمان)

$$V_{bp}(t) = Re\left\{A(t)\,e^{j\phi(t)}\,e^{jw_ct}\right\}$$

$$= 2Re\left\{\frac{1}{2}A(t)\,e^{j\phi(t)}\,e^{jw_ct}\right\} = 2Re\left\{V_{Lp}(t)\,e^{jw_ct}\right\}$$

در حوزه فرکانس:

$$V_{bp}(f) = V_{Lp}(f-f_c) + V_{Lp}^*(-f-f_c)$$

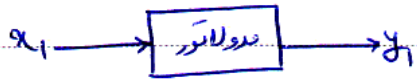
که $V_{Lp}^*(f)$ از قرینه کردن $V_{Lp}(f)$ حول محور عمودی به دست می‌آید.

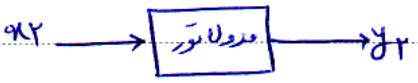
$$V_{bp}(f) = V_{Lp}(f-f_c) + V_{Lp}^*(-f-f_c)$$

$$V_{Lp}(t) = \frac{1}{2}A(t)\,e^{j\phi(t)}$$

$$V_{bp}(t) = 2Re\left\{V_{Lp}(t)\,e^{jw_ct}\right\}$$

مدولاسیون آنالوگ
- خطی
  - مدولاسیون دامنه
    - دوکنار باندی
      - AM (مدولاسیون دامنه معمولی)
      - DSB (مدولاسیون دوکنار باندی بدون حامل)
    - تک کنار باندی
      - SSB (مدولاسیون تک کنار باندی)
      - VSB (مدولاسیون تک کنار باندی بقایی)
- زاویه‌ای





خطی

$$\alpha x_1 + \beta x_2 \longrightarrow \boxed{\text{مدولاتور}} \longrightarrow \alpha y_1 + \beta y_2$$

مدولاسیون خطی
- مدولاسیون دامنه دوکنار باندی
  - AM (مدولاسیون دامنه معمولی)
  - DSB (مدولاسیون دوکنار باندی بدون حامل)
- مدولاسیون دامنه تک کنار باندی
  - SSB (مدولاسیون تک کنار باندی)
  - VSB (مدولاسیون تک کنار باندی بقایی)

www.mohandesyar.com

در سایه سار اندیشه ، بی هیچ چشم داشت زمینی

عهد بسته ایم آسمانی شویم .

در این محفل علمی با ما همراه باشید.

زمان : همین حالا تا همیشه

مکان : تارنمای برق ایران ؛ www.tbi-net.com

رسیده ایم پر از رنج راه تا دریا

خوشا یکی شدن رودها خوشا دریا

نه ما نه من نه تو ، او نقطه سرانجام است

بیا که بی من و تو ما شویم و ما دریا

من و تو چشمه باران ابر او بودیم

از ابتدا دریا بود و انتها دریا

www.mohandesyar.com