



به نام خدا

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده‌ی مهندسی برق

سیستم‌های مخابراتی - گروه دکتر پاک‌روان

نیم‌سال اول ۱۴۰۲-۱۴۰۳

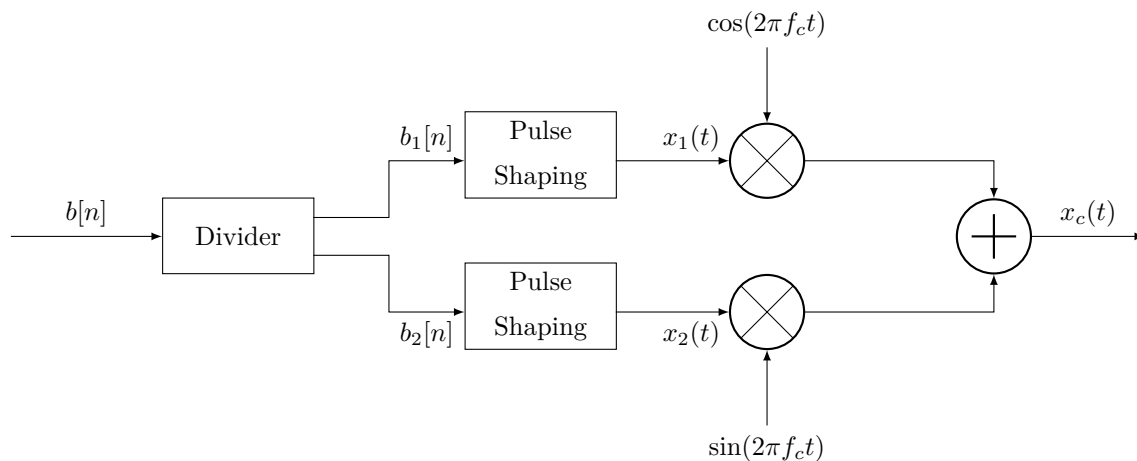
## پروژه‌ی درس سیستم‌های مخابراتی

### لطفاً به نکات زیر توجه کنید:

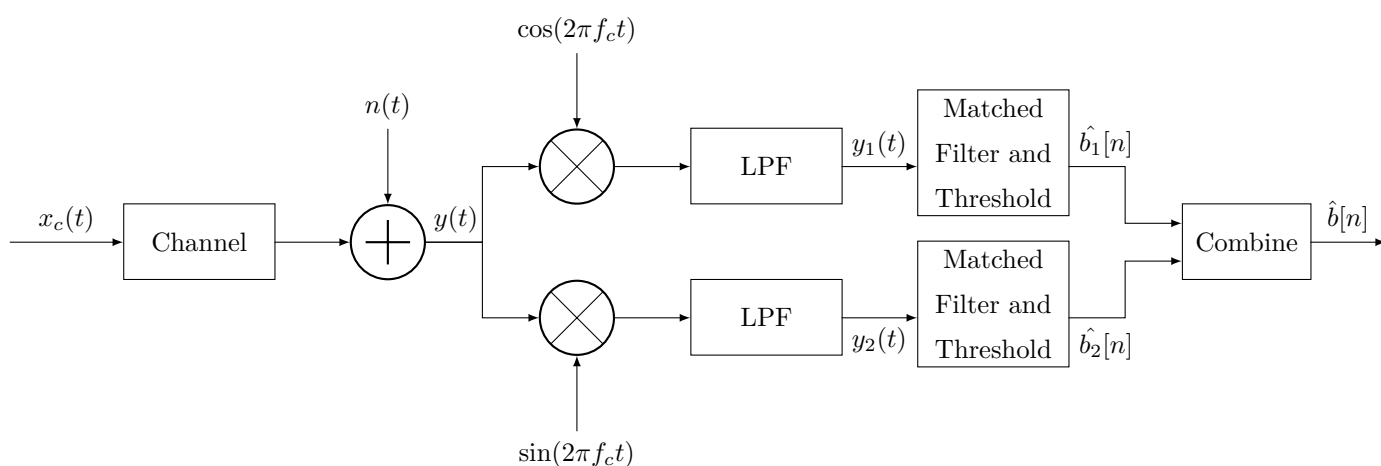
۱. این پروژه امتیازی و اختیاری است.
  ۲. شبیه‌سازی‌ها را می‌توانید با کمک MATLAB یا Python انجام دهید.
  ۳. گزارش پروژه‌ی خود را در قالب یک فایل pdf. تحویل دهید. در گزارش لازم است تمامی خروجی‌ها و نتایج نهایی، پرسش‌های متن پروژه و توضیح مختصری از فرآیند حل مسئله‌ی خود در هر قسمت را ذکر کنید.
  ۴. کد کامل پروژه را در قالب یک فایل m/.mlx/.py/.pyw/.ipynb. تحویل دهید. لازم است بخش‌های مختلف پروژه در section‌های مختلف تفکیک شوند و کد تحویلی منظم و دارای کامنت‌گذاری مناسب باشد. بدیهی است آپلود کردن کدی که به درستی اجرا نشود، به منزله‌ی فاقد اعتبار بودن نتایج گزارش شده نیز می‌باشد.
  ۵. توابعی را که (در صورت لزوم) نوشته‌اید، حتماً در انتهای کد ضمیمه کنید و از ایجاد فایل جدای m/.py. خودداری کنید.
  ۶. نام گذاری فایل‌های تحویلی را به صورت .../rar/.zip/.py/.mlx/.m/.pdf/Project\_StudentNumber انجام دهید.
  ۷. معیارهای نمره‌دهی عبارتند از: ساختار مرتب و حرفه‌ای گزارش، استفاده از توابع و الگوریتم‌های مناسب، پاسخ به سوالات تئوری و توضیح روش‌های مطلوب سوال، کد و گزارش خروجی کد برای خواسته‌های مسأله.
  ۸. در صورت داشتن هرگونه ابهام با آیدی تلگرام [@new\\_moien](https://t.me/new_moien) یا ایمیل قرار گرفته در سایت درس ارتباط برقرار کنید.
  ۹. اصولاً مشورت دانشجویان در حل تمرین‌ها نه تنها نکوهیده نیست، بلکه شدیداً توصیه می‌شود؛ اما توجه کنید که مشورت و رونویسی متفاوتند! لذا نتایج متفاوتی نیز دارند. همچنین برای مشورت در حل تمرین‌ها، از گروه درس استفاده کنید تا حق کسی در این روند ضایع نشود.
  ۱۰. شرافت انسانی ارزشی به مراتب بالاتر از تعلقات دنیوی دارد. رونویسی تمارین، زیرا گذاشتن شرافت خویش است؛ به کسانی که شرافتشان را زیر پا می‌گذارند هیچ نمره‌ای تعلق نمی‌گیرد.
  ۱۱. مهلت تحویل: ۱۳ بهمن ۱۴۰۲
- زمان تحویل پروژه تمدید نخواهد شد.

## ۱ مقدمه

در این پروژه قصد داریم یک سیستم مخابرات دیجیتال را به طور کامل شبیه‌سازی کنیم و تأثیر پارامترهای مختلف را بر عملکرد این سیستم مشاهده کنیم. دیاگرام بلوکی فرستنده و گیرنده در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده‌اند. برای راحتی، در این پروژه فقط حالت باینری را در نظر می‌گیریم.



شکل ۱: دیاگرام بلوکی فرستنده



شکل ۲: دیاگرام بلوکی گیرنده

## ۲ پیاده‌سازی بلوک‌ها به صورت مجزاً

۱. تابعی با عنوان Divide بنویسید، که در ورودی دنباله‌ای به طول زوج از اعداد صفر و یک بگیرد، و در خروجی دو دنباله به طول نصف دنباله‌ی ورودی تحویل دهد. (به نظرتان باید این تابع چگونه دنباله‌ی ورودی را تقسیم کند که شبیه‌سازی ما به یک سیستم real-time نزدیک‌تر شود؟) وارون این سیستم را در تابعی به نام Combine پیاده‌سازی کنید.

۲. تابعی با عنوان PulseShaping بنویسید که در ورودی، دنباله‌ای از صفر و یک، شکل پالس متناظر با صفر (به صورت رشته‌ای از اعداد حقیقی!)، و شکل پالس متناظر با یک (به صورت رشته‌ی دیگری از اعداد حقیقی!) را دریافت کند، و در خروجی، شکل موج متناظر با دنباله را تحویل دهد. توجه کنید که طول پالس‌های متناظر با صفر و یک باید برابر باشند.

۳. تابعی با عنوان AnalogMod بنویسید که در ورودی، دو شکل موج، فرکانس نمونه‌برداری و فرکانس حامل را دریافت کرده و در خروجی سیگنال  $x_c(t)$  را بدهد.

۴. برای سادگی، کانال را ایده‌آل در نظر می‌گیریم و فقط پهنای باند سیگنال عبوری از آن را محدود می‌کنیم. برای حل این بخش، تابعی با عنوان Channel بنویسید که در ورودی سیگنال ارسالی، فرکانس نمونه‌برداری، فرکانس مرکزی و پهنای باند کانال را بگیرد و در خروجی، سیگنال دریافتی در گیرنده را تحویل دهد. (تنها باید یک فیلتر میان‌گذر بنویسید!)

۵. تابعی با عنوان AnalogDemod بنویسید که در ورودی سیگنال  $x_c(t)$ ، فرکانس نمونه‌برداری، پهنای باند سیگنال و فرکانس حامل را بگیرد و در خروجی دو شکل موج demodulate شده (یعنی  $y_1(t)$  و  $y_2(t)$  در شکل ۲) را تحویل دهد. (ترکیب ضرب‌کننده و فیلتر پایین‌گذر)

۶. برای آخرین قسمت نیز، تابعی با عنوان MatchedFilt بنویسید که در ورودی شکل موج demodulate شده، شکل پالس متناظر با صفر، و شکل پالس متناظر با یک را دریافت کند و در خروجی دو دنباله به این صورت بدهد:

(الف) مقدار خروجی Matched Filter هم برای شکل پالس متناظر با یک و هم برای شکل پالس متناظر با صفر (در اسلایدهای درس با Matched Filter آشنا شده‌اید و می‌دانید که برای یک شکل پالس دلخواه، Matched Filter به چه صورت درمی‌آید!)

(ب) مقدار تخمین زده‌شده برای بیت متناظر

## ۳ انتقال دنباله‌ی تصادفی صفر و یک

برای این قسمت، مشخصات بلوک‌ها را به این صورت در نظر بگیرید:

متغیر	مقدار
فرکانس نمونه‌برداری	۱ MHz
طول هر پالس	۱۰ ms
فرکانس حامل	۱۰ KHz
فرکانس مرکزی کانال	۱۰ KHz
پهنای باند کانال	۱ KHz

جدول ۱: مشخصات بلوک‌ها

۱. در این قسمت می‌خواهیم با استفاده از مدولاسیون PAM سیگنال‌ها را ارسال کنیم. شکل پالس را مربعی ساده در نظر بگیرید که دامنه‌اش برای ارسال بیت یک، برابر با  $+1$  و برای بیت صفر، برابر با  $-1$  است. (هر پارامتر دیگری که قرار است انتخاب کنید را به شکلی معقول انتخاب کنید، و دلایلتان را برای آن انتخاب شرح دهید.)

(الف) دنباله‌ای به طول «به اندازه‌ی کافی بلند» از صفر و یک تولید کنید. با فرض وجود نداشتن نویز، فرآیند ارسال این دنباله را شبیه‌سازی کنید. شکل موج را برای خروجی هر بلوک رسم کنید. (بازه‌ی زمانی رسم‌کردن را به شکل معقولی در نظر بگیرید که شکل‌های شما «قشنگ» باشند!)

(ب) در درس کمی با فرآیندهای تصادفی آشنا شده‌اید. یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تصادفی، نویز است. ما در اغلب اوقات فرض می‌کنیم که نویز با سیگنال جمع می‌شود و به تعبیر دیگر، افزاینده (Additive) است. همچنین لحظات مختلف نویز را از یک‌دیگر مستقل فرض می‌کنیم، با به تعبیر دیگر، نویز را سفید (White) فرض می‌کنیم. به عنوان فرض آخر، توزیع نویز در همه‌ی لحظات را گوسی با میانگین صفر فرض می‌کنیم. چنین نویزی را Additive White Gaussian Noise می‌نامیم.

حال با فرض اینکه نویز AWGN، بعد از عبور سیگنال از کانال با آن جمع می‌شود، احتمال خطا را برحسب واریانس نویز رسم کنید. بازه‌ی محور افقی را به اندازه‌ی کافی بزرگ بگیرید. رفتار احتمال خطا را توجیه کنید.

(ج) با توجه به بخش قبل، ۶ مقدار مختلف برای واریانس نویز انتخاب کنید، (به صورتی که تا حد خوبی بازه‌های معنادار نمودار را پوشش دهد). برای هر کدام از این واریانس‌ها، scatter plot دوبعدی خروجی دو Matched Filter را رسم کنید. این به آن معناست که به ازای هر زوج  $(b_1[i], b_2[i])$ ، به علت وجود نویز، خروجی دو Matched Filter به صورت دو عدد  $(\hat{b}_1[i], \hat{b}_2[i])$  درمی‌آیند که احتمالاً  $\hat{b}_1[i] \neq b_1[i]$ ،  $\hat{b}_2[i] \neq b_2[i]$  ولی اگر مقدار واریانس نویز کم باشد، می‌توان از روی  $(\hat{b}_1[i], \hat{b}_2[i])$ ،  $(b_1[i], b_2[i])$  را به درستی تخمین زد. خواسته‌ی مسأله آنست که  $(\hat{b}_1[i], \hat{b}_2[i])$  را به صورت یک نقطه در فضای دوبعدی تصور کنید و به ازای  $i$ های مختلف، همه‌ی این نقاط را روی یک نمودار رسم کنید. این کار را برای ۶ مقدار واریانس نویزی که انتخاب کرده‌اید، تکرار کنید. برای آشنایی بهتر با خواسته‌ی مسأله، می‌توانید عبارت «منظومه‌ی سیگنال» (Signal Constellation) را جستجو کنید.

۲. در این بخش به سراغ مدولاسیون PSK می‌رویم. به جای شکل پالس مربعی، شکل پالس سینوسی با فرکانس 500 Hz در نظر بگیرید. دامنه‌ی آن را برای ارسال بیت یک، برابر با  $+1$  و برای ارسال بیت صفر، برابر با  $-1$  فرض کنید.

(الف) دنباله‌ای به طول «به اندازه‌ی کافی بلند» از صفر و یک تولید کنید. با فرض وجود نداشتن نویز، فرآیند ارسال این دنباله را شبیه‌سازی کنید. شکل موج را برای خروجی هر بلوک رسم کنید. (بازه‌ی زمانی رسم‌کردن را به شکل معقولی در نظر بگیرید که شکل‌های شما «قشنگ» باشند!)

(ب) با فرض اینکه نویز AWGN، بعد از عبور سیگنال از کانال با آن جمع می‌شود، احتمال خطا را برحسب واریانس نویز رسم کنید. بازه‌ی محور افقی را به اندازه‌ی کافی بزرگ بگیرید. رفتار احتمال خطا را توجیه کنید.

(ج) با توجه به بخش قبل، ۶ مقدار مختلف برای واریانس نویز انتخاب کنید، (به صورتی که تا حد خوبی بازه‌های معنادار نمودار را پوشش دهد). برای هر کدام از این واریانس‌ها، scatter plot دوبعدی خروجی دو Matched Filter را رسم کنید.

۳. در این بخش می‌خواهیم از مدولاسیون FSK استفاده کنیم. در نتیجه از پالس سینوسی با فرکانس متناسب با مقدار بیت استفاده می‌کنیم. فرکانس آن را برای ارسال بیت ۱، برابر ۱ KHz و برای ارسال بیت صفر، برابر با ۱/۵ KHz فرض کنید.

(الف) آیا فرکانس‌های داده‌شده، یک سیگنالینگ متعامد را می‌سازند؟

(ب) دنباله‌ای به طول «به اندازه‌ی کافی بلند» از صفر و یک تولید کنید. با فرض وجود نداشتن نویز، فرآیند ارسال این دنباله را شبیه‌سازی کنید. شکل موج را برای خروجی هر بلوک رسم کنید. (بازه‌ی زمانی رسم‌کردن را به شکل معقولی در نظر بگیرید که شکل‌های شما «قشنگ» باشند!)

(ج) با فرض اینکه نویز AWGN، بعد از عبور سیگنال از کانال با آن جمع می‌شود، احتمال خطا را برحسب واریانس نویز رسم کنید. بازه‌ی محور افقی را به اندازه‌ی کافی بزرگ بگیرید. رفتار احتمال خطا را توجیه کنید.

(د) با توجه به بخش قبل، ۶ مقدار مختلف برای واریانس نویز انتخاب کنید، (به صورتی که تا حد خوبی بازه‌های معنادار نمودار را پوشش دهد). برای هر کدام از این واریانس‌ها، scatter plot دویعدی خروجی دو Matched Filter را رسم کنید.

۴. نتایج این سه سیستم را باهم مقایسه کنید.

## ۴ انتقال دنباله‌ای از اعداد ۸ بیتی

در این قسمت می‌خواهیم دنباله‌ای از اعداد تصادفی بین ۰ و ۲۵۵ را به دنباله‌ای از اعداد ۰ و ۱ تبدیل کرده و انتقال آن‌ها را شبیه‌سازی کنیم. تفاوت اصلی این بخش با بخش قبلی در معیار سنجش صحت سیستم مخابره است. در این قسمت از مجذور اختلاف اعداد به جای احتمال خطا استفاده خواهیم کرد.

۱. تابعی با عنوان SourceGenerator بنویسید که دنباله‌ای از اعداد صحیح بین ۰ تا ۲۵۵ را بگیرد و در خروجی، دنباله‌ی باینری متناظر با آن را بدهد. (می‌توانید از تابع de2bi در MATLAB استفاده کنید.) سیستم معکوس این تابع را نیز به صورت تابعی با عنوان OutputDecoder بنویسید. (می‌توانید از تابع bi2de در MATLAB استفاده کنید.)

۲. دنباله‌ای به حد کافی بلند از اعداد صحیح بین ۰ تا ۲۵۵ تولید کنید. مخابره‌ی آن‌ها را شبیه‌سازی کنید. (شکل پالس‌ها را مرتب‌ی بگیرید و مشخصات سیستم را مطابق قسمت قبل) واریانس خطای بازسازی این اعداد را برحسب واریانس نویز رسم کنید.

۳. در ادامه‌ی بخش قبل، به ازای چند واریانس نویز مشخص، توزیع خطا را رسم کنید. رفتار حدی این توزیع به چه شکلی است؟

۴. در حالتی که نویز به سمت بی‌نهایت میل کند، واریانس خطا را به روش تحلیلی حساب کنید. آیا با آنچه که مشاهده می‌کنید سازگار است؟

## ۵ فشردگی بیشتر!

در این بخش می‌خواهیم اثر استفاده از فشردگی<sup>۱</sup> را بررسی کنیم. به تعبیر دیگر، به جای کانال مخابراتی یک کوانتیده‌کننده قرار دارد. ابتدا یک داده‌ی صوتی را از کانال مخابراتی عبور می‌دهیم و نسبت SNR را محاسبه می‌کنیم. سپس، از یک فشردگی برای کاهش اثر اعوجاج غیرخطی در کانال استفاده خواهیم کرد.

۱. در درس دیده‌اید که تابع  $F_\mu(x)$  به صورت زیر است:

$$F_{\mu}(x) = \operatorname{sgn}(x) \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)}.$$

این تابع را در بازه‌ای «مناسب» به ازای چند مقدار مختلف  $\mu$  رسم کنید. نحوه‌ی تغییر رفتار تابع را توضیح دهید.

۲. چند جمله از یکی از حکایت‌های زیبای گلستان سعدی (به انتخاب خودتان) را بخوانید (در حدّ دو دقیقه). صدای خود را ضبط کنید و صوت را در نرم‌افزار بارگذاری کنید. صوت را در نرم‌افزار پخش کنید و کنترل کنید که با فرکانس مناسبی از صدایتان نمونه گرفته‌اید.

۳. سیگنال صوت را بهنجار<sup>۲</sup> کنید. به گونه‌ای که مقدار آن همواره در بازه‌ی  $[-1, 1]$  باشد. توان سیگنال بهنجار شده بر حسب dB چقدر است؟

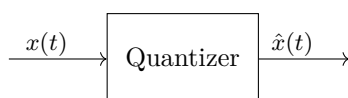
۴. تابعی با عنوان `ulaw_compressor` بنویسید که در ورودی، سیگنال و مقدار  $\mu$  را گرفته و در خروجی، سیگنال فشرده‌شده را برگرداند.

۵. با توجه به وارون تابع  $F_\mu$ ، تابعی با عنوان `ulaw_expander` بنویسید که در ورودی، سیگنال فشرده‌شده و مقدار  $\mu$  را گرفته و در خروجی، سیگنال اصلی را تا حدّ ممکن بازبازی کند.

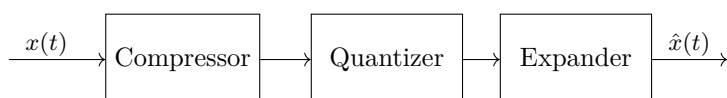
۶. دو تابع `ulaw_compressor` و `ulaw_expander` را باهم ترکیب کنید و سیگنال صوت خودتان را از ترکیب آن‌ها عبور دهید. خطای RMS بازبازی سیگنال چقدر است؟ این کار را به ازای چند مقدار مختلف  $\mu$  تکرار کنید.

۷. تابعی با عنوان `quantizer` بنویسید که در ورودی، سیگنال و تعداد سطوح کوانتش<sup>۳</sup> را گرفته و در خروجی سیگنال کوانتیده‌شده را برگرداند. دقت کنید که کوانتش در این تابع به صورت یکنواخت انجام می‌شود و فرض می‌شود سیگنال ورودی همواره در بازه‌ی  $[-1, 1]$  است.

۸. سیگنال صوت را از کوانتیده‌کننده به ازای تعداد سطوح کوانتش  $L = 4, 5, 6, 7, 8$  عبور دهید و SNR سیگنال خروجی را در هر حالت گزارش کنید.



۹. سیگنال را با استفاده از فشردگی از کوانتیده‌کننده عبور دهید. به ازای سطوح کوانتش قسمت قبل و چند مقدار مختلف  $\mu$ ،



مقدار SNR سیگنال خروجی را گزارش کنید.

<sup>1</sup>Compander

<sup>2</sup>Normalize

<sup>3</sup>Quantization

۱۰. تعداد سطوح کوانتش را  $L = ۶$  فرض کنید. مقدار  $\mu$  را تغییر دهید و نمودار SNR سیگنال خروجی برحسب  $\mu$  را رسم کنید.
۱۱. جای دو بلوک فشرده‌ساز و گسترده‌ساز را عوض کنید. سیگنال را با این ترکیب جدید بلوک‌ها از کوانتیده‌کننده عبور دهید. آیا همچنان استفاده از فشرگستر تأثیر مثبت دارد؟

موفق باشید