

باسمه تعالی



شبکه‌های موبایلی نرم‌افزار محور

دکتر خلج

تمرین سری سوم

1402/04/14

پیاده‌سازی سیستم OFDM

پوریا دادخواه

401201381

هدف این تمرین پیاده‌سازی فرستنده و گیرنده یک سیستم OFDM است که از کانال $h[n]$ در حوزه زمان عبور می‌کند. در این سیستم قصد داریم اثر تعداد نقاط هر سابکریئر (N نقطه FFT) و اثر وجود و عدم وجود CP را به همراه نوع تنظیم آن (اضافه کردن متناوب و یا zero padding) بررسی کنیم که چه اثری در بازایی سیگنال دریافتی خواهد داشت. علاوه بر پیاده‌سازی با متلب، اثر مدنظر خود را به صورت دستی چک می‌کنیم که هر کدام از حالات بالا چه خروجی در گیرنده خواهند داشت.

پاسخ ضربه کانال در حوزه زمان را با $h[n]$ و پاسخ فرکانسی آن را با H نمایش می‌دهیم که در طول یک آزمایش ثابت خواهد بود. همچنین با فرض ثابت بودن پهنای باند (BW) که به نرخ نمونه برداری ثابت Ts منجر می‌شود به اثر T در ارسال مخابراتی می‌پردازیم و نحوه افزایش نرخ بیت را بررسی می‌کنیم. در ادامه از نمادهای زیر در طول گزارش استفاده خواهیم کرد:

1. نمادها:

N: size of FFT	k' : size of channel impulse response	k: size of CP
X: Input bits	x: IFFT output = IFFT(X)	cp_x: sequence with CP = [CP x]
h: Channel impulse response	H: N-point FFT of $h = \text{FFT}(h)$	
y: Channel output = $h * \text{cp_x}$	y' : same convolution = $y[0:-k']$	Y: FFT output = $\text{FFT}(y')$

2. بررسی اثر CP:

a. تحلیل دستی: در این بخش با ست کردن مقادیر $N = 4, k' = 3$ و پاسخ کانال و ورودی زیر، سیگنال خروجی را محاسبه می‌کنیم.

$$X[k] = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 1] \rightarrow x[n] = [0.75 \quad -0.25i \quad 0.25 \quad 0.25i]$$

$$h[n] = [1 \quad 0.8 \quad 0.5] \rightarrow H[k] = [2.3 \quad 0.5-0.8i \quad 0.7 \quad 0.5+0.8i]$$

$$H[k]X[k] = [2.3 \quad 0 \quad 0.7 \quad 0.5+0.8i]$$

بدون CP:

$$\text{cp_x}[n] = [0.75 \quad -0.25i \quad 0.25 \quad 0.25i]$$

$$y[n] = [0.75 \quad 0.6-0.25i \quad 0.625-0.2i \quad 0.2+0.125i \quad 0.125+0.2i \quad 0.125i]$$

$$Y[k] = [2.175-0.325i \quad -0.25-0.2i \quad 0.575-0.075i \quad 0.5+0.6i]$$

$$Y[k] \neq H[k]X[k]$$

با CP با طول یک:

$$\text{cp_x}[n] = [0.25i \quad 0.75 \quad -0.25i \quad 0.25 \quad 0.25i]$$

$$y[n] = [0.25i \quad 0.75+0.2i \quad 0.6-0.125i \quad 0.625-0.2i \quad 0.2+0.125i \quad 0.125+0.2i \quad 0.125i]$$

$$Y[k] = [2.175 \quad -0.125 \quad 0.575 \quad 0.375+0.8i]$$

$$Y[k] \neq H[k]X[k]$$

با CP با طول ۳:

$$\text{cp_x}[n] = [-0.25i \quad 0.25 \quad 0.25i \quad 0.75 \quad -0.25i \quad 0.25 \quad 0.25i]$$

$$y[n] = [-0.25i \quad 0.25-0.2i \quad 0.2+0.125i \quad 0.875+0.2i \quad 0.6-0.125i \quad 0.625-0.2i \quad 0.2+0.125i \quad 0.125+0.2i \quad 0.125i]$$

$$Y[k] = [2.3 \quad 0 \quad 0.7 \quad 0.5+0.8i]$$

$$Y[k] = H[k]X[k]$$

با CP=0 با طول ۳:

$$\text{cp_x}[n] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.75 \quad -0.25i \quad 0.25 \quad 0.25i]$$

$$y[n] = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.75 \quad 0.6-0.25i \quad 0.625-0.2i \quad 0.2+0.125i \quad 0.125+0.2i \quad 0.125i]$$

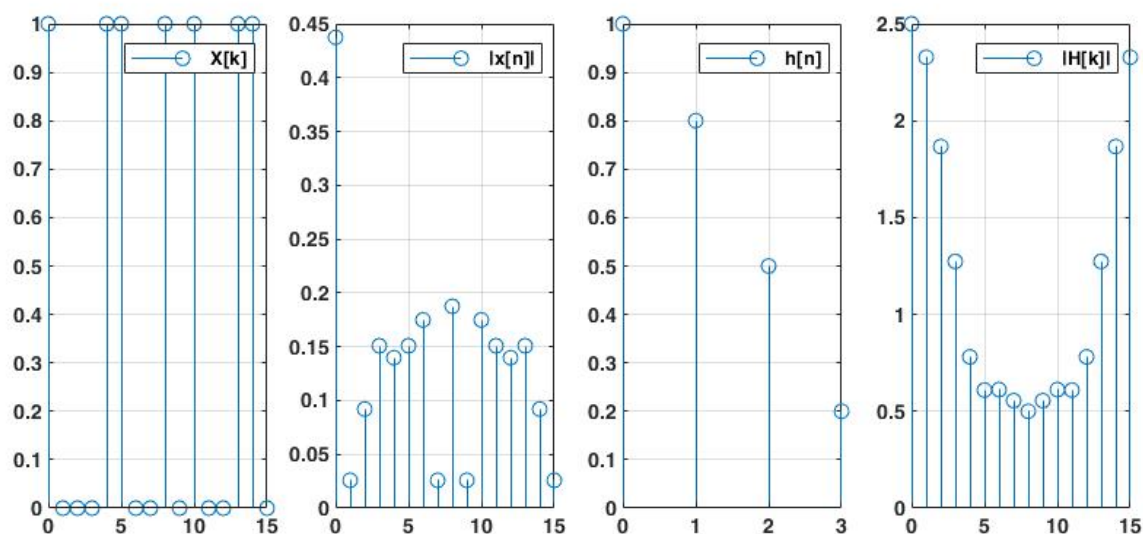
$$Y[k] = [2.175-0.325i \quad -0.25-0.2i \quad 0.575-0.075i \quad 0.5+0.6i]$$

$$Y[k] \neq H[k]X[k]$$

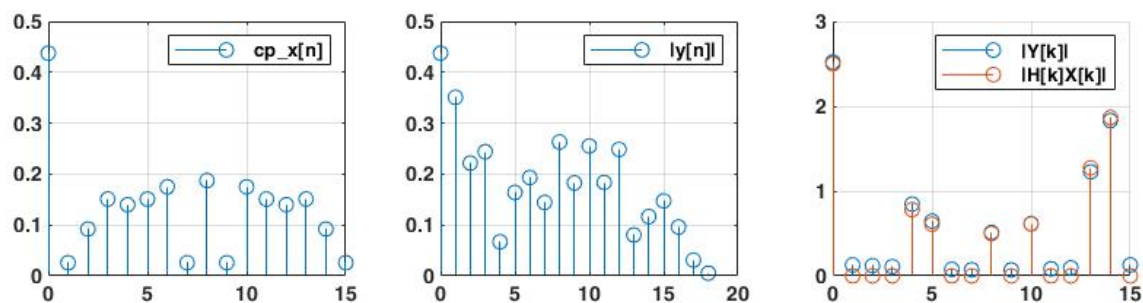
بنابراین تنها در حالتی که CP طولی بیشتر یا مساوی طول کانال دارد و از روی انتهای سیگنال خروجی ifft ساخته می‌شود، $Y=HX$ برقرار است.

b. پیاده‌سازی با متلب: در این بخش با پارامترهای $N = 16$, $k' =$ و ورودی و کانال رسم شده، خروجی را در حالات

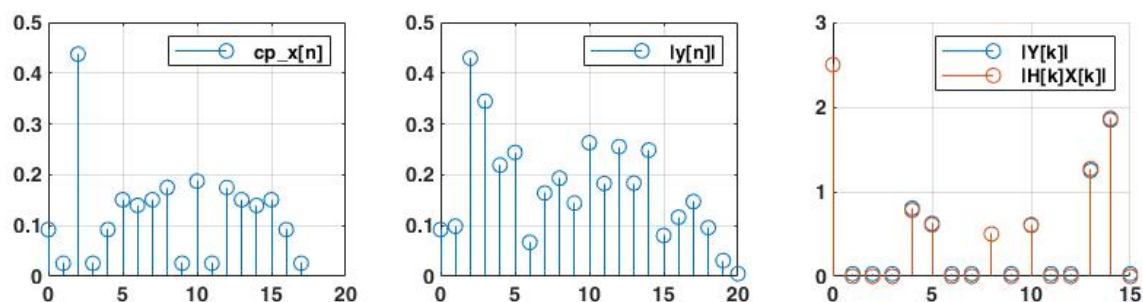
مختلف CP بررسی می‌کنیم که کد پیاده‌سازی ضمیمه شده است.



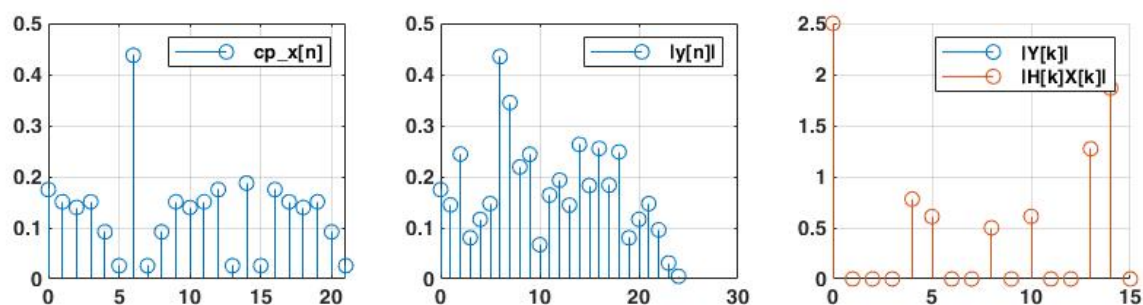
بدون CP:

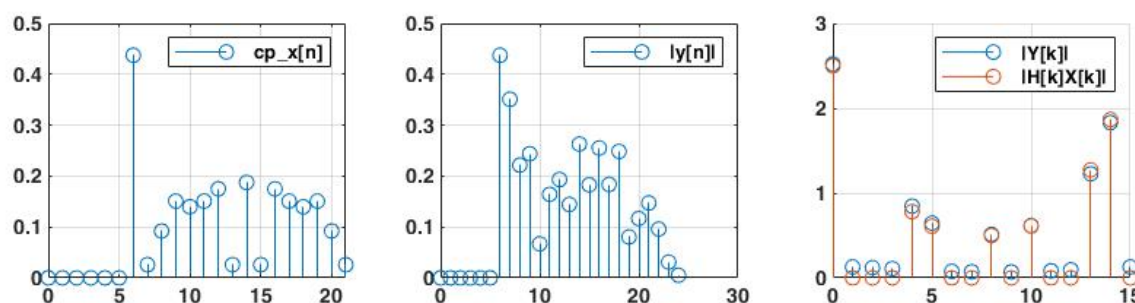


با CP با طول ۲:



با CP با طول ۶:





از تصاویر بالا نتیجه می‌شود که اگر طول CP بیشتر یا مساوی طول کانال باشد (در اصل k باید از $k'-1$ بزرگتر یا مساوی باشد) و CP از انتهای سیگنال انتخاب شده باشد، آنگاه رابطه $Y=HX$ برقرار خواهد بود. همچنین هرچه طول CP به طول کانال نزدیکتر باشد، اختلاف Y و HX کمتر خواهد بود. مورد دیگر هم این است که هدف از CP، فقط جلوگیری از ISI نیست، بلکه هدف دیگر آن، ایجاد رابطه کانولوشن دایروی است تا رابطه $Y=HX$ برقرار باشد. بنابراین افزودن CP تمام صفر، چاره‌ساز نیست و فقط اثر ISI را خنثی می‌کند. البته در اینجا چون فقط یک دسته N بیتی را به عنوان ورودی دادیم، طبیعتاً اثر ISI وجود ندارد. اما با دادن تعداد ورودی زیاد، می‌توان اثر ISI را مشاهده کرد. به این طریق که خروجی به ازای $CP=0$ با طول بیشتر از کانال (حالت آخر) با حالت بدون CP، متفاوت خواهد بود. موردی که در اینجا یکسان است.

3. بررسی اثر T:

همان‌طور که می‌دانیم، سیگنال خروجی IFFT در فرستنده یک سیگنال گسسته است که برای ارسال روی کانال، باید به سیگنال پیوسته تبدیل شود. به این منظور این سیگنال گسسته با نرخ T_s ، به سیگنال پیوسته در زمان تبدیل می‌شود. رشته بیت ورودی ما، بین N زیرکانال تقسیم شده که فرکانس آن‌ها به ترتیب از صفر تا $(N-1)/N$ در حوزه‌ی گسسته هستند. با تبدیل به سیگنال پیوسته با نرخ T_s ، فرکانس این سیگنال گسسته در $1/T_s$ ضرب می‌شود. بنابراین پهنای باند سیگنال پیوسته برابر $1/T_s$ خواهد بود. از آنجا که این پهنای باند مربوط به N زیرکانال است، پس فاصله بین هر دو زیرکانال مجاور، $1/NT_s$ است. مورد دیگر هم طول پالس سیگنال خروجی است. از آنجا که این N نمونه‌ی گسسته با نرخ $1/T_s$ به سیگنال پیوسته تبدیل می‌شوند، پس طول پالس ارسالی هم برابر NT_s خواهد بود که دقیقاً عکس همان فاصله‌ی فرکانسی دو زیرکانال است. پس به طور خلاصه داریم:

$$T = NT_s, \Delta f = 1/T, BW = 1/T_s = N/T$$

با فرض ثابت بودن T_s یا همان پهنای باند کل، با افزایش N ، طول پالس هر سمبل افزایش پیدا کرده و این موضوع باعث افزایش تاخیر می‌شود.

4. بررسی اثر N:

موارد زیر مربوط به انتخاب N بزرگ است. نتایج N کوچک دقیقاً برعکس موارد زیر است.

معایب:

- افزایش تاخیر سیستم: با توجه به اینکه در ورودی باید IFFT گرفته شود، نیاز است تا همه‌ی N بیت ورودی دریافت شود و سپس IFFT گرفته شود. به همین دلیل، با افزایش N ، تاخیر سیستم افزایش می‌یابد.
- افزایش پیچیدگی محاسبات: با افزایش N ، ساینز FFT هم افزایش یافته و محاسبات بیشتری برای انجام FFT مورد نیاز است.
- حساسیت فرکانسی: هرچه N بزرگتر باشد، پهنای باند زیرکانال‌ها کاهش می‌یابد و این موضوع باعث می‌شود که در اثر تغییرات فرکانسی، مثل اثر داپلر، عملکرد سیستم بیشتر تحت تأثیر قرار بگیرد.
- مزایا:
- ایده‌آل شدن زیرکانال‌ها: با افزایش N و کاهش پهنای باند هر زیرکانال، تغییرات پاسخ فرکانسی کانال اصلی در پهنای باند زیرکانال بسیار کمتر شده و پاسخ فرکانسی زیرکانال به ایده‌آل نزدیکتر خواهد شد.

- کاهش اثر CP: با افزایش سایز N ، از آنجا که طول CP ثابت است، (صرفاً تابعی از اندازه‌ی محیط است.) نسبت N به CP افزایش پیدا کرده و کارایی سیستم از لحاظ نرخ ارسال بالاتر می‌رود. زیرا به ازای یک بیت، overhead کمتری ارسال می‌شود.

5. افزایش نرخ بیت:

برای افزایش نرخ بیت، از آنجایی که پهنای باند کل کانال ثابت است یک روش معقول تغییر نوع مدولاسیون و افزایش بیت ارسالی در هر سمپل می‌باشد (مثلاً ارتقا از نوع باینری 0 و 1 به چهارتایی) که چالش پیش‌روی این مسیر، حساس‌تر شدن خروجی به نویز اضافه شده در کانال و داشتن SNR مناسب برای بازیابی صحیح از روی دامنه در گیرنده می‌باشد که برای حل آن باید توان ورودی بیشتری مصرف کرد که اثر نویز را جبران کنیم.