

# گزارش کار پروژه مخابرات. بخش ۴

«یک افسانه دیجیتال»»»

بخش چهارم: وصیت‌های امپراتور

## برنامه‌ریزی برای این بخش

کارهایی که در این بخش می‌خواهم انجام دهم:

- ساخت بلوک‌های رمزنگاری و کامل کردن بلوک دیاگرام سیستم.
- بررسی بخش‌های تولید اعداد تصادفی و نویز متلب. آیا واقعا تصادفی هستند؟
- بازسازی بخش همزمان‌سازی پالس ساعت در دیمدولاتور
- گذاشتن یک فیلتر بهتر در کانال (با کنترل بیشتر روی پهنای باند)
- بررسی سیستم و تهیه چیزی مثل یک دیتاشیت.

## کارهایی که کردم

### بلوک رمزنگاری

بالاخره به همان روش One Time Pad ، بلوک رمزنگاری را پیاده سازی کردم. یک بلوک برای رمزگذاری، یک بلوک برای رمزگشایی و یک بلوک برای تولید کلیدهای یک‌بار مصرف.

### استفاده از چند آنتن در گیرنده برای افزایش کیفیت

این ایده به ذهنم رسید که اگر ۲ ورودی در گیرنده باشد چه اتفاقی می‌افتد!

۲ ورودی در گیرنده اگر آنتن باشند (خط انتقال ما بی سیم باشد) و گیرنده به حد کافی از فرستنده دور باشد، سیگنال حاوی پیامی که دریافت می کنند یکسان است اما نویزی که دریافت می کنند متفاوت است. من برای شبیه سازی این، ۲ کانال موازی در سیستم گذاشتم و سیگنال خروجی آن ها را استفاده کردم.

این ۲ تا سیگنال را باهم جمع کردم و به آشکارساز دادم. نتیجه شگفت آور بود! احتمال خطای من بیشتر از آنچه انتظار داشتم کاهش پیدا کرد!

در ادامه تعداد ورودی ها را از این هم بیشتر کردم.

در یک آزمایش، سیستم من با ۱ آنتن، در ۱۰۰۰۰ داده، ۲۰۰۰ داده خطا داشتم. با افزایش آنتن ها به ۱۶ تعداد خطای من به ۱۰ تا کاهش پیدا کرد. یعنی کیفیت انتقال من ۲۰۰ بار بهتر شد.

## پیاده سازی بلوک کدینگ تکرار ارقام

لازم بود این بلوک را برای تست اثر طول پالس بر کیفیت انتقال پیاده سازی کنم.

کدینگ تکرار چنین کار می کند که هر رقم را در داده، چند بار (مثلا ۳ بار) تکرار می کند و می فرستد.

در بخش دیکدینگ به ازای هر چند رقم (برابر با تعداد تکرار در بخش کدینگ)، مد را به عنوان رقم اصلی فرض می کند. (مد در یک مجموعه به معنای رقمی است که بیشترین تکرار را دارد).

# تلاش برای تهیه دیتاشیت سیستم

این که بدانیم سیستم در چه شرایطی چگونه کار می‌کند مهم است. برای این اول باید اثر هر پارامتر را بر سیستم بدانیم (کیفی) و سپس با آزمایش‌هایی اندازه اثر آن را حساب کنیم (کمی).

تنظیمات اولیه سیستم.

## پهنای باند کانال

در شرایطی که سیستم من در فرکانس  $f$  (برحسب هرتز) کار کند، بیشتر پهنای باند آن در حدود  $0.98f$  الی  $1.02f$  است. و تقریباً خارج از محدوده بین  $0.93f$  و  $1.07f$  سیگنالی وجود ندارد.

## نرخ بیت بر ثانیه در کانال

نرخ ارسال اطلاعات در کانال (بیت بر ثانیه):

$$bit\ rate\left(\frac{bit}{sec}\right)=\log_2(M)\left(\frac{bit}{pulse}\right)\times\frac{carrier\ frequency\left(\frac{rad}{sec}\right)}{pulse\ length\left(\frac{rad}{pulse}\right)}$$

پس سرعت انتقال در کانال این‌گونه محاسبه می‌شود.

اما سرعت انتقال اطلاعات خالص به عوامل دیگری نیز بستگی دارد که در ادامه ذکر می‌شود.

## بیشینه سرعت انتقال سیستم

با توجه به فرکانس سیگنال حامل، مقدار نویز کانال و هم‌چنین پهنای باند قابل انتقال در کانال، سرعت انتقال ما با توجه به مقدار خطای قابل پذیرش، محدود می‌شود. یعنی نمی‌توانیم سرعت را از حدی بیشتر کنیم بدون این‌که اثر قابل‌توجهی بر خطای ما داشته باشد.

عوامل موثر بر نرخ ارسال اطلاعات واقعی این‌ها هستند:

فرکانس سیگنال حامل، طول هر پالس، اندازه مدولاسیون (M)، حجم کدینگ کانال، پهنای باند کانال، نویز کانال.

در واقع این‌ها بر کیفیت انتقال و سرعت انتقال تاثیر دارند. آشکار است که کیفیت انتقال برای ما مهم است و با داشتن یک کیفیت مشخص، این‌ها سرعت سیستم را تعیین می‌کنند.

### اثر کدینگ

برای داشتن خطای کمتر ما از کدینگ‌ها استفاده می‌کنیم. همین باعث می‌شود سرعت انتقال ما کمتر شود. اگر می‌توانیم متغیرهای دیگر را در سیستم تغییر دهیم، یک trade-off به وجود می‌آید. مثلاً بین افزایش طول پالس و افزایش حجم کدینگ. خوبی کدینگ ۲ چیز است:

۱. می‌تواند با دقت بیشتری روی سرعت انتقال اثر بگذارد. مثلاً برای داشتن کیفیت مورد نظر سرعت را ۵ درصد کاهش دهد.
۲. بخش‌های آنالوگ سیستم ممکن است محدودیت‌های خاصی داشته باشند یا تغییر آن‌ها دشوار باشد. اما برای کدینگ چنین نیست و با تغییر بخش نرم‌افزار یا سخت‌افزار یک سیستم دیجیتال می‌توان آن را برای شرایط متفاوت بهینه کرد.

### اثر طول پالس

افزایش طول پالس پهنای باند انتقال ما را کاهش می‌دهد.

این برای ما ۳ خوبی دارد:

۱. می‌تواند پهنای باند سیستم را کاهش دهد و هزینه ما مطابق با آن کاهش پیدا کند.
۲. وقتی پهنای باند کانال ما محدود باشد، کیفیت آشکارسازی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۳. ممکن است سیستم‌های آشکارسازی در سمت گیرنده محدودیت داشته باشند. افزایش اندازه پالس می‌تواند هزینه سیستم را کاهش دهد.

### اثر نویز کانال

نسبت توان سیگنال به توان نویز (SNR) در کیفیت آشکارسازی ما اثر دارد. اما در SNR های بسیار پایین مثل -۲۰ (قدرت نویز ۱۰۰ بار بیشتر از قدرت سیگنال) نیز سیستم ما می‌تواند با روش‌های مختلف، داده اصلی ما را آشکارسازی کند.

## اثر توان سیگنال

در این سیستم شبیه سازی شده، با توجه به استفاده از مدولاسیون PSK، چیزی که بر کیفیت آشکارسازی اثر دارد نسبت توان سیگنال به توان نویز است و خود توان سیگنال به تنهایی اثری ندارد.

اما در یک سیستم واقعی ممکن است تقویت کننده مناسب وجود نداشته باشد یا هزینه زیادی داشته باشد و یا این که کل سیستم نسبت به تغییرات توان حساس باشد.

## اثر پهنای باند کانال

پهنای باند کانال بیشتر از همه چیز روی آشکارسازی ما موثر است.

در مدولاسیون PSK، اگر نرخ تغییر فاز در ثانیه برابر  $k$  باشد، طیف قدرت شبیه تابع  $y(f) \sim \text{sinc}^2(\frac{f}{k})$  خواهد بود. بیشترین توان در این، در لوب اصلی تابع است. یعنی ۹۴٪ آن. (اگر لوب دوم را نیز حساب کنیم، این عدد به ۹۷٪ میرسد.

اندازه لوب اصلی برابر  $\pi f$  است. و بیشترین توان سیگنال در آن قرار دارد.

اگر پهنای باند کانال بیشتر از پهنای باند لوب اصلی باشد، اثر منفی زیادی روی آشکارسازی نخواهد داشت. اما اگر در این بازه باعث اعوجاج روی سیگنال شود، آشکارسازی را سخت تر می کند.

## اثر اندازه مدولاسیون (M - تعداد انواع پالس - تعداد فاز ممکن - مبنای ارقام سیستم)

برای داشتن احتمال خطای ثابت، بین  $M$  و اندازه هر پالس به یک رابطه مستقیم می رسیم.

این رابطه به شکل تجربی محاسبه می شود.

اگر در  $M=2$  اندازه هر پالس برابر ۰.۵ سیکل باشد، در  $M=4$  این اندازه باید بیشتر شود.

سیستم من البته برای  $M=2$  ساخته شده است.

کیفیت ارسال در کانال به SNR و فیلتر کانال بستگی دارد. کاهش پهنای باند به مراتب اثر بدتری نسبت به افزایش توان نویز (افت توان سیگنال) روی خطای آشکارسازی سیگنال دارد.

## نتیجه چند تست:

### تست ۱

کدینگ‌های فعال: کدینگ منبع، رمزنگاری، زوجیت، افزودن اندیس، تکرار

اندازه کدینگ منبع: ۸ بیت به ازای سمبل

اندازه زوجیت: افزودن ۱ بیت به ازای هر ۴ بیت

اندیس‌ها : افزودن ۲ بیت به ازای هر ۱۰ بیت

تعداد تکرار: ۳

فرکانس کریر: ۳۰ مگاهرتز

فرکانس نمونه‌گیری: ۲۰۰ برابر فرکانس کریر

نسبت سیگنال به نویز کانال : -۱۰ دسی‌بل

کانال با فیلتر butter

مدولاسیون PSK

پایه مدولاسیون :  $M = 2$

طول هر پالس =  $2 \times 2\pi$  (رادیان)

یعنی هر پالس معادل ۲ سیکل سیگنال سینوسی است.

حجم داده اولیه: 480 بیت

مقیاس کدینگ : 4.5 برابر

تعداد خطا در هر آزمایش:

2 0 2 3 1 0 7 0 0 0 0 5 0 0 0 0 4 3 0 2 1 6 3 1 0 0 1 4 2 1 3 0 1 1 0 3 0 0

احتمال خطا در ۱۰۰۰۰ بیت : ۳۱ بیت

## تست ۲

مشابه تست ۱ با فیلتر حذف شده و حجم داده اولیه ۳۵۶۰ بیت.

تعداد آزمایش : ۲۰

تعداد خطای هر آزمایش:

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت : خیلی کمتر از ۱ بیت.

## تست ۳

مشابه تست ۱ با حجم داده اولیه ۱۰۱۸۴ بیت و نسبت سیگنال به نویز کانال : ۰ دسی بل

تعداد آزمایش : ۴

تعداد خطای هر آزمایش:

0 0 0 0

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت: خیلی کمتر از ۱ بیت

## تست ۴

مشابه تست ۳ با نسبت سیگنال به نویز کانال : -۶ دسی بل

تعداد آزمایش: ۲۰

تعداد خطای هر آزمایش:

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت: ۰.۱



احتمال خطا : ۱۰ به توان منفی ۵

## تست ۵

مشابه تست ۳ با نسبت سیگنال به نویز -۸ دسی بل

تعداد آزمایش: ۲۰

تعداد خطای هر آزمایش:

0 2 2 3 1 0 1 4 3 1 4 0 0 5 1 5 0 0 1 3

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت : ۱.۷۷

## تست ۶

مشابه تست ۳ با نسبت سیگنال به نویز -۷.۵ دسی بل

تعداد آزمایش: ۲۰

تعداد خطای هر آزمایش:

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت : ۱.۲۲۷۴

## نتیجه‌گیری از تست‌های ۳، ۴، ۵ و ۶

سیستم در SNR بالای -۷ دسی بل، احتمال خطای کمتر از ۱۰ به توان -۴ دارد.

## تست ۷

کدینگ‌های استفاده شده: کدینگ منبع، رمزنگاری

نسبت سیگنال به نویز -۷.۵ دسی بل (مشابه تست ۶)

سایر ویژگی‌ها مشابه تست ۱

هدف از این تست بررسی اثر کدینگ بر کیفیت انتقال است.

مقیاس کدینگ: ۱ برابر

تعداد آزمایش: ۲۰

تعداد خطا در هر آزمایش:

4 4 14 3 0 7 1 14 10 3 6 7 14 11 13 11 1 5 6

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت: ۶.۸۷۳۵

### نتیجه‌گیری از تست ۶ و ۷

فعال سازی کدینگ‌ها سرعت انتقال را ۴.۵ برابر کاهش دادند و احتمال خطا را ۵.۶ برابر کاهش دادند.

من برای مقایسه اثر چیزهای مختلف، معیاری به اسم **ارزش** را چنین تعریف می‌کنم:

نسبت کاهش دادن احتمال خطا تقسیم بر نسبت کاهش دادن سرعت انتقال.

برای این کدینگ‌ها (تکرار + زوجیت + افزودن اندیس) این نسبت برابر است با:

$$\frac{5.6}{4.5} = 1.2444$$

هر قدر این نسبت بالاتر باشد، یعنی ارزش آن بلوک بیشتر است.

### تست ۸

این تست مشابه تست ۷ است اما با طول پالس ۱.۵ برابر آن. یعنی ۳ سیکل سینوسی

تعداد آزمایش ۲۰

تعداد خطای هر آزمایش:

### نتیجه‌گیری از تست ۷ و ۸

0 0 0 1 0 1 1 4 1 1 1 0 1 1 1 2 1 0 0 0

احتمال خطا در ۱۰۰۰۰ بیت: ۰.۷۸۵۵

اثر افزایش طول پالس:

نسبت کاهش سرعت : ۱.۵ برابر

نسبت کاهش احتمال خطا : ۸.۷۵۰۵

ارزش افزایش طول پالس از ۲ سیکل به ۳ سیکل برابر است با: ۵.۸۳۳۷

### نتیجه‌گیری از آزمایش ۶ و ۷ و ۸:

در یک trade-off ، ارزش افزایش طول پالس بسیار بیشتر از کدینگ‌های آزمایش ۶ است.

## تست ۹

مشابه تست ۸، اثر افزایش طول پالس را در SNR برابر ۲۰- دسی‌بل و طول پالس‌های ۲ سیکل و ۲۰ سیکل تست شد.

احتمال خطا در طول پالس ۲ سیکل : ۳۶۰۱ بیت در ۱۰۰۰۰ بیت.

احتمال خطا در طول پالس ۲۰ سیکل : ۳۳۴۳ بیت در ۱۰۰۰۰ بیت

نتیجه این بود که در SNR های پایین، افزایش طول اثر چندانی روی کیفیت انتقال ندارد.

پس در ۲۰- SNR دسی‌بل، ارزش افزایش طول برابر ۰.۰۵ است.

## تست ۱۰

مشابه تست ۹. اما این بار طول پالس ثابت است (۲ سیکل) و در عوض از کدینگ تکرار استفاده می‌شود.

احتمال خطا بدون کدینگ تکرار : ۳۶۰۱ بیت در ۱۰۰۰۰ بیت

احتمال خطا با تکرار ۱۱ بیتی : ۱۸۷۰ در ۱۰۰۰۰ بیت.

پس ارزش کدینگ با ۱۱ تکرار، در SNR = -20dB برابر است با : ۰.۱۷۵

## نتیجه‌گیری از تست ۹ و ۱۰

در SNR های خیلی پایین، یعنی نزدیک  $-20$  دسی‌بل، افزایش طول پالس اثر چندانی روی کیفیت انتقال ندارد. در حالی که استفاده از کدینگ تکرار می‌تواند با کاهش ۱۱ برابری سرعت انتقال، کیفیت انتقال را ۲ برابر افزایش دهد.

## تست ۱۱

مشابه تست ۱۰. اما با اندازه داده اولیه ۲۰۸ بیت.

در  $SNR = -20$  dB من یک بار دیگر از کدینگ تکرار، با مقیاس ۶۱ برابر استفاده کردم.

تعداد خطا در هر آزمایش:

0 7 11 8 2 8 0 6 11 0 1 1 2 0 2 5 5 4 2 3

احتمال خطا در ۱۰۰۰۰ بیت : ۱۳۹.۳

پس ارزش کدینگ تکرار ۶۱ تایی در SNR برابر  $-20$  دسی‌بل برابر است با: ۲.۳۶

این یعنی در SNR های خیلی پایین، با کاهش ۶۱ برابری سرعت انتقال، می‌توان کیفیت انتقال را ۲۶ برابر بهتر کرد و برای داده متنی، یک انتقال قابل قبول داشت.

## تست ۱۲

کدینگ استفاده‌شده: رمزنگاری

نسبت توان سیگنال به نویز در کانال :  $-10$  دسی‌بل

طول داده اولیه: 10184 بیت

سایر شرایط مثل تست ۱ است.

هدف این آزمایش بررسی اثر استفاده از آنتن‌های متعدد در گیرنده است.

تست با ۱ آنتن:

تعداد خطا در هر آزمایش:

94 120 137 103 147 122 108 118 136 108 134 106 98 113 110 112 113 113 132 114

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت : ۱۱۴.۷۹ بیت

تست با ۲ آنتن:

تعداد خطا در هر آزمایش:

1 4 5 2 3 2 0 1 0 3 6 4 3 4 5 6 2 6 5 1

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت : ۳.۰۹ بیت خطا

تست با ۳ آنتن:

تعداد خطا در هر آزمایش:

1 2 1 0 0 0 0 0 0 2 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت : ۰.۴ بیت خطا

افزایش تعداد آنتن اثری بر سرعت انتقال ندارد.

ارزش افزایش تعداد آنتن از ۱ به ۲ در  $SNR = -10dB$  برابر است با : ۳۷

ارزش افزایش تعداد آنتن از ۱ به ۳ در  $SNR = -10dB$  برابر است با: ۲۹۲

## تست ۱۳

این مشابه تست ۱۲ است اما در  $SNR = -20 dB$  انجام می‌شود.

تست با ۱ آنتن:

تعداد بیت خطا در هر آزمایش:

3598 3732 3660 3607 3731 3615 3692 3595 3538 3598 3709 3666 3656 3623 3664 3737 3704 3676 3672 3661

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت: ۳۵۹۰.۶ بیت خطا

تست با ۲ آنتن:

تعداد خطا در هر آزمایش:

2494 2506 2671 2532 2479 2482 2523 2620 2630 2619 2506 2453 2512 2505 2626 2527 2621 2509 2428 2565

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت: ۲۴۹۴.۵

تست با ۴ آنتن:

تعداد خطا در هر آزمایش:

1223 1131 1182 1175 1243 1235 1138 1198 1203 1292 1186 1191 1108 1112 1118 1274 1248 1238 1205 1131

میانگین تعداد خطا در ۱۰۰۰۰ بیت: ۱۱۷۰

ارزش افزایش تعداد آنتن از ۱ به ۲ در  $\text{SNR} = -20\text{dB}$  برابر است با: ۱.۴

ارزش افزایش تعداد آنتن از ۱ به ۴ در  $\text{SNR} = -20\text{dB}$  برابر است با: ۳.۰۷

### نتیجه‌گیری از تست ۱۲ و ۱۳

افزایش تعداد آنتن در گیرنده تاثیر خوبی در کیفیت انتقال دارد.

این اثر در  $\text{SNR}$  های حدود -۱۰ بسیار بیشتر از  $\text{SNR}$  های حدود -۲۰ است. اما در همان  $\text{SNR}$  های بسیار پایین نیز هم‌چنان موثر است.