

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعالم

سال، ششم، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۶، (پیاپی ۳۱): صص ۶۳-۵۳

## طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی یک سامانه مخابراتی ضد اختلال

### پرش فرکانسی در کانال‌های ارتباطی چند مسیره

مسعود خداوردی زاده<sup>۱</sup>، احمد رضا امین<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴

#### چکیده

دسترسی به یک ارتباط مخابراتی امن و مقاوم در برابر اختلال، از جمله اهداف مهم در طراحی سامانه‌های مخابراتی می‌باشد. در حال حاضر سامانه‌ی مخابراتی پرش فرکانسی به‌عنوان یک روش ضد اختلال مطرح می‌باشد که امکان ایجاد یک ارتباط ایمن را فراهم می‌نماید. تحقق عملیاتی یک سامانه‌ی با قابلیت پرش فرکانسی در کانال‌های چندمسیره با دستیابی به نرخ خطای پایین اهمیت بسیاری دارد. در این مقاله با توجه به اختلالاتی که در طول مسیر بر روی سیگنال اعمال می‌شود، فرستنده و گیرنده یک سامانه‌ی مخابراتی پرش فرکانسی با در نظر گرفتن ملاحظات هم‌زمان‌سازی در کانال چندمسیره طراحی می‌گردد. با شبیه‌سازی سامانه طراحی شده در کانال‌های با نویز سفید گوسی، محوشدگی رایلی و کانال چندمسیره، روش هم‌زمان‌سازی به کار گرفته شده و عملکرد آن از نظر میزان خطای بیت، ارزیابی می‌گردد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد برای دستیابی به میزان خطای بیت یکسان اختلاف مقدار سیگنال به نویز این سامانه با حالت تئوری کمتر از ۰/۵ dB می‌باشد و با توجه به نمودارهای خطای به دست آمده از شبیه‌سازی و بررسی عملکرد بلوک‌های سنکرون‌سازی زمان و فرکانس، سامانه پرش فرکانسی طراحی شده برای تحقق عملیاتی در کانال‌های چندمسیره مطلوب به نظر می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** پرش فرکانسی، سنکرون‌سازی، رهیابی، ردیابی، کانال چندمسیره

۱- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>، (aamin@ihu.ac.ir) - نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

- از یک سرفریم<sup>۴</sup> برای انجام عملیات همزمان سازی استفاده می‌گردد که نسبت طول آن به طول داده ارسالی، ۱ به ۳ می‌باشد و این ساختار باعث می‌گردد تا در صورتی که اثرات کانال چندمسیره موجب بهم ریختن هم‌دوسی در گیرنده شود، در عملیات همزمان سازی در سرفریم بعدی سریعاً جبران گردد [۶].
- سامانه‌ی ره‌یابی کد در گیرنده، طوری طراحی می‌گردد که ابتدای فریم مورد پردازش بر مبنای مسیری انتخاب گردد که سیگنال دریافتی قوی‌تری داشته باشد [۷].

## ۳- معرفی شکل موج سیگنال ارسالی

شکل موج ارسالی که در طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌ی پرش فرکانسی استفاده شده است، دارای پارامترهایی است که در ادامه بررسی می‌گردد.

## ۳-۱- انتخاب نوع مدولاسیون و پارامترهای آن

به دلیل این که پیچیدگی پیاده‌سازی مدولاسیون‌های<sup>۵</sup> ناهمدوس کم‌تر بوده و مدولاسیون MFSK معمولاً به صورت ناهمدوس عملکرد مناسبی دارد، سامانه پرش فرکانسی مورد نظر با استفاده از تغییر فرکانس حامل در مدولاسیون MFSK طراحی می‌شود [۸-۹].

برای انتخاب مقدار مناسب  $M$  که تعداد فرکانس‌های متغیر مدولاسیون FSK را مشخص می‌نماید، نیاز است تا مزایای استفاده از مقادیر بالای  $M$  در این مدولاسیون بررسی گردد که عبارتند از:

- هرچه مقدار  $M$  افزایش یابد، احتمال خطا کاهش خواهد یافت [۱۰].
- در مقدار ثابت نرخ ارسال داده با افزایش مقدار  $M$ ، طول سمبل‌ها افزایش می‌یابند و افزایش طول هر سمبل باعث سهولت هم‌زمان‌سازی سامانه می‌گردد [۱۱].
- افزایش طول سمبل موجب کاهش اثرات چندمسیرگی کانال به ازای تاخیرهای کم می‌شود [۱۲].
- با افزایش مقدار  $M$ ، به دلیل افزایش مقادیر فرکانس‌های حامل در هر کانال پرش فرکانسی، خاصیت ضدتداخلی سامانه افزایش می‌یابد [۹].

از طرف دیگر، با توجه به این که با افزایش مقدار  $M$ ، عملکرد سامانه به ازای شیفت‌های فرکانسی کم تضعیف می‌گردد، لذا با جمع‌بندی این مزایا و معایب، تصمیم بر آن شد که از مدولاسیون  $8FSK$  در

اختلال فرآیندی است که باند فرکانسی رادیویی را با ارسال نویز الکترونیکی و در نتیجه جلوگیری از ارسال اطلاعات در آن، اشغال می‌کند. لذا طراحی یک سامانه<sup>۱</sup> عملی مبتنی بر پرش فرکانسی با توجه به مزایای آن نسبت به سایر روش‌های طیف گسترده از جمله بهبود قابلیت ضدتداخلی سیگنال ارسالی در این نوع سامانه‌ها، جهت استفاده در ارتباطات ایمن ضروری به نظر می‌رسد. به طوری که با توجه به ارسال سیگنال با فرکانس‌های حامل متفاوت و شبه تصادفی، نمی‌توان با اختلال در یک یا چند فرکانس خاص، عملکرد سامانه را با مشکل جدی مواجه کرد. لذا با توجه به این که روش‌های متداول آشکارسازی، شنود، موقعیت‌یابی و اختلال در مقابل سیگنال‌های پرش فرکانسی مؤثر نیستند، این نوع سیگنال‌ها در ملاحظات جنگ الکترونیک دارای اهمیت فراوانی می‌باشند. در سال‌های اخیر، با توجه به اهمیت استفاده از این سامانه‌ها برای افزایش قابلیت ضدتداخلی ارتباطات، تحقیقات قابل توجهی برای افزایش کیفیت ارتباطی در این حوزه انجام شده است [۱-۲]. در این مقاله روش مناسبی برای طراحی فرستنده و گیرنده یک سامانه عملی پرش فرکانسی ارائه شده و با در نظر گرفتن یک شکل موج پرش فرکانسی خاص، کارایی عملکرد آن با اعمال شرایط کانال‌های مختلف از جمله کانال‌های چندمسیره و بررسی نتایج شبیه‌سازی ارزیابی می‌گردد.

## ۲- تمهیدات در نظر گرفته شده برای طراحی سامانه

## پرش فرکانسی برای مقابله با اثرات کانال چندمسیره

برای این که سامانه پرش فرکانسی در کانال چندمسیره عملکرد مطلوبی داشته باشد، موارد ذیل در ساختار شکل موج و طراحی سامانه در نظر گرفته شده است:

- در تولید دنباله شبه نویز برای پرش فرکانسی، مقادیر تولیدی تا سه عدد پی در پی با هم برابر نیستند تا در صورتی که تاخیر مسیره‌های بعدی تا سه برابر طول یک سمبل باشد، تأثیری بر عملکرد سامانه پرش فرکانسی نداشته باشد [۳].
- یک کدکننده کانولوشنال<sup>۲</sup> برای تصحیح خطای کانال در نظر گرفته شده است. هم‌چنین برای این که عملکرد کدکننده و دی‌کدکننده در کانال‌هایی که خطای پی در پی دارند، مطلوب‌تر گردد از یک درهم نه<sup>۳</sup> با طول قابل انتخاب کوتاه و بلند استفاده می‌گردد [۴-۵].

1 System

2- Convolutional

3- Interleaver

4- Preamble

5- Modulation

به‌طور متناوب و به اندازه ۲۰۰ سمبل ارسال می‌گردد. ۶۰۰ سمبل داده نیز پس از سرفریم جهت ارسال داده در هر فریم در نظر گرفته می‌شود که در نهایت طول هر فریم ۸۰۰ سمبل خواهد شد [۱۳].



شکل (۱): ساختار فریم ارسالی در سامانه‌ی طراحی شده.

بیت‌های داده هر فریم با استفاده از کدگذاری کانولوشنال با نرخ ۱/۲ کد می‌شوند. برای افزایش کارایی سامانه در کانال‌های با خطای پی در پی<sup>۵</sup>، قابلیت استفاده از دو درهم نه به اندازه حدود ۱ و ۵ ثانیه برای بیت‌های کدشده وجود دارد [۱۴].

### ۳-۴- انتخاب کانال و نرخ پرش فرکانسی

یکی از مواردی که در طراحی سامانه‌ی پرش فرکانسی باید مدنظر قرار گیرد، چگونگی پرش در بین کانال‌ها یا همان انتخاب کانال‌های پرشی می‌باشد که باید به‌طور تصادفی انجام پذیرد تا خاصیت ضدتداخلی خوبی داشته باشد [۱۵]. هم‌چنین، سرعت جابجایی بین کانال‌ها یا همان نرخ پرش، کارایی سامانه پرش فرکانسی را در مقابل اختلال‌گرها افزایش می‌دهد.

انتخاب کانال‌ها در سامانه پرش فرکانسی طراحی شده با استفاده از دنباله شبه نویز<sup>۶</sup> (PN)، انجام می‌پذیرد [۸]. برای این که بتوان در پهنای باند طیف گسترده، کانال‌هایی با شرایط انتقال مناسب انتخاب نمود که این کانال‌ها از بین مقادیر در نظر گرفته شده انتخاب می‌گردد. با توجه به این که در عمل استفاده از سامانه پرش فرکانسی کند متداول است، در سامانه شبیه‌سازی شده از بیش‌ترین نسبت پرش به سمبل در یک سامانه پرش فرکانسی کند استفاده شده است که یک سمبل در هر پرش می‌باشد [۱۶]. لذا نرخ پرش این سامانه برابر با نرخ سمبل آن می‌باشد که ۴۰۰ پرش در ثانیه به‌دست می‌آید.

### ۴- معرفی ساختار فرستنده پرش فرکانسی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، یک فرستنده پرش فرکانسی را می‌توان با انتخاب تصادفی فرکانس حامل در مدولاسیون MFSK تولید نمود. با توجه به شکل (۲)، فرستنده طراحی شده شامل قسمت‌های تولیدکننده تصادفی پرش، مدوله‌کننده MFSK می‌باشد و هم‌چنین برای افزایش کارایی این سامانه در محیط کانال‌های خراب، از یک کدکننده و یک درهم نه استفاده شده است. برای سهولت امر

طراحی و شبیه‌سازی سامانه پرش فرکانسی استفاده گردد و در حالت کلی می‌توان سیگنال مدوله‌شده را به‌صورت فرمول (۱) نشان داد:

$$m_{FHMFSK}(t) = \cos(2\pi f_{CHop}t + \varphi(t)) \quad (1)$$

که در آن،  $f_{CHop}$  نشان‌دهنده فرکانس حامل پرش می‌باشد و  $\varphi(t)$  به انتگرال در زمان سیگنال مدوله‌شونده وابسته بوده و پیوسته و یا ناپیوسته بودن فاز مدولاسیون را نشان می‌دهد [۱۱].

با توجه به استفاده از مدولاسیون ناهمدوس 8FSK برای طراحی سامانه و برای این که شرط تعامد<sup>۱</sup> برقرار باشد، فرکانس جداسازی باید به‌صورت فرمول (۲) محاسبه شود.

$$\Delta f = h \cdot \text{BaudRate} = \frac{h}{T} \quad (2)$$

که در آن،  $h$  اندیس مدولاسیون می‌باشد. برای این که بیشترین استفاده را برای ارسال داده از پهنای باند ۴ کیلوهرتز داشته باشیم، مقدار فرکانس جداسازی را به‌صورت  $\Delta f = \text{BaudRate}$  در نظر می‌گیریم و مقدار آن برابر با ۴۰۰ هرتز خواهد بود که نرخ سمبل<sup>۲</sup> نیز به تبع آن برابر ۴۰۰ می‌شود [۱۰].

### ۳-۲- پهنای باند سیگنال ارسالی

با توجه به این که تخصیص کانال در ارتباطات صوتی معمولاً حدود ۴ کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود، در شبیه‌سازی انجام شده، پهنای باند سیگنال ۳۶۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است و از دو طرف پهنای باند ۲۰۰ هرتز برای جلوگیری از اثرات فیلتر در گیرنده و شیفتر فرکانسی، تخصیص می‌یابد. لذا به‌دلیل این که پهنای باند کانال ۴ کیلوهرتز می‌باشد، فرکانس نمونه‌برداری نیز ۴ کیلوهرتز فرض شده است [۱۲].

### ۳-۳- ساختار فریم‌های ارسالی و کدگذاری برای

#### تصحیح خطای کانال

برای این که در گیرنده بتوان سیگنال دریافتی را از نظر زمان و فرکانس سنکرون<sup>۳</sup> نمود، فریم‌بندی خاصی در طراحی سامانه، در نظر گرفته شده است و هم‌چنین برای تصحیح خطای کانال بیت‌های ارسالی کدگذاری می‌شوند.

مطابق شکل (۱)، فریم‌بندی سیگنال ارسالی به این صورت است که در ابتدای هر فریم، ۲۰۰ سمبل به‌عنوان سرفریم<sup>۴</sup> قرار می‌گیرد که برای سنکرون‌سازی فریم‌های دریافتی در گیرنده استفاده می‌گردد. ساختار سرفریم به این صورت است که ۲ فرکانس انتخابی از ۸ فرکانس متغیر سیگنال 8FSK که به‌صورت قرینه از هم می‌باشند،

1- Orthogonality

2- Baud Rate

3- Synchron

4- Preamble

5- Burst Error

6- Pseudo Noise

#### ۴-۴- دنباله‌ساز و جدول پرش

برای تولید دنباله تصادفی پرش از یک چندجمله‌ای مولد PN با درجه ۱۰ استفاده شده است و سمبل‌های ابتدای آن با رعایت شرط عدم تکرار متوالی، به‌طور متناوب در هر فریم تکرار می‌شود. ۴۰۰ کانال برای ارسال سیگنال پرش فرکانسی استفاده می‌گردد.

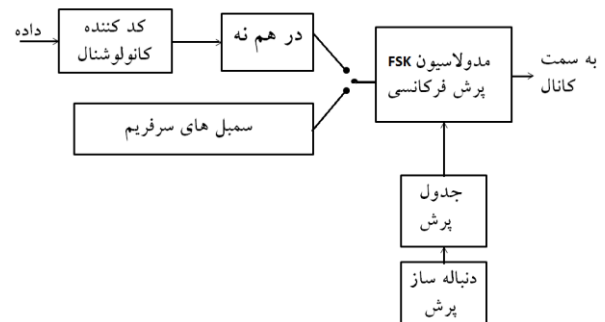
#### ۴-۵- پرش فرکانسی با استفاده از مدولاسیون 8FSK

جهت ارسال اطلاعات از یک مدوله‌کننده 8FSK استفاده شده است. در این بخش، مقادیر خروجی جدول پرش به‌عنوان فرکانس‌های حامل به مدوله‌کننده اعمال می‌شود. اگر فقط از مدولاسیون 8FSK در فرستنده استفاده می‌شد، فرکانس نمونه‌برداری ۸ کیلوهرتز (دو برابر پهنای باند سیگنال ارسالی) برای تولید سیگنال کافی بود ولی با توجه به این‌که در سامانه پرش فرکانسی از ۴۰۰ کانال استفاده می‌شود، فرکانس نمونه‌برداری برای تولید سیگنال ۴۰۰ برابر ۸ کیلوهرتز خواهد بود. مدولاسیون به‌صورت فاز پیوسته انجام می‌شود [۸].

#### ۵- معرفی ساختار گیرنده پرش فرکانسی

یکی از مسائلی که در طراحی گیرنده سامانه‌های پرش فرکانسی باید به آن توجه شود، بحث هم‌زمان‌سازی سیگنال دریافتی با سیگنال مرجع و جبران آفست‌های زمانی و فرکانسی می‌باشد. لذا حجم زیادی از ساختار گیرنده سامانه پرش فرکانسی شامل بلوک‌های مربوط به هم‌زمان‌سازی می‌باشد. همان‌طوری‌که در شکل (۴) نشان داده شده است، سیگنال دریافتی پس از عبور از مدوله‌کننده باند پایه، وارد بانک فیلترهای میان‌گذری می‌گردد و در تمام ۴۰۰ کانال ممکن فیلتر می‌شود. در ادامه به‌کمک جدول پرش ۱۰۰ کانال فعال از بین ۴۰۰ کانال ممکن انتخاب می‌گردد و نمونه‌های به‌دست‌آمده در حافظه پرش‌ها ذخیره می‌گردد. بلوک ره‌یابی کد، ابتدای هر فریم را از بین مجموعه سمپل‌های ذخیره شده در حافظه پرش مشخص می‌کند و می‌توان با استفاده از دنباله‌ساز پرش، سمپل‌های مربوط به سمبل پرش فعال در آن لحظه را انتخاب نموده و به بلوک دم‌دوله‌کننده FSK داد. در صورتی که سمپل‌ها دچار شیفت زمانی یا فرکانسی شده باشند، بلوک‌های ره‌یابی و ردیابی زمان و فرکانس، این شیفت‌ها را جبران می‌نمایند. در نهایت، بیت‌های داده خروجی دم‌دوله‌کننده از بلوک درهم نه معکوس عبور کرده و دی‌کد می‌شود [۱۳ و ۱۷].

هم‌زمان‌سازی در گیرنده در ابتدای هر فریم، ۲۰۰ سمبل به‌عنوان سرفریم ارسال شده و سپس ۶۰۰ سمبل داده فرستاده می‌شود. در ادامه نحوه انتخاب پارامترها و عملکرد هر کدام از این قسمت‌ها بررسی می‌گردد.



شکل (۲): ساختار فرستنده سامانه پرش فرکانسی طراحی شده.

#### ۴-۱- کدکننده کانولوشنال

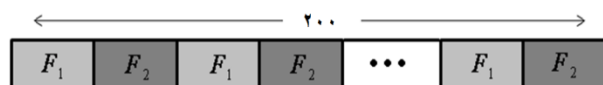
برای کد نمودن داده در فرستنده سامانه پرش فرکانسی، از کدکننده کانولوشنال با نرخ ۱/۲ و طول محدودکننده<sup>۱</sup> برابر با ۷ استفاده شده است [۶ و ۱۴].

#### ۴-۲- درهم‌نه

برای این‌که کارایی سامانه در کانال‌هایی که خطای پی در پی دارند، افزایش یابد، داده‌های دودویی کدشده از یک درهم‌نه بلوکی عبور می‌کند. این کار باعث می‌شود که اگر در کانال خطای پی در پی رخ دهد در گیرنده پس از عبور از بلوک معکوس درهم‌نه، خطا در سراسر فریم پخش شود تا دی‌کدکننده بتواند خطا را بهتر تصحیح نماید [۶].

#### ۴-۳- سرفریم

برای این‌که در گیرنده بتوان قبل از پردازش داده‌ها عمل هم‌زمان‌سازی را انجام داد و همچنین برای ره‌یابی فرکانس، در ابتدای هر فریم، تعدادی سمبل به‌عنوان سرفریم ارسال می‌گردد. به این صورت که ۲۰۰ سمبل با ۲ فرکانس به‌صورت قرینه از مجموعه فرکانس‌های MFSK، یکی در میان در ابتدای فریم، قبل از سمبل‌های داده فرستاده می‌شوند. در شکل (۳)، نحوه چینش سمبل‌های سرفریم نشان داده شده است [۱۳].



شکل (۳): نحوه چینش سمبل‌های سرفریم.

بعلاوه یک مقدار طول محافظ، ذخیره می‌شوند تا با انجام عملیات هم‌زمان‌سازی، نمونه‌ها برای استخراج بیت‌های درست وارد بلوک‌های دمدوله‌کننده شوند.

**۴-۵- ره‌یابی کد**

سامانه ره‌یابی کد در بازه‌ای زمانی به‌طول کد (یک فریم) و به‌ازای هر نمونه، این‌که کل کد در پنجره مربوط به ره‌یابی قرار گرفته است یا نه را بررسی می‌نماید. بلوک جستجوکننده در واقع یک آشکارساز انرژی است که با توجه به مقادیر پرش‌های کد، انرژی متنظر با این مقادیر را با هم جمع می‌نماید. اگر سیگنال کد در پنجره ره‌یابی قرار بگیرد، مجموع انرژی در کانال‌های متنظر با مقادیر کد به‌گونه‌ای زیاد می‌گردد که در حضور نویزهای خیلی قوی نیز قابل تشخیص باشد.

انرژی‌های متنظر با پرش‌های کد، به انرژی نقاطی از کانال که در آن پرش وجود ندارد، نرمالیزه می‌شود تا در حضور تداخل‌های قوی در بعضی کانال‌ها، سامانه ره‌یابی کد دچار اشتباه نشود. روش ره‌یابی کد را می‌توان نوعی شباهت‌سنجی نرمالیزه فرض کرد که روی یک ماتریس زمانی-فرکانسی محاسبات خود را انجام می‌دهد [۹].

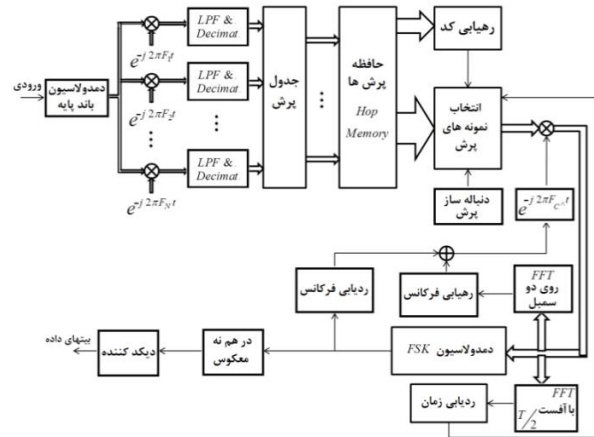
در کانال چندمسیره سیگنال دریافتی شامل سیگنال‌های مسیره‌های مختلف با توان متوسط دریافتی متفاوت است و سامانه ره‌یابی در هر فریم، روی سیگنال مسیری قفل می‌کند که در طول یک فریم بیشترین انرژی را دارد [۷ و ۱۸].

**۵-۵- دنباله‌ساز پرش**

دنباله‌ساز پرش در صورت اعلام ابتدای فریم از طرف بلوک ره‌یابی کد، شروع به تولید مقادیر پرش‌ها می‌نماید و برحسب این‌که کدام سمبل در حال پردازش است مقدار آن مشخص می‌شود. بلوک انتخاب سیگنال پرش از کانال فعال با استفاده از مقدار فعلی دنباله‌ساز پرش کانال فعال را انتخاب نموده و نمونه‌های آن را به دمدوله‌کننده اعمال می‌نماید.

**۶-۵- دمدوله‌کننده FSK**

نمونه‌های خروجی بلوک انتخاب سیگنال پرش از کانال فعال وارد دمدوله‌کننده FSK می‌شود، در این بخش از نمونه‌های ورودی FFT گرفته می‌شود و برحسب این‌که کدام اندیس خروجی FFT مقدار بیشینه را دارد، مقدار سمبل مورد نظر که عددی بین ۸-۱ می‌باشد، مشخص می‌شود. این نوع گیرنده که گیرنده تحلیل طیفی<sup>۴</sup> نامیده می‌شود، یک گیرنده بهینه برای سیگنال MFSK به‌شمار می‌رود. به شرطی‌که در زمان و فرکانس، به‌طور صحیح ره‌یابی و ردیابی گردد [۱۰ و ۱۲].



شکل (۴): ساختار گیرنده سامانه‌ی پرش فرکانسی طراحی‌شده.

**۵-۱- دمدوله‌کننده باند پایه**

برای دمدوله‌نمودن سیگنال دریافتی در باند پایه، از یک فیلتر هیلبرت<sup>۱</sup> و یک فیلتر میان‌گذر با پیاده‌سازی FIR<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد. برای کاهش پردازش در گیرنده از نمونه‌های خروجی، چند سمپل در میان<sup>۳</sup> برداشته می‌شود. خروجی این فیلترها به‌صورت مختلط با هم جمع می‌گردد تا به فیلترهای میان‌گذر اعمال گردد. پس از عبور سیگنال از این بلوک فرکانس نمونه‌برداری برای پردازش سیگنال، ۴۰۰ برابر ۴ کیلو هرتز خواهد بود [۱۰].

**۵-۲- فیلترهای میان‌گذر**

مجموعه ضرب‌کننده در  $e^{-j2\pi Ft}$  و بلوک فیلتر پایین‌گذر، فیلتر میان‌گذر را تشکیل می‌دهد. استفاده از ضرب‌کننده در  $e^{-j2\pi Ft}$  برای این است که در هر کدام از شاخه‌ها کانال مورد نظر به اطراف فرکانس صفر منتقل گردد. در ادامه با استفاده از فیلتر پایین‌گذر با پهنای باند یک کانال (۴ کیلوهرتز) اثرات سیگنال‌های سایر کانال‌ها حذف می‌شود. در ورودی این قسمت پردازش بر مبنای فرکانس نمونه‌برداری برابر ۴۰۰ برابر ۴ کیلوهرتز می‌باشد ولی جهت کاهش پردازش در بلوک‌های بعدی گیرنده، از هر ۴۰۰ سمپل خروجی فیلتر پایین‌گذر فقط یک سمپل انتخاب می‌شود. لذا فرکانس نمونه‌برداری به ۴ کیلوهرتز تقلیل می‌یابد [۹].

**۵-۳- جدول و حافظه پرش‌ها**

مقادیر خروجی به‌دست‌آمده از فیلترهای میان‌گذر در ۴۰۰ کانال ممکن، توسط جدول پرش به ۱۰۰ کانال فعال تقلیل می‌یابند و این مقادیر در یک بافر چرخشی با طول تعداد سمپل‌های یک فریم

1- Hilbert  
2- Finite Impulse Response  
3-DownSampling

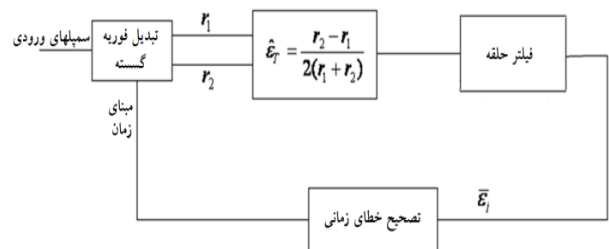
## ۵-۷- ردیابی زمان

در کل سنکرون سازی<sup>۱</sup> زمان در گیرنده برای شناخت زمان دقیق شروع نمونه های یک سمبل و مدت زمان هر یک از فرکانس های دریافتی انجام می شود. روشی که برای ردیابی زمان در نظر گرفته شده است این است که از یک سرفریم خاص با تون های متناوب که قبل از ارسال داده های واقعی قرار دارد، استفاده شود. برای سنکرون سازی زمان حتماً ضروری نیست که از سرفریم استفاده شود، در حالی که برای سنکرون سازی فرکانس بسیار مطلوب است و اگر از آن استفاده نشود، سنکرون شدن فرکانس به سختی امکان پذیر خواهد بود.

هم زمان سازی بر مبنای تخمین زنده بیشترین درست نمایی زمان خطا قرار دارد که از محاسبه طیف دو سمبل متوالی هر کدام در بازه  $T/2$  به دست می آید. این تخمین زنده مقدار خطای زمانی را به دست می آورد. مرحله اصلی ردیابی زمان با تخمین بیشترین درست نمایی زمان جابجایی  $\hat{\epsilon}_T$  به صورت فرمول (۳) محاسبه می شود.

$$\hat{\epsilon}_T = \frac{r_2 - r_1}{2(r_1 + r_2)} \quad (3)$$

که در آن،  $r_1$  و  $r_2$  اجزاء فوریه در فرکانس های ارسالی به اندازه  $T/2$  از سمبل فعلی و  $T/2$  از سمبل قبل در طول بازه هم زمان سازی هستند. طرح هم زمان سازی حلقه بسته جهت این که میزان خطای زمان  $\hat{\epsilon}_T$  به سمت صفر میل کند، طراحی شده است. حلقه ردیابی زمان دقت سامانه را دست کم به اندازه ی دقت به دست آمده در ردیابی کد نگه می دارد، به جز در مواقعی که تغییرات ناگهانی در زمان رخ دهد. در نتیجه افت کلی در کارایی گیرنده در اثر خطای زمان بندی می باشد که مقدار ثابتی داشته و مستقل از نرخ داده می باشد. نمودار بلوکی حلقه ردیابی زمان در شکل (۵) نشان داده شده است. نتیجه به دست آمده برای تصحیح خطای زمانی به بلوک انتخاب سیگنال پرش از کانال فعال اعمال می شود تا سمبل هایی که برای دمدوله نمودن FSK استخراج می شوند، دقیقاً سمبل های یک سمبل باشد [۱۳].



شکل (۵): نمودار بلوکی حلقه ردیابی زمان

## ۵-۸- ره یابی فرکانس

سنکرون سازی فرکانس، به دست آوردن محل صحیح طیف سیگنال ورودی در گیرنده است و به دو بخش عمده ره یابی و ردیابی تقسیم می شود. باید توجه شود که سنکرون سازی فرکانس باید زودتر از سنکرون سازی زمان اتفاق بیفتد. مسئله ره یابی فرکانس این است که برای دستیابی به سیگنال های مورد نظر، در پهنای باند، جستجو نماید تا این که اسیلاتور محلی را با فرکانس واقعی فرستنده تطبیق دهد.

ره یابی فرکانس فقط در سمبل های سرفریم و در ابتدای فریم انجام می شود. بدین صورت که از نمونه های دریافتی سرفریم در بازه  $2T$  (یعنی در دو فرکانس متناوب متوالی سرفریم) تبدیل فوریه گرفته می شود. بازه  $2T$  برای این است که هر دو فرکانس با انرژی یکسان در آن حاضر باشند. بعد از این که طیف خروجی FFT برای تمام جفت سمبل های سرفریم محاسبه شد، طیف میانگین آن ها به دست آورده می شود و با توجه به این که مکان دقیق طیف سرفریم از قبل مشخص است، آفست فرکانسی به اندازه کم تر از  $1/4$  فرکانس جداسازی جبران می شود. البته میزان دقت جبران آفست فرکانسی در ره یابی به دقت FFT وابسته است. مقدار خطای فرکانسی به دست آمده در ره یابی به نمونه های خروجی بلوک انتخاب سیگنال پرش از کانال فعال اعمال می شود [۱۳ و ۱۷].

## ۵-۹- ردیابی فرکانس

ردیابی فرکانس با فرض اتمام عملیات ره یابی فرکانس و بعد از سنکرون سازی اولیه زمان انجام می شود و مسئله این است که مکان طیف در محدوده خطای فرکانس کم تر از  $1/4$  فرکانس جداسازی قرار گیرد. نمودار بلوکی حلقه ردیابی فرکانس به صورت شکل (۶) می باشد و در آن نمونه های یک سمبل به عنوان ورودی در نظر گرفته می شود.

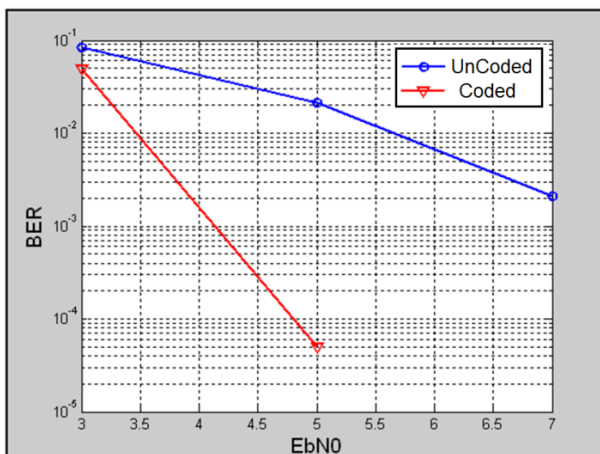
در این حلقه، تخمین زنده جهت تصمیم گیری مقدار خطا از فرمول (۴) استفاده می نماید.

$$\hat{\rho} = \frac{r_{+1} - r_{-1}}{2r_0} \quad (4)$$

که در آن،  $r_{-1}$ ،  $r_0$  و  $r_{+1}$  اندازه اجزاء طیفی در فرکانس های  $1/T$  بالاتر و پایین تر از سیگنالی که اندازه طیفی  $r_0$  دارد، می باشند. پس از عبور از فیلتر حلقه، مقدار دقیق خطای فرکانسی برای جبران آفست به خروجی بلوک انتخاب سیگنال پرش از کانال فعال، اعمال می گردد. ردیابی فرکانس در طول پردازش داده نیز ادامه پیدا می کند [۱۳ و ۱۹].

برای جبران این آفست‌ها استفاده می‌گردد. برای بررسی عملکرد سامانه طراحی شده در کانال AWGN، در وضعیت‌های مختلف آفست فرکانسی (حداکثر تا ۴۰۰ هرتز) و زمانی (کسری از طول یک پرش) سامانه پرش فرکانسی شبیه‌سازی شده تست گردید که در نهایت با بررسی نمودارهای نرخ خطای آن برای  $E_b/N_0$  های متفاوت توابع هم‌زمان‌ساز، آفست‌های مختلف زمانی و فرکانسی در محدوده‌های تعیین شده را به خوبی جبران کرده و نتایج به ازای وجود آفست و عدم وجود آن تقریباً با هم برابر بودند. در ادامه به‌عنوان نمونه برای دو حالت مختلف بدون کدگذاری و با کدگذاری نتایج شبیه‌سازی نشان داده می‌شود.

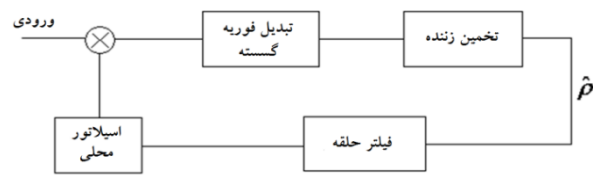
در حالت اول یک آفست زمانی، لغزش زمانی و آفست فرکانسی با فرض کانال نویز سفید گوسی به سامانه اعمال می‌گردد که در شکل (۷) نمودار مقایسه خطای بیت سامانه شبیه‌سازی شده با حالت تئوری نشان داده شده است.



شکل (۷): نمودار مقایسه عملکرد سامانه شبیه‌سازی شده با حالت تئوری در کانال AWGN.

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد که با وجود آفست فرکانسی و زمانی در سیگنال به نویزهای مختلف، عملکرد سامانه‌ی شبیه‌سازی شده با مقدار تئوری عنوان شده در مرجع [۱۰] کمتر از ۰/۵ dB اختلاف وجود دارد که بسیار مطلوب می‌باشد و هم‌چنین در مقایسه با نتایج عنوان شده در مرجع [۲۰] عملکرد سامانه‌ی شبیه‌سازی شده منطبق بر عملکرد آن می‌باشد.

در حالت دوم در صورتی که از کدکننده کانولوشنال در سامانه شبیه‌سازی شده استفاده شود، عملکرد سامانه از نظر میزان نرخ خطا بهتر خواهد شد که در شکل (۸) نمودار خطای سامانه با وجود کدکننده و بدون وجود آن مقایسه شده است و در آن مشخص است که با استفاده از کدکننده در سامانه، به‌عنوان نمونه عملکرد آن برای خطای ۰/۰۰۱ حدود ۴ dB بهتر می‌شود.



شکل (۶): نمودار بلوکی حلقه ردیابی فرکانس.

### ۵-۱۰- درهم نه معکوس

با توجه به طول درهم نه که در فرستنده انتخاب می‌شود، در گیرنده پس از آماده‌شدن بافر داده به اندازه همان طول، آن داده‌ها به بلوک درهم نه معکوس اعمال می‌شود. این بلوک عکس عملکرد درهم نه فرستنده را انجام می‌دهد.

### ۵-۱۱- دی کدکننده کانولوشنال

برای دی کد نمودن داده‌ها در گیرنده از یک دیکدکننده کانولوشنال با ساختار ویتربی<sup>۲</sup> و به‌صورت پیوسته و تصمیم‌گیری سخت استفاده شده است. مقدار تاخیر دیکدر<sup>۳</sup> برای دی کد کردن ۹ برابر طول محدودکننده که برابر با ۶۳ می‌باشد، انتخاب شده است. در شبیه‌سازی این دی کدکننده از تابع دیکدر MATLAB استفاده شده است.

## ۶- ارزیابی عملکرد سامانه‌ی پرش فرکانسی شبیه‌سازی شده در کانال‌های مختلف

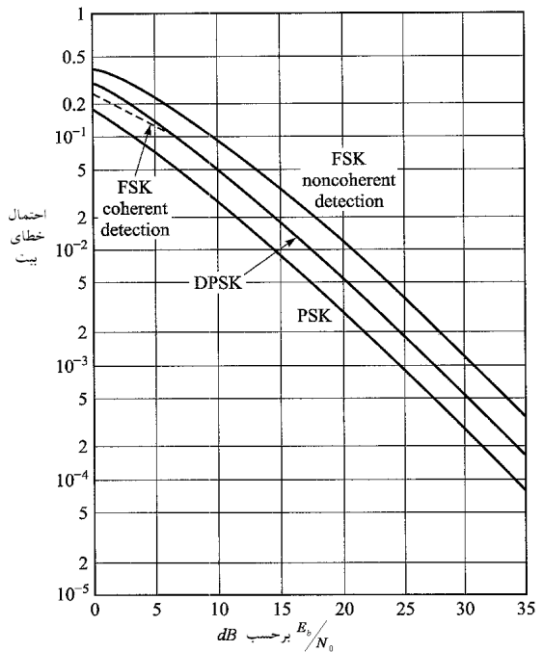
سامانه پرش فرکانسی طراحی شده با در نظر گرفتن پارامترها و ساختاری که توضیحات آن در بخش‌های قبل ارائه گردید، در محیط نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شد. برای ارزیابی عملکرد این سامانه در شرایط واقعی، نحوه کارکرد آن در کانال‌های AWGN<sup>۴</sup>، رایلی و کانال چندمسیره، بررسی شده و نرخ خطای بیت‌های خروجی سامانه در این کانال‌ها به‌دست آمد. در ادامه کارایی سامانه‌ی پرش فرکانسی شبیه‌سازی شده در هر کدام از کانال‌ها به‌صورت مجزا بررسی می‌گردد. نمودارها به‌صورت پیش‌فرض بدون وجود کدکننده در نظر گرفته شده‌اند و در صورت استفاده از کدکننده در کنار نمودار به آن اشاره شده است.

### ۶-۱- کارایی سامانه شبیه‌سازی شده در کانال AWGN

در یک سامانه عملی علاوه بر تاثیرات کانال، با توجه به اختلاف در اسیلاتورهای فرستنده و گیرنده و دلایل دیگر، آفست و لغزش زمانی و فرکانسی در سیگنال دریافتی ایجاد می‌شود و توابع هم‌زمان‌ساز

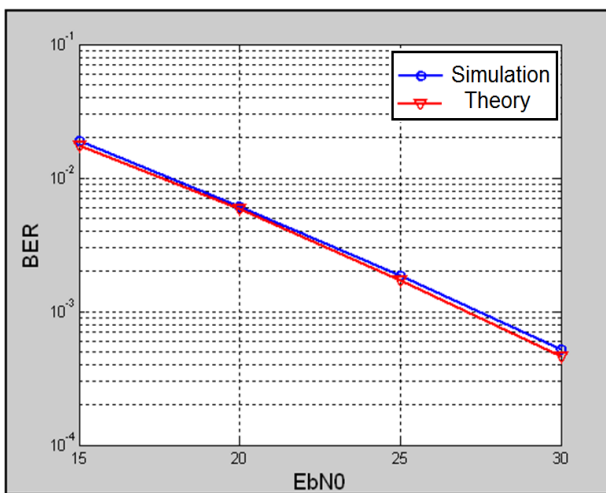
1- Decoder  
2-Viterbi  
3-Traceback Length  
4-Addition White Gaussian Noise





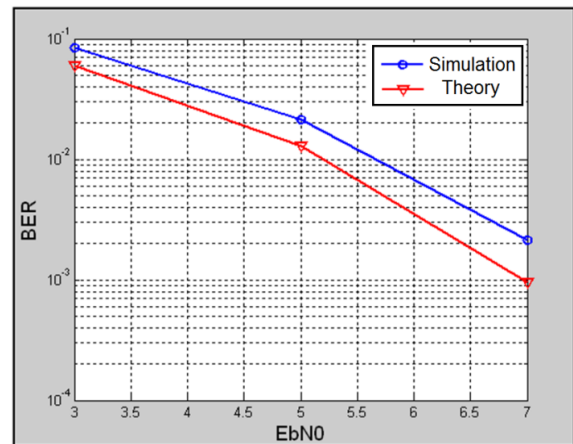
شکل (۱۰): احتمال خطای بیت سامانه‌های ۲FSK و ۸FSK در کانال محوشدگی رایلی [۱۰].

برای بررسی عملکرد سامانه‌ی شبیه‌سازی شده به ازای مقادیر مختلف داپلر فرکانسی (تا ۱۰ هرتز)، سامانه تست شد که نتایج به دست آمده نزدیک هم بوده و سامانه تقریباً عملکرد یکسانی داشت. در شکل (۱۱) نمودار مقایسه نرخ خطای خروجی برای سامانه شبیه‌سازی شده پرش فرکانسی به عنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل (۱۱): مقایسه احتمال خطای بیت سامانه پرش فرکانسی شبیه‌سازی شده در کانال محوشدگی رایلی با حالت تئوری.

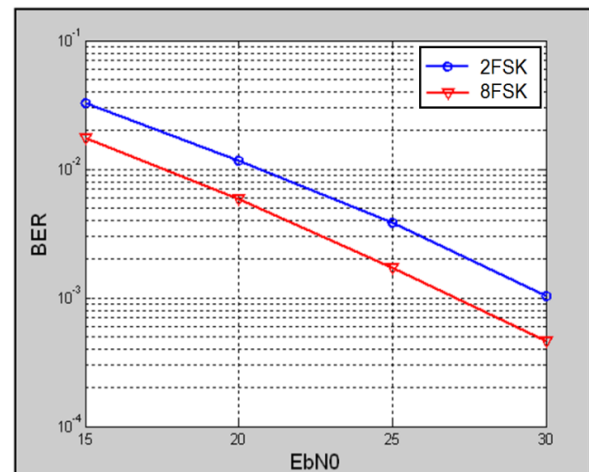
با توجه به نتایج به دست آمده در این شکل، در حالت کلی در کانال‌های محوشدگی رایلی، عملکرد سامانه شبیه‌سازی شده تقریباً با حالت ذکر شده در مرجع [۱۰ و ۲۱] برابر می‌باشد.



شکل (۸): مقایسه نمودار خطای سامانه شبیه‌سازی شده با وجود کدکننده و بدون وجود آن.

### ۲-۶- کارایی سامانه شبیه‌سازی شده در کانال محوشدگی رایلی

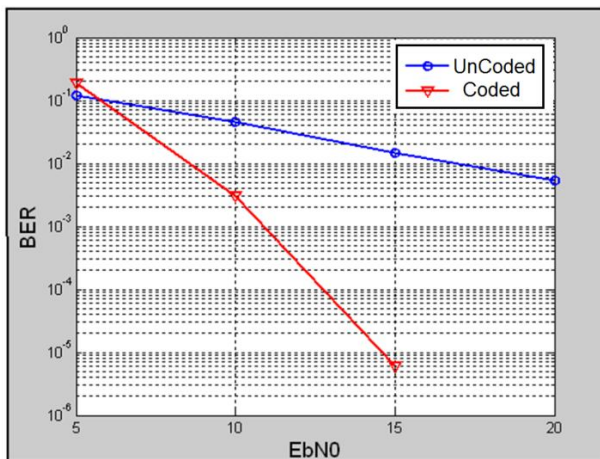
در صورتی که کانال چندمسیره نباشد ولی اثرات داپلر<sup>۱</sup> در آن وجود داشته باشد، کانال محوشدگی رایلی می‌باشد. برای این که بتوان درستی عملکرد سامانه را با اعمال کانال محوشدگی رایلی بررسی نمود، نمودار شکل (۹) به عنوان نمودار مرجع در نظر گرفته می‌شود. این نمودار که در مرجع [۱۰] به آن اشاره شده است، عملکرد سامانه ۲FSK ناهمدوس را از نظر نرخ خطا در کانال رایلی نشان می‌دهد.



شکل (۹): احتمال خطای بیت سامانه ۲FSK در کانال محوشدگی رایلی [۱۰].

با توجه به شکل (۹) و شبیه‌سازی مدوله‌کننده FSK با استفاده از توابع نرم‌افزار MATLAB مقدار خطای بیت در سامانه ۸FSK به صورت شکل (۱۰) خواهد بود [۱۰].





شکل (۱۴): مقایسه نرخ خطا در سامانه با کدکننده و بدون وجود آن به ازای تاخیر بیشتر از طول سمبل.

در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که با استفاده از کدکننده، مقدار خطای سامانه به میزان مطلوبی کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از سامانه‌ی پرش فرکانسی شبیه‌سازی شده با توجه به میزان خطای کم در سیگنال به نویزهای شرایط عملیاتی (۱٪ خطای بیت در سیگنال به نویز حدود ۱۰ dB) امکان ایجاد یک ارتباط مناسب در کانال‌های چندمسیره وجود دارد.

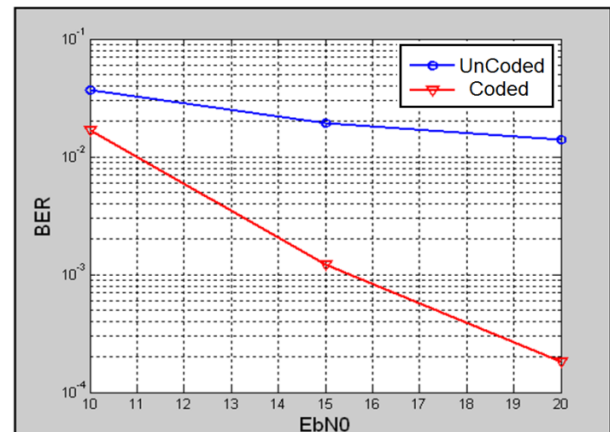
#### ۴-۶- ارزیابی عملکرد سامانه شبیه‌سازی شده در شرایط آفست زمان و فرکانس

در بخش‌های قبیل، عملکرد سامانه شبیه‌سازی شده در شرایط کانال‌های مختلف، بررسی و ارزیابی گردید که با وجود سیگنال به نویزهای مختلف کارایی سامانه به نحوی بود که در برخی نقاط منطبق بر نمودارهای حالت تئوری بوده و در سایر نقاط نیز کم‌تر از ۰/۵ dB با آن فاصله داشت. در این بخش نحوه عملکرد سامانه برای جبران آفست فرکانسی و زمانی ارزیابی می‌گردد، به طوری که با وجود آفست زمانی به اندازه کسری از طول یک سمبل و هم‌چنین لغزش زمان به اندازه ۲۰ ppm و اعمال آفست فرکانسی، نتایج شبیه‌سازی جبران آفست زمان و فرکانس در شکل‌های (۱۶-۱۵) نشان داده شده است.

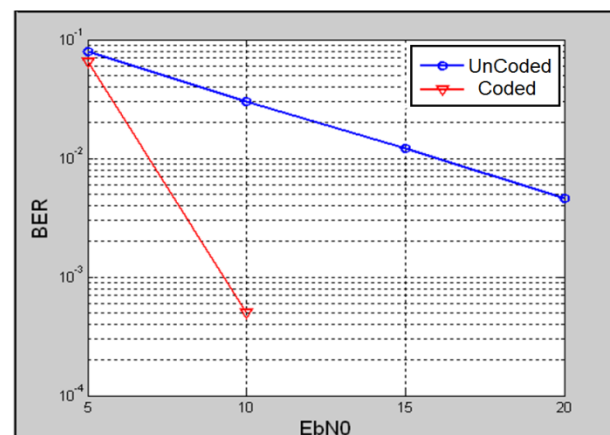
در شکل (۱۵)، مقدار تصحیح خطای زمانی نرمالیزه شده بر روی یک سمبل می‌باشد. همان‌طوری که مشخص است با توجه به این که حدود ۰/۶ طول سمبل آفست زمانی در سامانه اعمال شده است، بلوک ردیابی زمان در ابتدا خود را به ۰/۶- رسانده است و تغییرات بعد از آن به دلیل لغزش زمانی می‌باشد.

#### ۳-۶- کارایی سامانه شبیه‌سازی شده در کانال چندمسیره

با توجه به این که در مراجع معتبر، نمودار خطای بیت در مورد سامانه‌های پرش فرکانسی برای کانال‌های چندمسیره ذکر نشده است، لذا برای اطمینان از درستی عملکرد سامانه پرش فرکانسی شبیه‌سازی شده، نمودارهای خطای آن‌ها با سامانه شبیه‌سازی شده توسط توابع MATLAB و با فرض هم‌زمان بودن گیرنده و فرستنده (یعنی بدون استفاده از توابع هم‌زمان‌ساز) مقایسه گردید. شکل‌های (۱۴-۱۲) نرخ خطای سامانه‌ی پرش فرکانسی شبیه‌سازی شده با وجود کدکننده و بدون آن برای سه حالت تاخیر بسیار کوچک‌تر از طول سمبل، تاخیر به اندازه کسری از طول سمبل و تاخیر بزرگ‌تر از طول یک سمبل را نشان می‌دهد. در این نمودارها، کانال دومسیره فرض شده است به نحوی که هر دو مسیر، بهره یکسانی دارند.



شکل (۱۲): مقایسه نرخ خطا در سامانه با کدکننده و بدون وجود آن به ازای تاخیر بسیار کم‌تر از طول سمبل.

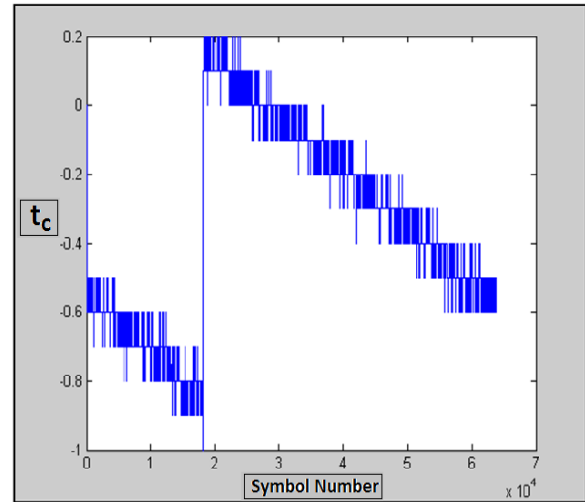


شکل (۱۳): مقایسه نرخ خطا در سامانه با کدکننده و بدون وجود آن به ازای تاخیر در کسری از طول سمبل.

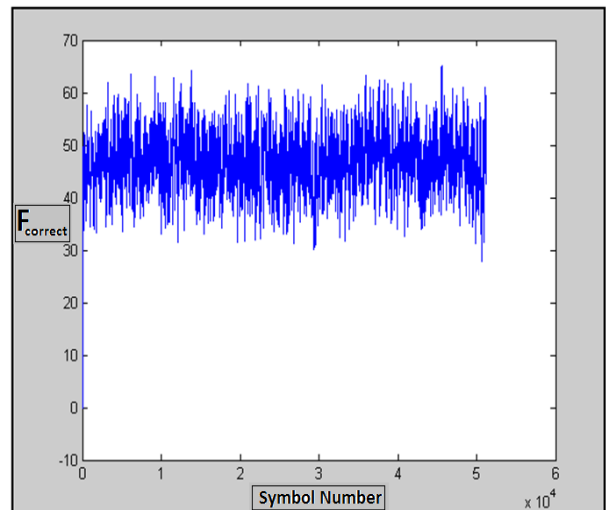
درهم نه، توسط مدولاتور 8FSK با فاز پیوسته و انتخاب کانال پرشی توسط یک مولد PN، ارسال گردد. گیرنده سامانه‌ی پرش فرکانسی برای عملکرد مناسب نیاز به بلوک‌های سنکرون‌سازی دارد که در طراحی آن در ابتدا از یک بانک فیلتر برای دمدوله‌نمودن و هم‌زمان‌سازی استفاده گردید. سیگنال دریافتی پس از عبور از دمدوله‌کننده باند پایه و فیلترهای میان‌گذر وارد بلوک ره‌یابی کد می‌گردد و با اعلام ابتدای سمبل‌های هر فریم توسط بلوک ره‌یابی کد، دمدوله‌کننده FSK بر مبنای عملکرد تحلیل طیفی مقادیر بیت‌ها را استخراج می‌کند و پس از عبور از بلوک‌های درهم‌نه معکوس و دی‌کدکننده، بیت‌های خالص ارسالی به دست می‌آید. در صورتی که سیگنال دریافتی دچار آفست و لغزش زمانی و فرکانسی شده باشد، بلوک‌های سنکرون‌سازی زمان و فرکانس، این مقادیر را جبران می‌نمایند. با شبیه‌سازی سامانه پرش فرکانسی طراحی شده در کانال‌های مختلف، عملکرد آن ارزیابی شد. در کانال AWGN نتایج به دست آمده برای میزان خطای بیت خروجی سامانه، تقریباً منطبق بر نتایج عنوان شده در منابع [۱۰ و ۲۰] بود. در کانال محوشدگی رایلی، عملکرد سامانه با نمودارهای ذکر شده در منابع [۱۰ و ۲۱] مقایسه شد که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای دست‌یابی مقدار خطای بیت یکسان، اختلاف بین سیگنال به نویز سامانه شبیه‌سازی شده و نتایج مذکور در مراجع کمتر از ۵/۰ dB بوده و به ازای برخی سیگنال به نویزها برهم منطبق می‌باشند. در کانال دومسیره، عملکرد سامانه شبیه‌سازی شده با وجود دی‌کدکننده ارزیابی شد که با توجه به این که ۱٪ خطای بیت در سیگنال به نویز حدود ۱۰ dB به دست می‌آید، سامانه در شرایط عملیاتی میزان خطای بیت مناسب برای ایجاد یک ارتباط مخابراتی داشته و برای ایجاد یک ارتباط مطلوب، قابل قبول می‌باشد. در نهایت نیز عملکرد سامانه شبیه‌سازی شده در شرایط آفست زمان و فرکانس، ارزیابی شد و مشخص گردید که به ازای تاخیرهای مسیر دوم به اندازه کم‌تر و بیش‌تر از طول یک سمبل و هم‌چنین با وجود آفست فرکانسی حدود ۵۰ هرتز، بخش‌های سنکرون‌سازی زمان و فرکانس در گیرنده به‌درستی عمل می‌نمایند. در نتیجه، با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص می‌باشد که سامانه پرش فرکانسی شبیه‌سازی شده در این مقاله، شرایط مناسبی را برای تحقق عملیاتی در محیط‌های با وجود اختلال‌های مخابراتی عمدی و غیرعمدی دارد.

## ۸- مراجع

1. X. Y. Meng, R. Tao, and L. Jia, "An Intelligent Anti-jamming Frequency Hopping System," IEEE, Comm. Conference, 15 November 2010.
2. M. Hanawal, M. Abdel-Rahman, and M. Krunz, "Joint Adaptation of Frequency Hopping and Transmission Rate for Anti-Jamming Wireless Systems," IEEE Transactions



شکل (۱۵): نمودار جبران آفست و لغزش زمانی توسط بلوک ردیابی زمان.



شکل (۱۶): نمودار جبران آفست فرکانسی توسط بلوک ردیابی فرکانس.

در شکل (۱۶)، مقدار خطای فرکانسی جبران شده می‌باشد که آفست فرکانسی حدود ۵۰ هرتز را جبران می‌نماید. در کل، با توجه به نتایج مشاهده شده، مشخص است که بلوک‌های طراحی شده برای سنکرون‌سازی زمان و فرکانس، به‌درستی عمل نموده و سامانه‌ی شبیه‌سازی شده در عمل و در کانال‌های محوشدگی چندمسیره، عملکرد تقریباً منطبق بر مقادیر اشاره شده در مراجع معتبر علمی را دارا می‌باشد.

## ۷- نتیجه‌گیری

با توجه به قابلیت ضدتداخلی سامانه پرش فرکانسی به دلیل تغییرات سریع در کانال، شکل موجی مناسب از نظر پهنای باند و نرخ پرش در نظر گرفته شد و به تبع آن، ساختار فرستنده پرش فرکانسی به نحوی طراحی گردید که بیت‌های داده پس از عبور از کدکننده و

13. H. D. Chadwick and J. C. Springett, "The Design of a Low Data Rate MSFK Communication System," IEEE Transactions, December 1970.
14. STANAG 4285, "Characteristics of 1200/2400/3600 Bits Per Second Single Tone Modulators / Demodulators for HF Radio Links," NATO, 1989.
15. R. J. Sutton, "Secure Communications, Applications and Management," John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
16. X. Wang, P. Fan, and D. Peng, "On the orthogonality of signal tones in SFH/MFSK systems over multipath fading channels," IET 2nd International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks, ICWMMN 2008.
17. S. A. Hassan, "Pilot assisted SNR estimation in a non-coherent M-FSK receiver with a carrier frequency offset," IEEE International Communications Conference (ICC), 2012.
18. B. Wei, M. Y. Sharif, T. D. Binnie, and A. E. A. Almaini, "Adaptive PN Code Acquisition in Multi-Path Spread Spectrum Communications Using FPGA," School of Engineering & The Built Environment, Napier University, Edinburgh, United Kingdom, IEEE, 2007.
19. H. D. Chadwick, "Frequency tracking in an MFSK receiver," Jet Propulsion Lab, California Institute of Technology, Pasadena Space Programs Summary, June 1969.
20. Z. Z. Xiaomei, "An improved demodulation scheme for FH-MFSK underwater acoustic communications," May 2012.
21. H. Wang and S. John's, "M-FSK signal recognition in fading channels for cognitive radio," IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 2012.
- on Mobile Computing, Sept. 2016.
3. G. Bark, "Performance comparison of spread spectrum methods on an interference-limited HF channel," IEEE Proc.-Commun., Royal Institute of Technology, February 1999.
4. H. Olofsson, J. Naslund and J. Skold, "Interference Diversity Gain in Frequency Hopping GSM," IEEE, Ericsson Radio Systems, 1995.
5. G. Swart, A. J. Vinck, and H. Ferreira, "Convolutional Code Search for Good Permutation Trellis Codes using M-ary FSK," IEEE, 2007.
6. MIL-STD-188-110B, "Interoperability and Performance Standards for Data Modems," US Department of Defense, USA, 2000.
7. Y. Li, M. Feng, and W. Xie, "Frequency hopping synchronization strategy," 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), 2016.
8. M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, "Spread Spectrum Communications Handbook," McGraw-Hill, 2002.
9. D. Torrieri, "Principles of Spread-Spectrum Communication Systems," Springer Science, 2005.
10. J. G. Proakis and M. Salehi, "Digital Communication," McGraw-Hill 5th ed, 2008.
11. K. W. Cheun, "Performance of FHSS Multiple-Access Network Using MFSK Modulation," IEEE Transactions on Communications, vol. 44, no. 11, Nov. 1996.
12. M. B. Jorgenson and K. W. Moreland, "HF Serial-Tone Waveform Design," RTO IST Symposium on Tactical Mobile Communications, June 1999.

# Design, Simulation and Evaluation of One Anti-Jamm Frequency Hopping Communication System in Multi-Path Channels

M. Khodavirdizadeh, A. Amin\*

## Abstract

One of the main concerns in communication systems is transmission and data security which implies immunity against interferences and security against eavesdroppers. Nowadays, frequency hopping is considered as a powerful technique in communication systems for combating intentional and non-intentional interference which provide transmission security. Implementation of these systems in multipath communication channels along with low bit error rate is of most importance. In this paper, regarding to jamming effects on transmitted signals in multi path channels, a pair of receiver and transmitter of a frequency hopping communication system are designed for defeating interference and preserving synchronization. A survey on bit error rate of the transmitter and receiver pair in synchronization and operational modes is carried out via Simulating designed system and testing it in different channels including AWGN, Rayleigh fading and multipath channels. Bit error rate graphs of our design simulation shave less than 0.5 dB variation with the best existing results for same BER. As for good operation of time and frequency synchronization blocks, practical implementation of suggested frequency hopping system is justified for multipath channels.

**KeyWords:** *Frequency Hopping, Synchronization, Acquisition, Tracking, Multipath Channel*

---

\* Imam Hussein Comprehensive University (aamin@ihu.ac.ir)- Writer-in-Charge