وزارت علوم تحقیقات و فناوری
مؤسسه آموزش عالی جهاد

دانشکده برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات

مقایسه سیستم‌های چندحاملی بر مبنای بانک فیلتر با OFDM در مخابرات خطوط قدرت

آرمان فرهنگ

استاد راهنما

دکتر محمد مولوی کاخکی

به نام خدا

بر خود لازم می‌دانم که از استاد گرانقدر و بزرگوار، جناب دکتر محمد مولوی که با رهنمودهای ارزشمندشان نه تنها در طول انجام پایان نامه، بلکه در طول دوره مرا یاری نمودند قدردانی نمایم. همچنین از اساتید ارجمند، دکتر مسعود امینیان و دکتر غزاله سربیشه‌ای که زحمت داوری این پایان نامه را تقبل نموده‌اند، متشکرم. در ادامه از توجه، راهنمایی و تشویق دوست عزیز آقای دکتر حمید سعیدی سپاسگزاری می‌کنم.

تقدیم به :

خانواده عزیزم که در تمامی مراحل تحصیل، یار و همراهم بوده‌اند.

اختصارات

PLC	Power Line Communication
ISI	Intersymbol Interference
ICI	Intercarrier Interference
OFDM	Orthogonl Frequency Division Multiplex
CP	Cyclic Prefix
SMT	Staggered modulated multitone
WLAN	Wireless Local Area Network
DSL	Digital Subscriber Line
AM	Amplitude Modulation
CDMA	Code Division Multiple Access
FSK	Frequency Shift Keying
MAC	Medium Access Control
IFFT	Inverse Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
FEC	Forward Error Correction
ARQ	Automatic Repeat Request
PHY	Physical Layer
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CMT	Cosine modulated multitone
FMT	Filtered multitone
MCFB	Multicarrier Filter Bank
BLWGN	Band-Limited White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate

چکیده

در سال‌های اخیر، روش‌های مدولاسیون چندحاملی مهندسان و محققان را به بررسی این سیستم‌ها برانگیخته است. ایده اصلی در سیستم‌های چند حاملی، آن است که سمبل‌های ارسالی به صورت موازی بر روی زیرحامل‌های مختلف ارسال می‌گردند. سیستم‌های مخابراتی چندحاملی، در طیف وسیعی از کاربردها از جمله سیستم‌های مخابراتی WLAN[1]، PLC[2] و همچنین مودم‌های DSL [3] بطور معمول استفاده می‌شوند. روش‌های چندحاملی، در مقابل اثراتی همچون محو شدگی فرکانس‌گزین[4] و نویز نسبت به روش‌های تک‌حاملی[5] از مقاومت بالایی برخوردارند. OFDM[6]، یک روش مدولاسیون چند حاملی است که در بسیاری از سیستم‌های مخابراتی و استانداردها از جمله سیستم‌های مخابراتی PLC استفاده می‌شود. استفاده از روش‌های نوین چندحاملی مطرح شده بر مبنای بانک فیلتر، به دلیل داشتن مزایای قابل توجهی نسبت به OFDM در سیستم‌های مخابراتی با نرخ ارسال بسیار بالا، می‌توانند جایگزین مناسبی برای سیستم‌های OFDM باشند. مزیت اصلی این‌گونه سیستم‌ها مشخصه‌ی خوب فیلترهای شکل دهنده‌ی پالس در حوزه‌ی فرکانس می‌باشد که سبب بهبود عملکرد آن‌ها در حضور نویز باند باریک می‌شود. یکی دیگر از مزایای استفاده از روش‌های مدولاسیون چند حاملی بر مبنای بانک فیلتر که در واقع نتیجه‌ی مستقیم استفاده از مشخصه بسیار خوب فرکانس زیرحامل‌ها می‌باشد، آن است که در آن‌ها تداخل بین حاملی (ICI)[7] تنها به حامل‌های مجاور محدود می‌شود. به طور کلی، با توجه به اینکه در این‌گونه سیستم‌ها از CP [8] استفاده نمی‌شود، بهره‌ی عرض باند در مقایسه با OFDM بهبود می‌یابد.

[1]- Wireless Local Area Network
[2]- Power Line Communication
[3]- Digital Subscriber Line
[4]- Frequency selective fading
[5]- Single carrier
[6]- Orthogonal Frequency Division
[7]- Inter-Carrier Interference
[8]- Cyclic Prefix

در این پایان‌نامه، دو روش مدولاسیون چندحاملی OFDM و SMT[1] در کانال PLC بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در روش OFDM، استفاده از پنجره‌ی مربعی بعنوان فیلتر شکل دهنده‌ی پالس، بدلیل داشتن لوب‌های جانبی بزرگ سبب نشت سیگنال هر زیرحامل در زیرحامل‌های دیگر می‌شود. در مقابل، سیستم‌های SMT از فیلتر شکل‌دهنده‌ی پالس با مشخصه‌ی فرکانسی مناسب استفاده می‌کنند. افت باند توقف بسیار زیاد این فیلترها باعث می‌شود سیستم‌های SMT در مقابل تداخل باند باریک ایجاد شده توسط فرستنده‌های رادیویی AM[2]، مقاومت بالایی نسبت به سیستم‌های OFDM داشته باشند. بنابراین، خصوصیات برجسته‌ی سیستم‌های چند حاملی مبتنی بر بانک فیلتر، سبب شده اینگونه سیستم‌ها در کاربردهایی نظیر PLC جایگزین مناسبی برای سیستم‌های OFDM باشند.

[1]- Staggered modulated multitone
[2]- Amplitude Modulation

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

اختصارات ..... چهار

چکیده ..... پنج

فهرست مطالب ..... هفت

فصل اول: معرفی سیستمهای مخابراتی PLC ۱

1-1 چرا مخابرات بر روی خطوط انتقال قدرت؟ ۲

2-1 برخی از کاربردهای PLC ۳

3-1 کانال خط انتقال قدرت به عنوان محیط ارسال ٤

1-3-1 مشخصات نویز در کانال PLC 6

2-3-1 تضعیف سیگنال 8

3-3-1 انعکاس و محوشدگی چندمسیره 8

4-1 مخابرات در لایه‌ی فیزیکی PLC ۹

5-1 لایه MAC برای PLC ۱۲

6-1 تکنولوژی‌های مخابرات خطوط قدرت ۱٤

1-6-1 تکنولوژی PowerPacket 14

2-6-1 تکنولوژی Homeplug 17

1-2-6-1 استاندارد Home Plug 1.0 ..... ۱۸

2-2-6-1 استاندارد Home Plug AV ۱۹

3-2-6-1 عملکرد استاندارد Home Plug AV در مقایسه با Home Plug 1.0 ..... ۲۰

3-6-1 معرفی برخی استانداردهای دیگر 21

فصل دوم: مدل‌سازی کانال مخابراتی در سیستم‌های PLC ۲۲

1-2 خصوصیات کانال PLC ۲۳

2-2 مدل کانال PLC ۲۳

3-2 نویز در کانال PLC ۳۱

1-3-2 انواع نویز در سیستم‌های مخابراتی PLC 32

1-1-3-2 نویز رنگی پیش زمینه ۳۲

2-3-1-2 نویز باند باریک ۳۲
2-3-1-3 نویز ضربه‌ای پریودیک آسنکرون با فرکانس اصلی شبکه ۳۲
2-3-1-4 نویز ضربه‌ای پریودیک سنکرون با فرکانس اصلی شبکه ۳۳
2-3-1-5 نویز ضربه‌ای آسنکرون ۳۳
2-3-2 خصوصیات نویز پالسی 33

فصل سوم: سیستم های مخابراتی چندحاملی ۳۷

3-1 سیستم‌های مخابراتی چندحاملی ۳۷
3-2 سیستم OFDM ۳۹
3-3 سیستم SMT ٤۲
3-4 سیستم CMT ٥۰
3-5 سیستم FMT ٦۱
3-6 مقایسه سیستمهای مخابراتی چندحاملی بر مبنای بانک فیلتر ٦۱

فصل چهارم: شبیه‌سازی روش‌های مدولاسیون چندحاملی در کانال مخابراتی PLC ٦۳

4-1 مدل‌سازی کانال PLC ٦۳
4-1-1 مدل کانال 64
4-1-2 نویز پیش‌زمینه 65
4-1-3 نویز ضربه‌ای 65
4-1-4 نویز باند باریک 66
4-2 بررسی عملکرد سیستم‌های OFDM و SMT در کانال مخابراتی PLC ٦۷
4-2-1 بررسی عملکرد سیستم‌های OFDM و SMT در کانال AWGN 67
4-2-2 بررسی عملکرد سیستم‌های OFDM و SMT در کانال PLC درحضور نویز ضربه‌ای 69
4-2-3 بررسی عملکرد سیستم‌های OFDM و SMT در کانال PLC درحضور نویز باند باریک 69
4-2-4 بررسی عملکرد سیستم‌های OFDM و SMT در کانال PLC درحضور نویز باند باریک و نویز ضربه‌ای... 71

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۷۳

5-1 نتیجه‌گیری ۷۳
5-2 پیشنهادات ۷٥
مراجع 76

فصل اول
معرفی سیستمهای مخابراتی PLC

استفاده از خطوط قدرت برای انتقال داده تاریخچه‌ای طولانی دارد. در سال 1838 اولین دستگاه اندازه‌گیری از راه دور و در سال 1897 اولین اختراع در زمینه‌ی سیگنالینگ خط قدرت در انگلستان ارائه شد[27]. در سال 1905 برخی اختراعات در این زمینه در ایالات متحده ارائه گردید و در سال 1913 تولید تجاری اولین تکرار کننده‌ی اندازه‌گیری الکترومکانیکی انجام گردید. در حدود سال 1922 اولین سیستم‌های مخابراتی خطوط قدرت جهت استفاده در مسافت‌سنجی بر روی خطوط فشار قوی در محدوده‌ی فرکانسی 15 تا 500 کیلوهرتز شروع به کار کردند[34]. در اواخر دهه‌ی هشتاد از روشهای کدگذاری کنترل خطا در مودم‌های PLC استفاده شد. استانداردهای PLC طی سال‌های متمادی تکامل یافت تا نهایتا در سال 1994 امکان ارائه‌ی سرویس اینترنت بر روی این خطوط برقرار شد[28].

از اولین کاربردهای استفاده از خطوط قدرت جهت انتقال اطلاعات، حفاظت از قسمت‌های مختلف سیستم توزیع انرژی در هنگام بروز اشکال، می‌باشد. بنابراین حفاظت از خطوط انتقال قدرت همواره یکی از کاربردهای اصلی PLC می‌باشد. در این کاربرد، تبادل سریع اطلاعات بین نیروگاه‌ها، پست های برق و همچنین مراکز توزیع برای کاهش اثرات زیان آور، امری ضروری می‌باشد.

یکی از انگیزه‌های اولیه جهت استفاده از مخابرات خطوط قدرت مدیریت بار بوده است. یکی دیگر از عوامل محرک در استفاده از مخابرات خطوط قدرت خواندن اطلاعات کنتورها از راه دور توسط شرکتهای

تامین کننده‌ی انرژی می‌باشد. طبق یک مطالعه‌ی انجام شده در انگلستان دیده شده که یک واحد کنتور خوان به نرخ داده‌ی متوسط یک بیت در ثانیه دست می‌یابد. شرکت برق توکیو طبق یک سری آزمایشات انجام شده در دهه هفتاد، عملکرد دو طرفه موفق بین چند صد واحد کنتور خوان را گزارش نمود[34].

مخابرات بر روی خطوط قدرت با مخابرات بر روی سیم‌کشی‌های اختصاصی شبکه (برای مثال کابل‌های UTP، STP[1]، فیبر نوری و....) متفاوت است. ارسال اطلاعات بر روی خطوط قدرت کار ساده‌ای نیست زیرا با مسائلی از قبیل وجود نویزهای غیرقابل پیشبینی و تداخل ناشی از منابعی همچون لامپهای هالوژن، جاروبرقی‌ها، مخلوط‌کن‌های آشپزخانه، ماشین‌های لباسشویی اجاق‌های مایکروویو و.... روبرو هستیم. همچنین کانال PLC یک کانال قابل کنترل یا ثابت در طول زمان نمی‌باشد. در مقایسه با کابل‌های اترنت که داری خصوصیات پایدار و ثابت می‌باشند؛ خط قدرت به خاطر اینکه در طول زمان، دستگاه‌های متعددی به آن متصل می‌شوند و برای مدت زمان نامشخصی روشن می‌مانند یا خاموشند دارای خصوصیات پایدار و ثابت نمی‌باشد. به بیان دیگر با اتصال دستگاه‌های برقی خانگی به برق و روشن و خاموش کردن آنها خصوصیات کانال PLC بطور قابل توجهی تغییر می‌کند[30]. تلاش برای ارسال داده بر روی این کانال، با نرخ بالا از جمله عواملی است که شرکت‌های فعال در زمینه‌ی PLC را به رقابت برانگیخته است. در این فصل برخی از خصوصیات خطوط قدرت به عنوان کانال مخابراتی بررسی می‌شود.

1-1 چرا مخابرات بر روی خطوط انتقال قدرت؟

با توجه به اینکه انتقال اطلاعات بر روی خطوط قدرت برای مدت زمان زیادی است که انجام می‌شود ممکن است این سئوال در ذهن‌ها ایجاد شود که چرا امروزه مورد توجه بیشتری قرار گرفته است؟ سرعت مورد نیاز جهت ارسال اطلاعات برای حفاظت و تله‌متری حداکثر در حد چند کیلو بایت در ثانیه می‌باشد که با مگابایت در ثانیه یعنی سرعتی که برای ارسال مالتی‌مدیا لازم است قابل مقایسه نیست. پاسخ، وابسته به یک سری اتفاقات میباشد که در اواخر نیمه‌ی دوم دهه‌ی 90 به وقوع پیوسته‌اند. برجسته‌ترین آنها رشد بی‌نظیر اینترنت است. این رشد روزافزون در پرتو پیشرفت‌های تکنولوژیکی VLSI و همچنین پردازش سیگنال دیجیتال[2] (DSP) صورت گرفته‌است. در نهایت، بازار ناموزون مخابرات اول در امریکا و سپس در اروپا و آسیا از جمله عواملی هستند که موجب شده امروزه توجه بیشتری به PLC شود. وقایع ذکر شده، مخابرات بر روی

[1]- Shielded Twisted Pair
[2]- Digital Signal Processing

خطوط قدرت را به یک تکنولوژی ماندگار برای شبکه‌های خانگی پرسرعت و همچنین یک راه حل برای مسئله‌ی آخرین مایل تبدیل کرده‌اند.

توسعه‌ی شبکه‌ی داخلی خانه یا آخرین اینچ[1]، توسط شرکت‌های شبکه‌ی خانگی به فرم بی‌سیم و شبکه‌ی PLC به مرور به ایجاد یک شبکه گسترده می‌انجامد که بوسیله‌ی آن تعداد زیادی از وسایل الکترونیکی خانگی به یک شبکه‌ی داخلی در خانه متصل می‌شوند. این شبکه‌ی خانگی می‌تواند تمامی خروجی‌های برق را به اتصالات باند وسیع[2] برای کامپیوترهای شخصی، تلفن‌ها و وسایل جانبی آنها و همچنین دیگر وسایل الکترونیکی تبدیل نماید. از مزایای شبکه‌های PLC می‌توان به در دسترس بودن آن در همه جا –وجود تعدادی دو شاخه در هر اتاق که ظرفیت قابل توجهی را فراهم می‌آورد- و اینکه دیگر نیاز به سیم‌کشی مجدد ندارد اشاره نمود. برای دسترسی آخرین مایل، مخابرات بر روی خطوط تلفن یکی از تکنولوژی‌هایی است که علاوه بر مودم کابلی، انواع مختلف DSL یا xDSL و تکنولوژی بی‌سیم باند وسیع استفاده می‌شود. PLC، برتر از دیگر تکنولوژی‌ها نیست و همچنین تکنولوژی‌های دیگر نیز بدون مشکل یا برتر از PLC نیستند[29].

جذابیت اصلی PLC آن است که خطوط قدرت همه جا موجود و در دسترس می‌باشند. بنابراین وسیله‌ی خوبی برای ایجاد یک ارتباط باند وسیع در مناطق شهری یا مناطق دوردست که تلفن و ارتباطات کابلی وجود ندارد خواهد بود. با این همه، یک سری از مشکلات نیز وجود دارد.

2-1 برخی از کاربردهای PLC

از PLC جهت ارسال سیگنال‌های رادیویی بطور گسترده در آلمان، سوئیس، نروژ و برخی دیگر از کشورها استفاده می‌شود، بطوریکه یک برنامه‌ی رادیویی توسط مبدل‌های خاصی بر روی خط ارسال می‌شود. برای جلوگیری از انتشارهای ناخواسته، فیلترهایی برای فرکانس‌های حامل سیستم‌های PLC در تمامی ایستگاه‌های فرعی و انشعابات خط نصب می‌شود. کانال مخابراتی خط قدرت باند باریک، چالش‌های تکنیکی بسیاری را ایجاد می‌کند.

تکنولوژی PLC امکان ایجاد شبکه‌ی مخابراتی جهت ارسال داده، صوت، موزیک و سیگنال‌های ویدئویی را بر روی خطوط قدرت DC داخلی وسایل نقلیه فراهم می‌سازد. تکنیک‌های پیشرفته‌ی مخابرات دیجیتالی جهت غلبه بر اثرات نامطلوب این محیط خشن و نویزی، بر روی یک ابزار سیلیکنی بسیار کوچک قابل

---

[1]- Last-inch

[2]- Broad band

پیاده‌سازی است. کاربردهای PLC در صنعت اتومبیل عبارتند از مکاترونیک (برای مثال کنترل درجه حرارت محیط، دستگاه‌های امنیتی اتومبیل و آشکارسازهای مانع)، پردازش خودکار اطلاعات و مالتی‌مدیا.

می‌توان از این تکنولوژی به عنوان جزئی از سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم استفاده نمود بطور مثال، جهت اتصال نقاط دسترسی Wi-Fi[1] یا پایگاه‌های تلفن‌های سلولی به قطب‌های خدماتی[2] می‌توان از تکنولوژی PLC استفاده نمود. در آینده‌ای نه چندان دور از مخابرات خطوط قدرت در شبکه‌های WiMax[3] نیز استفاده خواهد شد. از جمله کاربردهای دیگر PLC در تشخیص استفاده‌ی غیر قانونی از انرژی الکتریکی و همچنین اندازه‌گیری کیفیت توان می‌باشد.

با استفاده از یک مکانیسم جدید انتشار موج سطحی که E-Line نام دارد. در فرکانس‌های مایکروویو می‌توان توسط تنها یک خط قدرت تک فاز به سرعت‌های انتقال داده‌ی بسیار بالاتری دست یافت. اینگونه سیستم‌ها دارای پتانسیل بالایی می‌باشند به گونه‌ای که توسط آنها می‌توان به مخابره‌ی متقارن و دو طرفه با نرخ ارسال داده‌ای بیش از 1 Gbit/s دست یافت[34].

3-1 کانال خط انتقال قدرت به عنوان محیط ارسال

در ابتدا لازم به ذکر است که خط قدرت برای انتقال اطلاعات طراحی نشده است و یک محیط خشن برای ارسال اطلاعات می‌باشد. امپدانس متغیر، نویز قابل توجهی که ذاتا سفید نیست و همچنین سطوح بالای تضعیف وابسته به فرکانس از جمله دلایل اصلی ایجاد چنین محیط خشنی جهت ارسال داده می‌باشند.

کانال، بین هر دو خروجی در خانه دارای یک تابع تبدیل بسیار پیچیده می‌باشد. بر روی یک چنین محیط ارسالی، پاسخ دامنه و فار ممکن است با فرکانس تغییرات وسیعی پیدا کند. همانطوری که ممکن است سیگنال در برخی از فرکانس‌ها با تضعیف بسیار کمی وارد گیرنده شود، بر روی بعضی فرکانس‌های دیگر ممکن است کاملا غیرقابل بازیابی باشد. بدتر از همه اینکه تابع تبدیل کانال خودش با زمان متغیر است و این به دلیل خاموش یا روشن کردن دستگاه‌ها یا وارد شبکه کردن آنها می باشد که سبب تغییر توپولوژی شبکه می‌شود.

محل گیرنده یا فرستنده که در اینجا خروجی برق می‌باشد بر روی نرخ خطای ارسال تاثیر جدی می‌گذارد. برای مثال، در حالتی که گیرنده نزدیک به یک منبع نویز باشد دارای نسبت سیگنال به نویز کمی در مقایسه با گیرنده‌ی دور از منبع نویز خواهد بود. منابع نویز میتوانند لوازم خانگی باشند که در شبکه قرار گرفته‌اند.

---

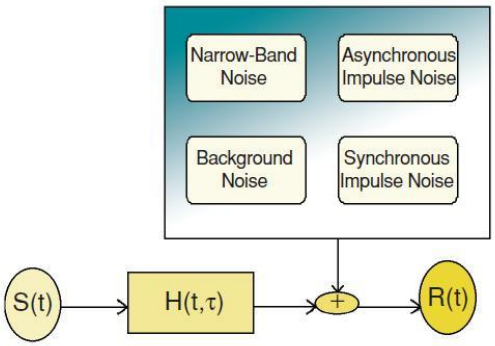
[1]- Wireless Fidelity

[2]- utility poles

[3]- World Interoperability for Microwave Access Forum

انتشار سیگنال بین گیرنده و فرستنده در امتداد یک مسیر مستقیم صورت نمی‌گیرد. نتیجتا اکو نیز بایستی در نظر گرفته شود. این اکو به خاطر وجود تعدادی مسیر انتشار بین فرستنده وگیرنده بوجود می‌آید. انعکاس سیگنال اغلب بخاطر عدم تطبیق امپدانس در شبکه‌ی الکتریکی اتفاق می‌افتد. هر کدام از مسیرها دارای یک فاکتور وزن‌دهی می‌باشد که برای نشان دادن افت‌های ارسال و انعکاس به آن نسبت داده می‌شود. تمامی پارامترهای انتقال و انعکاس در یک کانال PLC کوچکتر از یک در نظر گرفته می‌شوند. تعداد چند مسیره‌های[1] غالب که بایستی در نظر گرفته شوند (N) اغلب بیش از پنج یا شش مسیر نمی‌باشد زیرا چند مسیره‌های اضافی معمولا بسیار ضعیف هستند و دارای اثر قابل توجهی نمی‌باشند، بنابراین قابل صرف نظراند.

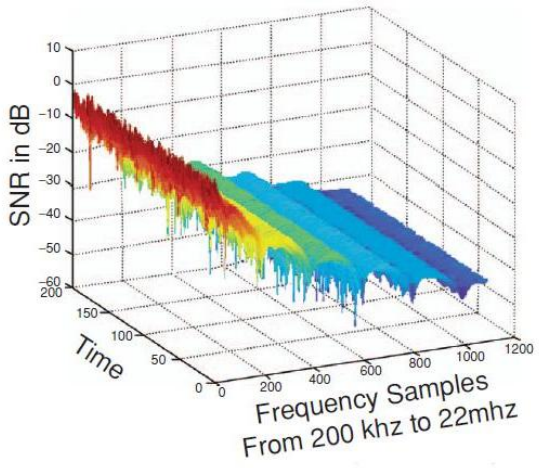
با استفاده از اندازه‌گیری‌های کانال، دیده شده‌است که در فرکانسهای بالاتر تضعیف کانال افزایش می‌یابد. بنابراین، کانال را بصورت تصادفی و متغیر با زمان با نسبت سیگنال به نویز وابسته به فرکانس بر روی پهنای‌باند عبور می‌توان در نظر گرفت. شکل 1-1 مدل عمومی کانال برای لایه فیزیکی خط قدرت را نشان می‌دهد.



شکل 1-1- مدل عمومی کانال PLC [29]

در شکل 1-2، مدل عمومی کانال در رنج فرکانسی200 کیلوهرتز تا 22 مگاهرتز نشان داده شده است[29]. کانال، سطح بالایی از تضعیف را با افزایش فرکانس از خود نشان می‌دهد.

[1]- Multi-path



شکل 1-2- مدل کانال در رنج فرکانسی200 کیلوهرتز تا 22 مگاهرتز [29]

1-3-1 مشخصات نویز در کانال PLC

نویز در خطوط قدرت یک مشکل مهم جهت انتقال داده می‌باشد. این بدان دلیل است که نویز در شبکه‌ی PLC به ندرت خواصی شبیه به نویز سفید گوسی از خود نشان می‌دهد، بنابراین در گیرنده به سادگی قابل آنالیز نیست. منابع نویز در اینگونه سیستمها عبارتند از: لامپهای هالوژن، فلورسنت، منابع تغذیه سوئیچینگ، موتورها و سوئیچ‌های دیمر[1]. نویز در خطوط انتقال قدرت می‌تواند نویزضربه ای[2]، فرکانس‌گزین[3] و یا ترکیبی از هر دو باشد.

مطالعات بسیاری بر روی خواص نویز در خطوط قدرت انجام شده است. در تحقیقات اخیر نه تنها نوع نویز بررسی شده است بلکه توزیع دامنه و زمان بین ورود نویز ضربه‌ای که در خطوط برق وجود دارد نیز مورد بحث قرار گرفته است. بدلیل تضعیف زیاد موجود در خطوط قدرت، میزان نویز نیز وابسته به محل قرارگیری گیرنده خواهد بود.

بنابراین نویز موجود در خطوط انتقال قدرت را می‌توان به چهار دسته طبقه‌بندی نمود[29] که عبارتند از:

1- نویز رنگی: این نوع از نویز دارای چگالی طیف توان به نسبت ضعیفی می‌باشد که با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. می‌توان این نویز را مجموع تمام منابع نویز توان پائین و احتمالا متغیر با زمان دانست.

---

[1]- Dimmer
[2]- Impulsive noise
[3]- Frequency selective

2- نویز پیش زمینه باند باریک[1]: این نویز اساسا ناشی از سیگنالهای سینوسی مدوله شده با مدولاسیون دامنه می‌باشد. بنابراین، این نوع از تداخل ناشی از مراکز ارسال در محیط و همچنین باندهای موج کوتاه می‌باشد. سطح تداخل در زمان های متفاوت روز، متغیر است.

3- نویز ضربه‌ای سنکرون با فرکانس برق شهر[2]: این نوع نویز ضربه‌ای معمولا در ضرایبی از فرکانس تغذیه یعنی 50 یا 60 هرتز تکرار می‌شود و دارای طول کوتاهی در حدود چند میکروثانیه است. چگالی طیف توان آن با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. از جمله منابع اصلی این نویز دستگاه‌های سوئیچینگ (برای مثال منابع تغذیه و یکسوسازهای کنترل شده‌ی سیلیکنی SCR[3] که بیشتر در دایمرهای نوری به فرم ترایاک یافت می شوند) می‌باشند. از آنجایی که این دستگاه‌ها در هر سیکل فرکانسی سیستم قدرت چندین بار سوئیچ می‌کنند (نوعا یک یا دوبار)، نویزی در هارمونیک‌های بالاتر از فرکانس سیستم قدرت ایجاد می‌کنند. بطور مثال دستگاه های فتوکپی نویزهای ضربه ای بسیار قوی در دو برابر فرکانس سیستم قدرت ایجاد می‌نمایند.

4- نویز ضربه‌ای آسنکرون با فرکانس برق شهر: این نوع از نویز، دارای خطوط طیفی در فرکانس‌های ناهمبسته با فرکانس برق شهر می‌باشد و مضرترین نویز در انتقال داده می‌باشد. طول آن از چند میکروثانیه تا چند میلی ثانیه متغیر است و دارای زمان ورود میانی تصادفی می‌باشد. چگالی طیف توان یک چنین نویز ضربه‌ایی ممکن است 50 دسی بل بالاتر از طیف نویز پیش زمینه باشد. بنابراین، در انتقال با نرخ بالای داده در فرکانس‌های مشخص می‌تواند به کلی بلوک‌های سمبل‌های داده را محو کند. علاوه بر لامپ‌های فلورسنت که یکی از منابع تولیدکننده‌ی این نوع نویز هستند، گیرنده‌های تلویزیونی به عنوان مهمترین منبع تولید کننده این نویز شناخته می‌شوند که مولفه‌های فرکانسی در ضرایب فرکانس اسکنینگ افقی تلویزیون ایجاد می‌کنند (15734 هرتز برای استاندارد NTSC[4] در امریکا و 15625 هرتز برای استاندارد PAL که در اکثر کشورهای اروپایی استفاده می‌شود).

در مراجع [29] و [28] یک سری پیشنهادات جهت مینیمم‌سازی اثر انواع مختلف نویز که در بالا ذکر شده است ارائه گردیده که به شرح زیر بیان می‌شوند:

- با استفاده از ترکیب کدهای تصحیح خطای جلوسو (FEC) و درون‌گذاری
- در زمان مدولاسیون سیگنال بایستی به فرکانس‌های تلویزیونی و هارمونیک‌های آنها توجه نمود.

---

[1]- Narrowband background noise

[2]- Impulse noise synchronous with the generator's actual supply frequency

[3]- Silicon – Controlled Rectifier

[4]- National Television Standards Committee

- با استفاده از برخی روش‌های چندگانگی فرکانسی (برای مثال، پرش فرکانسی) و ترکیب آنها با FEC می‌توان بر نویز موجود در برخی فرکانس‌های ناشناخته فائق آمد.

1-3-2 تضعیف سیگنال

تضعیف سیگنال در شبکه‌های با ولتاژ پائین بالغ بر 100 دسی‌بل در هر کیلومتر و برای شبکه‌های با ولتاژ متوسط حدود 10 دسی‌بل در هر کیلومتر می‌باشد[28].

به دلیل وجود تضعیف زیاد در شبکه‌های با ولتاژ پائین، استفاده از تکرار کننده‌ها در فواصل کمتر از یک کیلومتر ضروری است. برخی از فاکتورهایی که سبب تضعیف یا افت سیگنال می‌شوند به شرح زیرند:

- **وابستگی زمانی**: مقدار تضعیف سیگنال در زمان‌های مختلف (روز و شب) متفاوت است.
- **وابستگی فرکانسی**: در فرکانس‌های بالای 100 کیلوهرتز، با افزایش افت به اندازه‌ی 0.25 دسی‌بل در هر هرتز رو به رو هستیم[28]. به دلیل وجود اثرات خط انتقال دریک کابل بلند " با طول بیش از 400 متر" افت سیگنال، درفرکانس‌های خاص به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. بطورکلی با افزایش فرکانس، مقدار افت سیگنال بیشتر می‌شود. دامنه‌ی پاسخ فرکانسی کانال، هموار نیست وعلاوه بر کاهش دامنه با افزایش فرکانس، تنزل شدیدی دردامنه‌ی پاسخ فرکانسی کانال دربانده‌ای فرکانسی خاص روی می‌دهد. بنابراین، کانال PLC یک کانال فرکانس‌گزین می‌باشد.
- **وابستگی به فاصله** : درکاربردهای عملی تضعیف 100 دسی‌بل در هر کیلومتر درنظر گرفته می‌شود.

1-3-3 انعکاس و محوشدگی چندمسیره

در اینجا نیز همانند یک کانال بی‌سیم انتشار سیگنال بین فرستنده و گیرنده درامتداد یک مسیر مستقیم و واحد صورت نمی گیرد، بنابراین بایستی اکوهایی را نیز درنظر بگیریم. این اکوها از آنجا ناشی می‌شوند که تعدادی مسیر انتشار بین فرستنده و گیرنده وجود دارد. انعکاس سیگنال اغلب به دلیل عدم انطباق امپدانس در شبکه قدرت بوجود می‌آید. تعداد چند مسیره‌های غالب اکثرا بین پنج تا شش مسیر می‌باشد و سایر چند مسیره‌های موجود آنقدر ضعیف هستند که قابل چشم‌پوشی خواهند بود.

4-1 مخابرات در لایه‌ی فیزیکی PLC

تکنیک‌های مدولاسیون همانند FSK[1]، CDMA[2] و OFDM به عنوان روش‌های مدولاسیون مناسب برای PLC مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای کاربردهای کم هزینه و با نرخ ارسال داده‌ی پائین نظیر حفاظت از خطوط برق و تله متری، FSK یک روش مناسب می‌باشد. برای نرخ داده تا یک مگابیت در ثانیه، CDMA یک تکنیک مناسب می‌باشد. برای نرخ ارسال داده‌ی بالاتر، OFDM یک تکنولوژی توانا است.

محوشدگی فرکانس گزین که در کانال PLC وجود دارد، باعث می‌شود ظرفیت FSK برای نرخ داده‌ی بالاتر از چند کیلو بایت در ثانیه، خراب شود. در چنین شرایطی کدینگ کنترل خطا در سطوح بالایی مورد نیاز است. بنابراین با توجه به راندمان طیفی کم FSK، نرخ ارسال داده در آن محدود می‌شود.

در CDMA، سیگنال هر کاربر با استفاده از یک کد گسترده‌شونده[3] در فرستنده گسترده می‌شود. در گیرنده، با استفاده از یک کد مشابه، با انجام عکس عملیات گسترده‌سازی[4] سیگنال قابل بازیابی است. CDMA، در مقابل نویز باند باریک و دیگر اشکال نویز مقاوم است. بنابراین، این روش یک کاندیدای مناسب جهت کاربرد در PLC می‌باشد. در سیستم‌هایی که بر پایه‌ی CDMA کار می‌کنند، بهره‌ی محاسباتی بایستی بالا باشد تا در مقابل نویز باند باریک و اختلال ایجاد شده توسط دیگر کاربران مقاوم باشد. با بهره‌ی محاسباتی پائین، مقاومت در مقابل تداخل و نویز از بین می‌رود و کیفیت سیگنال ممکن است برای تمام کاربران خراب شود. بهره‌ی محاسباتی یک سیستم CDMA با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود[28]:

$$P_G = \frac{B_t}{B_d} \qquad (1\text{-}1)$$

که در آن B_t نشان دهنده‌ی پهنای باند ارسال و B_d نشان دهنده‌ی پهنای باند داده می‌باشد. به وضوح پیدا است که برای نرخ بیت‌های بالا و برای یک P_G بالا، پهنای باند ارسال بایستی بسیار بالا باشد. مشکل در همین جا است. طیف فرکانسی دارای شکاف که به دلیل محوشدگی فرکانس گزین ایجاد می‌شود امکان ارسال باندهای بزرگ و پیوسته برای انتقال داده را فراهم نمی‌آورد. بنابراین، روش CDMA برای کاربرد در PLC مناسب نمی‌باشد.

از آنجایی که زمان سمبل به طور معکوس با نرخ داده متناسب است، با افزایش نرخ داده مدت زمان سمبل کاهش می‌یابد. زمانی که داده را بر روی خطوط انتقال قدرت در نرخ بالا ارسال می‌کنیم، مدت زمان سمبل

---

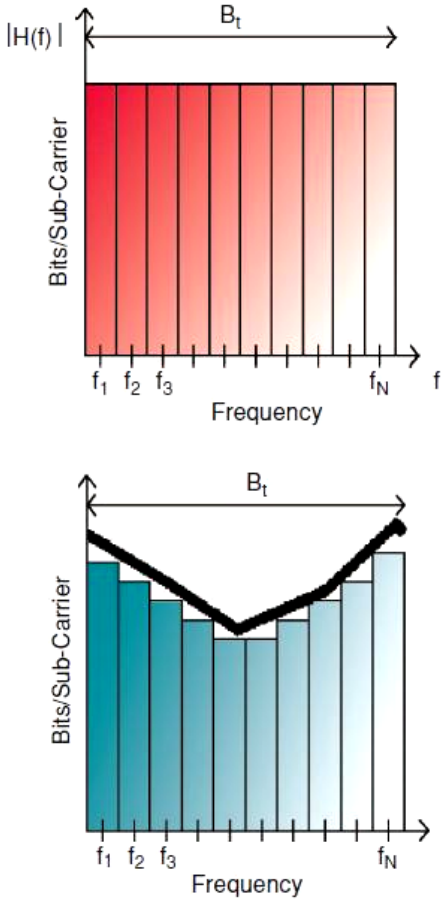
[1]- Frequency Shift Keying
[2]- Code Division Multiple Access
[3]- Spreading Code
[4]- de-spreading

بسیار کوچک است بطوریکه تاخیر یافته‌های یک سمبل –به دلیل چند مسیره بودن– آلوده به تعداد زیادی از سمبل‌های دیگر می‌شود. در نتیجه پروسه‌ی آشکارسازی، پیچیده می‌شود و به تکنیک‌های پیچیده‌ی ترازگری برای حذف ISI نیاز است. علیرغم ترازگری در گیرنده، هنوز نرخ خطای بیت ممکن است بطور غیر قابل قبولی برای نرخ بیت‌های بالا، بر روی کانال‌های چند مسیره با شرایط خشن زیاد باشد.

در روش OFDM، داده بصورت سریال در یک کانال از یک مبدل سریال به موازی عبور می کند. با این کار، داده به تعدادی از کانال‌های موازی شکسته می‌شود. داده در هر کانال، به یک مدولاتور وارد می‌شود بطوریکه برای N کانال، N تا مدولاتور با فرکانس های حامل $f_0/f_1/\ldots/f_{N-1}$ وجود دارد. به هر یک از این N تا حامل، یک زیرحامل[1] گفته می‌شود. این بدان دلیل است که مدولاسیون با یک کریر را به مدولاسیون با چند کریر شکسته‌ایم. این کار فواید متنوعی برای ما فراهم می‌آورد.

در روش OFDM، از آنجایی که اطلاعات را به N تا زیر حامل شکسته‌ایم، هر زیر حامل، $\frac{1}{N}$ نرخ داده اصلی را حمل می‌نماید. به گفته‌ی دیگر طول سمبل برای هر زیر حامل N برابر افزایش می‌یابد. بعلاوه، قسمتی از انتهای یک سمبل به ابتدای آن ضمیمه می‌شود به گونه‌ای که یک پیشوند چرخه‌ای تشکیل می‌دهد. طول پیشوند چرخه‌ای، طولانی‌تر از طولانی‌ترین مسیر تاخیر در نظر گرفته می‌شود. با این کار مشکل ISI تا حد زیادی حل می‌شود. نتیجتا، یک ترازگر ساده‌ی خطی برای حذف ISI کافی است. یکی دیگر از فواید مهم OFDM، در زمان انتقال داده بر روی یک کانال با فیدینگ انتخاب کننده‌ی فرکانس، آن است که به ما اجازه می‌دهد که از روش‌های وفقی برای جلوگیری از ارسال داده در فرکانس‌های با فیدینگ بالا استفاده نمائیم. زیر حامل‌هایی که در آنها نسبت سیگنال به نویز از یک سطح آستانه خاص کوچکتر شود ارسال نمی‌شوند. زیر حامل‌ها با SNR بالا، بیت‌های بیشتری را حمل می‌کنند؛ بنابراین آنها با یک چیدمان دارای سطوح بالاتر مدوله می‌شوند. این روش، بارگذاری بیت[2] نام دارد و در شکل 1-3 نشان داده شده‌است. کاربرد OFDM با بارگذاری بیت برای کانال‌های سیمی مثل PLC با عنوان DMT یا Discrete Multi – tone شناخته می‌شود[29].

[1]- Subcarrier
[2]- Bit loading



شکل 1-3- بارگذاری بیت [29]

تخمین کانال برای عملکرد صحیح بارگذاری بیت، امری لازم و ضروری است. فرستنده بایستی واریانس نویز و همچنین تضعیف هر زیرحامل را بداند. سیستم‌های فرستنده گیرنده‌ی DMT برای تخمین کانال از سیگنال‌های پایلوت استفاده می‌نمایند. برای کانالهای متغیر با زمان مثل PLC، سیگنال پایلوت برای تخمین پویای کانال، بصورت پریودیک تکرار می‌شود. بطور کلی، الگوریتم‌های بارگذاری بیت را می‌توان بصورت الگوریتم‌های وفقی حاشیه‌ای[1] یا با نرخ وفقی[2] طبقه‌بندی نمود.

در الگوریتم‌های وفقی حاشیه‌ای، هدف مینیمم‌سازی نرخ خطای بیت به ازای یک نرخ ارسال داده‌ی ثابت می‌باشد. برای الگوریتم‌های نرخی وفقی، نرخ داده را به ازای یک نرخ خطای ثابت، ماکسیمم می‌نمائیم. در استانداردهای PLC از الگوریتم‌های با نرخ وفقی استفاده می‌شود. این بدان دلیل است که کانال خط قدرت

[1]- margin-adaptive
[2]- rate-adaptive