

تخمین بهینه کانال انتقال قدرت براساس تئوری یادگیری بیزین در حضور نویز ضربه‌ای

محمد اسدپور^۱، استادیار؛ بهزاد مظفری تازه کند^۲، دانشیار؛ میرهادی سیدعربی^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران - M_Asadpour@tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران - Mozaffary@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - Seyedarabi@tabrizu.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر ارسال اطلاعات مخابراتی سرعت بالا از طریق کانال انتقال قدرت (Power Line Communication) بیش‌تر مورد توجه محققین در عرصه مخابرات قرار گرفته‌است. در این مقاله یک الگوریتم مناسب برای تخمین کانال PLC با استفاده از مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی متعامد (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ارائه شده‌است. کانال PLC با ویژگی‌های فیدینگ چندمسیره و فرکانس‌گزین تحت‌تأثیر نویزهای ضربه‌ای بوده و این عوامل باعث افزایش خطا در تخمین کانال می‌شوند. در این مقاله، یک روش مناسب برای تخمین کانال براساس تئوری بیزین ارائه می‌شود. یک هسته جدید مقاوم در مقابل اثرات چندمسیره و نویزهای ضربه‌ای با پیچیدگی محاسباتی کمتر در ماشین بردار رابط (Relevance Vector Machine) برای تخمین پاسخ ضربه کانال PLC پیشنهاد می‌شود. انتخاب مقادیر مناسب پارامترهای مهم این هسته جدید پیشنهادی در مدل ماشین بردار رابط، خطاهای بی‌تی و متوسط مجذور را به‌شدت کاهش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که عمل‌کرد روش پیشنهادی نسبت به روش‌های ارائه‌شده از جمله روش Huang براساس پارامترهای مختلف ارزیابی، بهبود بیش‌تری یافته‌است.

واژه‌های کلیدی: PLC، نویز ضربه‌ای، OFDM، هسته، چندمسیره، RVM.

Optimal Estimation of Power Line Communication Channel Based on Bayesian learning Theory in the Presence of Impulsive Noise

Mohammad Asadpour¹, Assistant Professor; Behzad Mozaffary Tazehkand², Associate Professor; Mir Hadi Seyedarabi³, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: M_Asadpour@tabrizu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: Mozaffary@tabrizu.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: Seyedarabi@tabrizu.ac.ir

Abstract: Power line communication (PLC) channel as a medium for high speed data communication transmission based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is considered. It is an environment with frequency selective and multipath fading features which has been contaminated by impulsive noise. These deficiencies in power line communications degrade the accuracy of channel estimation. In this article, an efficient channel estimation method based on Bayesian inference is presented. A new proposed kernel function with proper hyper-parameters in relevance vector machine (RVM) is used to estimate the PLC channel impulse response. It is shown that bit error rate (BER) and mean square error (MSE) in proposed method, are significantly decreased. Proposed channel estimation algorithm achieves good results respected to reported approaches as Huang channel estimation method.

Keywords: PLC, impulsive noise, OFDM, kernel, multipath, RVM.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۱ و ۱۳۹۶/۱۲/۲۴ و ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۳

نام نویسنده مسئول: محمد اسدپور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در [۳۱] از ساختار شبکه عصبی MLP برای تخمین کانال استفاده کرده‌است. روش سنجش فشرده^۱ در سیستم OFDM کد شده با نرخ ۱/۲ برای تخمین کانال ارائه شده‌است [۳۲]. در [۳۳] یک روش مبتنی بر تابع هزینه هاببر^۲ برای تخمین کانال PLC پیشنهاد شده‌است. روش ماشین بردار پشتیبان^۳ در [۳۴] برای تخمین کانال مبتنی بر OFDM استفاده شده‌است که به علت پیچیدگی محاسباتی خیلی بالا برای سیستم‌های عملی مناسب نمی‌باشد. در [۳۵] یک روش بهبودیافته برای تخمین کانال در سیستم‌های مخابراتی چندحاملی ارائه شده‌است که در آن از یک هسته مرکزی به صورت یک تابع گوسی براساس یادگیری بیزین اسپارس در ماشین بردار رابط استفاده شده‌است. نویز موردنظر نویز سفید گوسی جمع‌شونده^۴ و کلیه سیگنال‌ها حقیقی فرض شده‌اند.

ما در این مقاله ماشین بردار رابط معمولی با هسته گوسی را از شکل سیگنال‌های حقیقی به سیگنال‌های واقعی مختلط با عنوان ماشین بردار رابط مختلط توسعه داده و سپس با معرفی یک تابع هسته جدید که با پاسخ ضربه کانال PLC بیش‌ترین تطابق را دارد، آن را بهینه خواهیم کرد. در نهایت برای تخمین دقیق‌تر کانال PLC در حضور نویزهای زمینه و ضربه‌ای، پارامترهای دخالت‌کننده در الگوریتم ارائه‌شده با عنوان هایپرپارامترها را براساس معیار MMSE بهبود خواهیم داد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که عمل کرد روش پیشنهادی نسبت به تخمین‌گرهای موجود اخیر مانند روش هوانگ که از استحکام بالاتری در مقابل نویز ضربه‌ای برخوردار است، خیلی مناسب‌تر است. در ادامه ساختار مقاله به این صورت می‌باشد که در بخش ۲ مواد و روش‌ها در قالب معرفی سیستم OFDM، مدل کانال PLC و نویز، تخمین کانال و روش‌های هوانگ و ماشین بردار رابط معمولی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۳، جزئیات روش پیشنهادی توضیح داده می‌شود. بخش ۴ به نتایج شبیه‌سازی مربوط بوده و در نهایت در بخش ۵، نتایج مهم به دست آمده از این مقاله ارائه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش سیستم OFDM به همراه مدل کانال PLC و نویز موجود در آن بررسی و چند روش تخمین کانال برای مقایسه با روش پیشنهادی مقاله معرفی خواهند شد.

۲-۱- سیستم OFDM

همان‌طوری که قبلاً اشاره شد، کانال‌های PLC به دلیل بارها و انشعابات مختلف متصل شده به شبکه مشابه کانال‌های بی‌سیم، به عنوان یک محیط چندمسیره دارای فیدینگ شناخته می‌شوند که سیگنال‌های تأخیریافته با سیگنال اصلی تداخل کرده و باعث اعوجاج تداخل بین علامت می‌شوند و این عمل کرد سیستم را مختل می‌کند. OFDM در اکثر کاربردهای مخابراتی مانند [ADSL^۵، ۳۶]، تکنولوژی WIMAX و شبکه‌های مخابراتی سرعت بالا [۳۷] مورد استفاده قرار گرفته و با انتقال موازی داده‌های باند وسیع از طریق زیرکانال‌های متعامد باند باریک، اثرات چندمسیره را کاهش می‌دهد. برای از بین بردن ISI آنتی‌از باند محافظ^۶ یا همان پیشوند چرخه‌ای^۴ استفاده می‌شود. به عبارت دیگر OFDM در مقابل فیدینگ چندمسیره مقاوم بوده، راندمان طیفی بالایی داشته و پیچیدگی

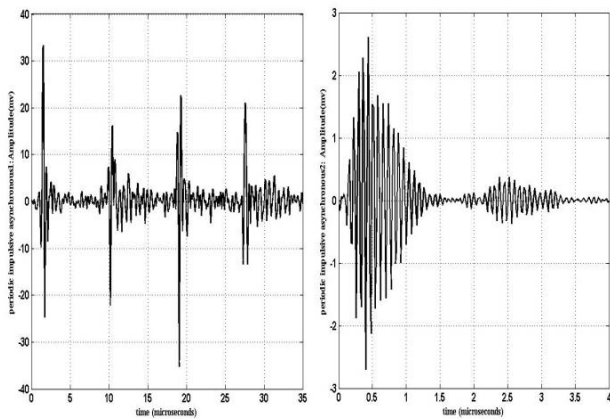
کانال PLC به عنوان رسانه انتقال داده‌ها بر روی سیستم‌های قدرت معرفی شده‌است. از آنجاکه خطوط انتقال قدرت همیشه در هر نقطه قابل دسترس است، برای پیاده‌سازی یک سیستم کامل مخابراتی بر روی این خطوط نیازی به سیم‌کشی مجدد و نصب تجهیزات مخابراتی نبوده و این‌ها از مهم‌ترین دلایل استفاده از PLC می‌باشند. کاربردهای اولیه PLC به نظارت بر تغییرات ولتاژ و قرائت کنتور از راه دور مربوط می‌شود [۱]. امروزه خطوط انتقال قدرت به عنوان رسانه‌های انتقال برای ارسال داده، صوت و تصویر نقش مهمی را در سرویس‌های باند وسیع [۲-۴] و شبکه‌های هوشمند [۵، ۶] بازی می‌کنند. اعوجاج ناشی از تلفات وابسته به فرکانس در کابل، انتشار چندمسیره سیگنال به دلیل عدم تطبیق امپدانس و نویزهای مختلف موجود در این خطوط، مخابرات باند وسیع را در قالب سیستم‌های PLC باند وسیع به شدت دچار مشکل می‌کند. مشخصات نویزهای موجود در شبکه‌های انتقال قدرت در [۷، ۸] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تغییرات تصادفی کانال انتقال به دلیل تغییر بار، تعداد انشعابات و طول کابل نیز در [۹، ۱۰] به طور کامل تحلیل شده‌اند. کانال PLC یک کانال فرکانس‌گزین تغییرپذیر با زمانی است که تحت تأثیر انواع مختلف نویزها قرار گرفته‌است و به شکل ساده قابل مدل‌سازی نیست [۱۱، ۱۲]. تابع انتقال چنین کانالی به توپولوژی متغیر شبکه ناشی از قطع و وصل ادوات الکتریکی وابسته بوده و تعداد انعکاسات بین فرستنده و گیرنده به وسیله تعداد انشعابات تشکیل‌دهنده توپولوژی شبکه تعیین می‌شود. در نتیجه شبکه‌های انتقال قدرت به صورت یک محیط انتشار چندمسیره توصیف می‌شوند که برای غلبه بر اثرات فیدینگ چندمسیره و هم‌چنین نویزها، از تکنیک چندحاملی مرسوم به نام تکنیک مالتی پلکس تقسیم فرکانسی متعامد استفاده می‌شود که علاوه بر حل مشکل فرکانس‌گزینی این کانال‌ها، انتقال داده‌های سرعت بالا را نیز میسر می‌سازد [۱۳، ۱۴]. OFDM با انعطاف‌پذیری خیلی بالا، امکان تغییر کدینگ، مرتبه و نوع مدولاسیون و همچنین تخصیص توان را برای هر زیرحامل به صورت مجزا فراهم می‌کند [۱۵]. گوناوان و همکارانش در [۱۶]، عملکرد OFDM را در سیستم‌های PLC تجزیه و تحلیل کرده‌اند. در OFDM، دانستن وضعیت کانال^۱ خیلی حائز اهمیت است که این کار توسط الگوریتم‌های تخمین کانال در گیرنده براساس موقعیت پایلوت‌ها انجام می‌گیرد. الگوریتم‌هایی مانند: حداقل خطای متوسط مجذور [۱۷] و حداکثر تشابه [۱۸] تخمین‌گرهای متداولی هستند که تابع خطای حداقل مربعات^۲ را کمینه می‌کنند و وقتی توزیع نویز غیر گوسی باشد، نتایج مناسبی را به همراه ندارند [۱۹]. به منظور بهبود عمل کرد تخمین کانال PLC در حضور نویز ضربه‌ای، الگوریتم‌های مناسب‌تر و مقاوم‌تر مورد نیاز است [۲۰-۲۵]. در [۲۶]، با استفاده از روش مبتنی بر مرتبه ماتریس‌ها، پارامترهای کد کانولوشنال در شرایط نویزی تخمین زده شده‌است. یک روش تخمین کانال مبتنی بر پایلوت نوع شانه‌ای برای سیستم‌های PLC در [۲۷] ارائه شده‌است. در [۲۸]، یک الگوریتم تخمین کانال زمان گسترده برای کانال PLC ولتاژ پائین پیشنهاد شده‌است. چن و همکارانش از یک روش درون‌یابی در حوزه قطبی به جای قسمت‌های حقیقی و موهومی در روش‌های معمول، برای تخمین کانال استفاده کرده‌اند [۲۹]. آن‌ها برای شبیه‌سازی از مدل‌های کانال پیشنهادی OPERA^۱ استفاده کرده‌اند. تکنیک همزمان‌سازی برای تخمین کانال در [۳۰] مورد استفاده قرار گرفته‌است. دوری

پارامترهای مسیر شامل: τ_i ، d_i ، g_i با استفاده از پاسخ ضربه‌ی کانال به دست می‌آیند. سرعت انتشار V_p در دومین تابع نمایی که بیان گر مدل اکو می‌باشد، به سرعت نور c_0 و ثابت دی‌الکتریک ماده عایق کابل وابسته بوده و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$v_p = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

۲-۳- مدل نویز در کانال‌های PLC

نویز در کانال برق برخلاف کانال‌های مخابراتی دیگر از مدل نویز جمع‌شونده گوسی سفید تبعیت نمی‌کند. تداخل ناشی از نویز رنگی باند وسیع، تداخل باند باریک و انواع مختلف نویزهای ضربه‌ای در PLC از عوامل مختلفی مانند: منابع تغذیه سوئیچینگ، حالت‌های گذرای شبکه برق و تداخل حاصل از ایستگاه‌های پخش رادیویی ناشی شده‌ودر قالب پنج گروه نویز رنگیزمینه، نویز باندباریک، نویز ضربه‌ای پریودیک سنکرون و آسنکرون با فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز و نویز ضربه‌ایغیرپریودیکآسنکرون دسته‌بندیشده‌اند [۷، ۴۱]. سه دسته اول نویزها به مدت زمان طولانی ایستاد بوده و به‌عنوان نویز زمینه در نظر گرفته‌می‌شوند. دو دسته آخر دارای مشخصات متغیر با زمان چند میکرو تا چند میلی‌ثانیه بوده و باعث افزایش قابل‌ملاحظه چگالی طیفنویز می‌شوند. شکل نویزهای ضربه‌ای اغلب شبیه مجموعه‌ای از سیگنال‌های سینوسی میراشونده می‌باشد که دو نوع مختلف عملی آن در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

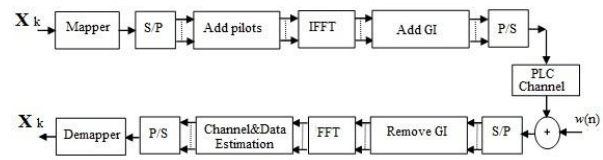


شکل ۳: دو نوع مختلف نویز ضربه‌ای

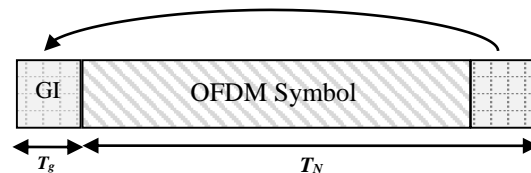
۲-۴- تخمین کانال

کانال PLC به‌عنوان یک محیط پراغتشاش تحت تأثیر نویز گوسی زمینه و نویزهای ضربه‌ای بوده و تشخیص غیردقیق موقعیت این نویزهای ضربه‌ای تخمین کانال را مختل و نیاز به روش‌های تخمین مناسب‌تر را ضروری می‌سازد. تخمین کانال در سیستم‌های OFDM عموماً در حوزه فرکانس انجام می‌گیرد. در این روش‌ها از داده‌های آموزشی به‌صورت پایلوت برای نمونه‌برداری از تابع

محاسباتی پایینی دارد [۳۸]. بلوک دیاگرام OFDM باند پایه در شکل ۱ نشان داده شده‌است که در آن سیگنال ورودی بعد از تبدیل به داده‌های موازی و اضافه‌شدن پایلوت به‌منظور تخمین کانال، از طبقه مبدل فوریه معکوس به‌همراه افزوده‌شدن باند محافظ دوباره به داده‌های سریال تبدیل شده تا به کانال PLC وارد شود. در گیرنده نیز عمل برعکس برای آشکارسازی اطلاعات ارسالی انجام می‌گیرد. شکل ۲ نیز نحوه افزودن GI برای غلبه بر ISI را در هر سمبل OFDM نشان می‌دهد که در آن T_g و T_N به ترتیب بیان گر طول باند محافظ و طول سمبل OFDM می‌باشند.



شکل ۱: بلوک دیاگرام OFDM در باند پایه



شکل ۲: سمبل OFDM بعد از افزودن GI

۲-۲- مدل کانال PLC

سیگنال‌ها در سیستم PLC علاوه بر انتشار در مسیر مستقیم بین فرستنده و گیرنده به‌عنوان مسیر اصلی، در انشعابات دیگر اتصالی به سیستم نیز منتشر و باعث ایجاد سیگنال‌های برگشتی به‌صورت اکو شده که اعوجاج چندمسیره را سبب می‌شوند. در نتیجه کانال PLC به‌صورت یک مدل فرکانس‌گزینه چندمسیره در نظر گرفته می‌شود که توسط فیلیپس [۳۹] و زیرمن [۴۰] ارائه شده‌اند. در این مقاله از مدل زیرمربرای توصیف کانال PLC به‌صورت جمع آثار N مسیر مختلف با وزن‌های d_i و α_i برای هر مسیر i -ام استفاده شده‌است. تمامی ضرایب انعکاس و انتقال g_i کمتر یا مساوی یک بوده و تضعیف کابل‌ها توسط پارامترهای α_0 ، α_1 ، k قابل تعریف است. در نهایت مدل چندمسیره کانال PLC به‌وسیله معادله ۱ تعریف می‌شود:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{(1)} \cdot \underbrace{e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot f^k) \cdot d_i}}_{(2)} \cdot \underbrace{e^{-j2\pi f (d_i / v_p)}}_{(3)} \quad (1)$$

این معادله، بیان گر مدل پارامتری پاسخ فرکانسی مختلط کانال PLC است که در آن، هر جمله از N جمله پاسخ فرکانسی در رابطه بالا، متناظر با یکی از N مسیر مختلف این مدل بوده و از سه عبارت تشکیل شده‌است. عبارت اول پارامتر وزن، عبارت نمایی اول متناظر با تضعیف وابسته به فرکانس و عبارت نمایی دوم متناظر با تأخیر هر مسیر می‌باشند. پارامترهای تضعیف شامل α_0 ، α_1 ، k از اندازه‌گیری دامنه‌ی پاسخ فرکانسی مختلط کانال و

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{k \in K_p} X_p(k) \left(\sum_{m=0}^{L-1} h(m) e^{-j \frac{2\pi}{N} km} \right) e^{j \frac{2\pi}{N} kn} + z_n \quad (6)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{k \in K_p} X_p(k) e^{j \frac{2\pi}{N} kn} \left(\sum_{m=0}^{L-1} h(m) e^{-j \frac{2\pi}{N} km} \right) + z_n$$

شکل ماتریسی معادله فوق به صورت زیر نوشته می شود:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{h} + \mathbf{Z} \quad (7)$$

که در آن، $\mathbf{Z} = [z_0, z_1, \dots, z_{N-1}]^T$ ، $\mathbf{Y} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T$ یک ماتریس $N \times L$ با درایه های زیر می باشد:

$$[B]_{n,m} = \frac{1}{N} \sum_{k \in K_p} X_p(k) e^{j \frac{2\pi}{N} k(n-m)} \quad (8)$$

$$0 \leq m \leq L-1, \quad 0 \leq n \leq N-1$$

به دلیل وجود نویز ضربه ای در جمله z_n ، روش LS برای تخمین کانال PLC نتیجه مناسبی را به همراه ندارد. در [۱۹]، یک تابع هزینه جدید به شکل زیر تعریف شده است:

$$J(\rho) = \sum_{n=0}^{N-1} \rho(z_n) \quad (9)$$

که در آن، $\rho(\cdot)$ یک تابع هزینه غیرخطی برای کاهش اثرات نویز ضربه ای است. با قراردادن رابطه ۷ در معادله ۹ و کمینه کردن تابع هزینه نسبت به 'h' با استفاده از $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{h}} = 0$ ، معادله ماتریسی زیر به دست می آید [۳۳]:

$$\hat{\mathbf{h}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{Y} \quad (10)$$

که در آن، $\mathbf{Q} = \text{diag}(q(z_0), q(z_1), \dots, q(z_{N-1}))$ و $q(z)$ به شکل زیر تعریف می شود:

$$q(z) = \begin{cases} 1 & |z| \leq \beta \\ \beta \text{sgn}(z) / z & |z| \geq \beta \end{cases} \quad (11)$$

در این معادله، β حد آستانه نام داشته و از رابطه $\beta = \varepsilon \times M(Z_n)$ به دست می آید که در آن M بیانگر میانه و ε به صورت دستی قابل تنظیم است. به دلیل نامشخص بودن ماتریس Q در معادله ۱۰، این تخمین گر در طی چهار مرحله زیر بهبود می یابد:

1- تخمین اولیه 'h' با استفاده از روش LS به صورت:

$$\tilde{\mathbf{h}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}$$

2- محاسبه Z با قراردادن تخمین اولیه در معادله ۷ به طوری که:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Y} - \mathbf{B}\tilde{\mathbf{h}}$$

3- محاسبه ماتریس Q با استفاده از مرحله قبل

4- محاسبه تخمین نهایی کانال در حوزه زمان با استفاده از

معادله ۱۰

انتقال کانال استفاده می شود. کانال های PLC به دلیل وجود فیدینگ سریعشان معمولاً از تخمین کانال های مبتنی بر پایلوت نوع شانه ای استفاده می کنند که در آن پایلوتها در زیر حامل های خاص OFDM وارد شده و از درون یابی برای تخمین ضرایب کانال در موقعیت های غیر پایلوت زیر حامل ها استفاده می شود. الگوریتم حداقل مربعات ساده ترین روش تخمین کانال می باشد که معمولاً توسط نویز AWGN و تداخل بین حامل ها کارایی آن کاهش می یابد. کانال تخمینی در این روش به طور خیلی ساده به شکل زیر نوشته می شود [۴۲]:

$$\mathbf{H}^{LS} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{N-1} \\ x_0 & x_1 & \dots & x_{N-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن، x_k و y_k به ترتیب داده های ارسالی و دریافتی مربوط به زیر حامل های سمبل m-k OFDM می باشند. یک روش تخمین مبتنی بر تبدیل فوریه سریع معکوس و با عمل کرد نسبتاً مناسب در [۴۳] ارائه شده است.

در [۴۴]، از یک روش وقفی مقاوم و مبتنی بر روش حداقل مربعات برای تخمین کانال PLC استفاده شده است که تأکید بیش تر بر روی تخمین پارامتری نویز ضربه ای بر اساس مدل آماری میدلتن کلاس A می باشد. هائو و همکارانش در [۴۵]، از مفاهیم یادگیری عمیق (Deep Learning) برای تخمین کانال و آشکارسازی سیگنال در سیستم های OFDM بهره برده اند به طوری که اعوجاج سیگنال با یادگیری عمیق تشخیص داده شده و سپس سمبل های ارسالی آشکار می شوند.

۱-۴-۲- مروری بر روش هوانگ (Huang)

سیگنال دریافتی در گیرنده در سیستم های چندحاملی به صورت زیر می تواند بیان شود [۳۳]:

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{k \in K_p} X_p(k) H(k) e^{j \frac{2\pi}{N} kn} + z_n \quad (4)$$

که در آن، z_n شامل نویز پس ماند e_n و اثرات سمبل های داده های نامشخص (غیر پایلوت) بوده و به شکل زیر تعریف می شود:

$$z_n = \frac{1}{N} \sum_{k \notin K_p} X_s(k) H(k) e^{j \frac{2\pi}{N} kn} + e_n \quad (5)$$

که در آن، $X_s(k)$ و $H(k)$ در این دو معادله به ترتیب سمبل های پایلوت، داده و تابع مشخصه کانال می باشند. همان طوری که در معادله ۵ ملاحظه می شود سمبل های غیر پایلوت دریافتی در گیرنده نیز به عنوان نویز تلقی می شوند. با فرض $h(n)$ به عنوان پاسخ ضربه کانال، معادله ۴ به صورت زیر در می آید:

۲-۴-۲ روش RVM

نظریه بیزین برای مدل سازی روش ماشین بردار رابط (RVM) به عنوان یک مدل خطی می تواند استفاده شود. توزیع اسپارس وزن هادر مدل رگرسیون بیزین با استفاده از تابع هسته مناسب به اسپارس بودن منجر می شود. براساس تئوری یادگیری احتمال بیزین، مدل های دقیق تخمین با توابع پایه کمتر نسبت به روش ماشین بردار پشتیبان قابل دستیابی است [۴۶]. تخمین های مبتنی بر احتمال، تخمینا توماتیک پارامترهای نویزی و سهولت استفاده از هر تابع پایه از دیگر مزایای روش RVM محسوب می شوند. تخمین های مبتنی بر RVM معمولاً براساس یک تابع تعریف شده در فضای ورودی به نام $f(x)$ مدل سازی می شوند [۴۶]. این تابع با ترکیب خطی M تابع پایه به صورت $\phi(x) = (\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_M(x))$ به عنوان هسته، به شکل زیر به دست می آید:

$$f(x; w) = \sum_{i=1}^M w_i \phi_i(x) = w^T \phi(x) \quad (12)$$

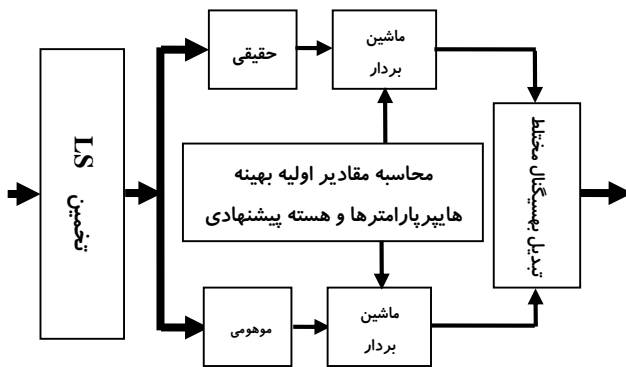
که در آن، بردار $w = (w_1, w_2, \dots, w_M)^T$ باید تخمین زده شود. در این روش، یادگیری مدل کلی ارائه شده توسط معادله ۱۲ براساس مدل احتمال بیزین انجام می شود.

وقتی داده ها افزایش می یابد پیچیدگی روش RVM در مرحله آموزش به خاطر محاسبه تکراری ماتریس هسین و معکوس آن از مرتبه $O(N^3)$ نیز افزایش پیدا می کند ولی به دلیل تنک بودن بردار رابط حاصل، باز هم روش مناسب تری از نظر پیچیدگی و دقت به شمار می رود [۴۷]. استفاده از روش مبتنی بر بیت های بررسی توازن برای تخمین پارامترهای کد BCH با نری در شرایط نویزی هم یک روش مناسب در حوزه تخمین به شمار می رود [۴۸]. در این روش، تخمین پارامترها بر مبنای آزمایش تعداد معدودی از کدهای BCH انجام می شود. برای هر کدام از این کدها، بیت های بررسی توازن مجدداً توسط بیت های پیام تولید شده و با بیت های بررسی توازن کلمه کد دریافتی مقایسه می شوند.

۳- مدل پیشنهادی

برای تخمین کانال PLC در این مقاله از روش RVM استفاده شده است که در آن یک تابع هسته ارائه شده جدید، نقش اصلی را در به دست آوردن نتایج بهتر بازی می کند. تحقیقات اخیر در زمینه تخمین کانال مبتنی بر RVM نشان می دهند که این روش فقط برای داده های ورودی حقیقی و با هسته گوسی اعمال شده است. در این مقاله، نخست سیگنال های مختلط دریافتی در گیرنده به عنوان سمبل های OFDM در تخمین پاسخ ضربه کانال مورد استفاده قرار خواهند گرفت. سپس هسته جدید با پارامترهای بهینه شده که بیشترین تطابق را با پاسخ ضربه کانال PLC دارد، معرفی خواهد شد. هدف از ارائه روش پیشنهادی، بالابردن دقت محاسباتی تخمین با معرفی هسته جدید منطبق با پاسخ ضربه کانال PLC، کاهش پیچیدگی محاسباتی برای استفاده از مدل ارائه شده در سیستم های واقعی و بلا درنگ با بهره جستن از ویژگی های تنک موجود در ماشین بردار رابط می باشد. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل ۴

نشان داده شده است. در ابتدا، تخمین اولیه کانال به وسیله تخمین گرهای معمول مانند LS، با استفاده از داده های آموزشی پایلوت در سمبل OFDM انجام می گیرد. به طور هم زمان با اعمال RVM بر روی قسمت های حقیقی و موهومی داده های دریافتی در گیرنده، مقادیر اولیه بهینه برای پارامترهای ضروری جهت یادگیری الگوریتم مبتنی بر RVM محاسبه می شوند.



شکل ۴: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

در انتهای تخمین، دو قسمت پاسخ ضربه تخمین زده شده برای تشکیل پاسخ ضربه کامل با هم ترکیب می شوند. در روش ارائه شده، از یک رشته شبه تصادفی در قالب پایلوت به صورت: $X_p(n)$ با $|X_p(n)|=k$ به ازاء $n = 0, \dots, N-1$ استفاده می شود که در آن k دامنه قابل تنظیم پایلوتها در موقعیت زیر حاملها بوده و توسط آن می توان سیگنال به نویز محلی و در نتیجه توان ارسالی را کنترل کرد. سمبل های پایلوت در گیرنده از رابطه زیر تبعیت می کنند:

$$R_p = X_p H_p + N_p \quad (13)$$

که در آن R_p سیگنال پایلوت دریافتی در گیرنده، X_p ماتریس قطری مربوط به پایلوت های ارسالی و H_p و N_p به ترتیب بیان گر نویز جمع شونده شامل نویزهای گوسی و ضربه ای و پاسخ فرکانسی کانال در موقعیت پایلوتها هستند. هدف اصلی، تخمین پاسخ فرکانسی کانال در هر دو موقعیت پایلوت و داده (غیر پایلوت) می باشد. تخمین اولیه کانال با استفاده از معادله ۱۳، به صورت زیر به دست می آید [۳۵]:

$$\tilde{H}_p = X_p^H R_p = X_p^H X_p H_p + X_p^H N_p = k H_p + N_p' \quad (14)$$

نماد $(.)^H$ ، بیانگر تقارن هرمیتین بوده و در صورتی که کانال عاری از نویز باشد، \tilde{H}_p پاسخ فرکانسی واقعی کانال خواهد بود. در عمل، \tilde{H}_p بیان گر کانالی است که تحت تأثیر نویزهای جمع شونده N_p' قرار دارد. تخمین اولیه LS چنین کانالی از رابطه زیر حاصل می شود:

$$H_{LS} = \frac{1}{k} X_p^H R_p = \frac{1}{k} \tilde{H}_p \quad (15)$$

ضروری است. علاوه بر تطابق خیلی مناسب هسته پیشنهادی با پاسخ ضربه کانال، پیچیدگی محاسباتی آن نیز نسبت به هسته‌های معمول استفاده شده مثل هسته گوسی به شدت پایین می‌باشد. با اعمال این مدل به تخمین اولیه کانال در رابطه ۱۶، دسته‌بندی جدید به شکل زیر در می‌آید:

$$\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{f} + \mathbf{e} = \boldsymbol{\phi}\mathbf{w} + \mathbf{e} \quad (20)$$

در این رابطه، $\mathbf{f} = [f_0, f_1, \dots, f_N]^T$ تابع تقریب کانال و $\mathbf{e} = [e_0, e_1, \dots, e_N]^T$ بردار خطا در مدل رگرسیون می‌باشند. با فرض گوسی بودن متغیرهای تصادفی مستقل از هم خطاها با متوسط صفر و واریانس σ^2 توزیع زیر حاصل می‌شود:

$$p(\mathbf{e}) = \prod_{i=1}^N N(e_i | 0, \sigma^2) \quad (21)$$

با استفاده از توزیع پیشین گوسی بر روی بردار وزن \mathbf{w} و اصل بی‌بیزین، معادله فوق برحسب پارامترهای مستقل برای هر وزن به شکل زیر نوشته می‌شود [۴۶، ۴۹]:

$$p(\mathbf{w}, \boldsymbol{\alpha}) = \prod_{i=1}^N N(w_i | 0, \alpha_i^{-1}) \quad (22)$$

تابع پسین بر روی وزن‌ها براساس قانون بی‌بیزین از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$p(\mathbf{w} | \tilde{\mathbf{h}}, \boldsymbol{\alpha}, \sigma^2) = N(\mathbf{w} | \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (23)$$

که در آن:

$$\boldsymbol{\Sigma} = (\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{B} \boldsymbol{\phi} + \mathbf{A})^{-1}, \quad \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{\phi}^T \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{h}} \quad (24)$$

در این معادله، $\mathbf{B} = \sigma^2 \mathbf{I}_N$ و $\mathbf{A} = \text{diag}(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_N)$ ماتریس یکانی $N \times N$ می‌باشند. با ترکیب وزن‌ها، حداکثر تشابه به ازاء $\boldsymbol{\alpha}, \sigma^2$ به دست می‌آید:

$$p(\tilde{\mathbf{h}} | \boldsymbol{\alpha}, \sigma^2) = N(\tilde{\mathbf{h}} | \mathbf{0}, (\mathbf{B}^{-1} + \boldsymbol{\phi} \mathbf{A}^{-1} \boldsymbol{\phi}^T)) \quad (25)$$

تخمین حاصل از رگرسیون با رابطه $\mathbf{h}_{RVM} = \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\mu}$ بیان می‌شود که $\boldsymbol{\alpha}$ و σ^2 با عنوان هایپر پارامترها با بیشینه کردن احتمال شرطی $p(\boldsymbol{\alpha}, \sigma^2 | \tilde{\mathbf{h}})$ محاسبه می‌شوند. بیشینه کردن معادله ۲۵ نسبت به پارامترهای $\boldsymbol{\alpha}$ و σ^2 منجر به نتایج زیر می‌شود [۵۰]:

$$\alpha_i^{new} = \frac{\gamma_i}{\mu_i^2} \quad (26)$$

$$\sigma_{new}^2 = \frac{\|\mathbf{t} - \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\mu}\|^2}{V - \sum \gamma_i} \quad (27)$$

که در این معادلات، μ_i متوسط پسین \mathbf{i} -امین وزن در معادله ۲۴ و $\gamma_i = 1 - \alpha_i \sum_{ii}$ می‌باشند. \sum_{ii} \mathbf{i} -امین درایه قطری ماتریس کواریانس $\boldsymbol{\Sigma}$ براساس مقادیر جاری پارامترهای $\boldsymbol{\alpha}$ و σ می‌باشد. مقادیر اولیه این پارامترها در سرعت همگرایی فرآیند یادگیری در الگوریتم ارائه شده خیلی مهم است. در این مقاله، محاسبه مقادیر بهینه این پارامترها براساس معیار MMSE صورت گرفته است. بدین ترتیب،

با اعمال تبدیل فوریه معکوس به معادله ۱۴، پاسخ ضربه کانال در حوزه زمان به صورت معادله ۱۶ به دست می‌آید.

$$\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{k}\mathbf{h} + \mathbf{n}' \quad (16)$$

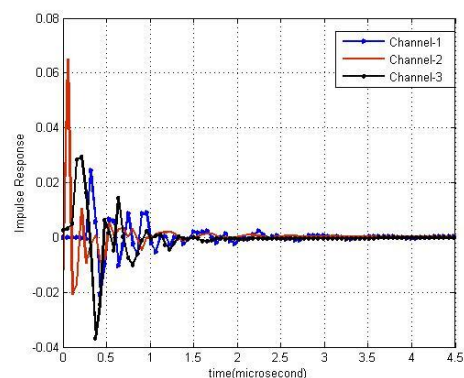
که در آن $\tilde{\mathbf{h}} = [\tilde{h}_0, \tilde{h}_1, \dots, \tilde{h}_{N-1}]^T$ بردار مشاهدات در حوزه زمان، $\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_r, 0, \dots, 0]^T$ پاسخ ضربه واقعی کانال و $\mathbf{n}' = [n'_0, n'_1, \dots, n'_{N-1}]^T$ بردار نویز با واریانس σ'^2 می‌باشد. اعمال روش RVM در این مرحله با استفاده از مدل اسپارس رگرسیون بی‌بیزین منجر به کاهش نویز و تخمین \mathbf{h} براساس مشاهدات $\tilde{\mathbf{h}}$ خواهد شد. به این ترتیب که با صفر کردن تعدادی از وزن‌های رگرسیون این مدل، تطابق نویز با $\tilde{\mathbf{h}}$ از بین می‌رود. تخمین کانال براساس معادله ۱۲، توسط تابع \mathbf{f} که ترکیب خطی از توابع هسته می‌باشد، مطابق معادله ۱۷ انجام می‌گیرد.

$$\mathbf{f}(n) = \sum_i w_i \varphi(n-i) \quad (17)$$

این معادله در واقع کانولوشن بردار وزن مدل رگرسیون و تابع هسته می‌باشد. شکل ماتریسی این معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$\mathbf{f} = \boldsymbol{\phi}\mathbf{w} \quad (18)$$

که در آن $\phi_{ij} = \varphi(i-j)$ درایه (i,j) -ام ماتریس هسته 7×7 و \mathbf{w} بردار ستونی وزن‌ها می‌باشد. انتخاب هسته مناسب با ویژگی‌های بیشترین تشابه با مشخصات کانال PLC جهت تطابق بیشتر در مدل ارائه شده و همچنین کاهش پیچیدگی آن، از چالش‌های اساسی این مقاله به شمار می‌روند که نیاز به دانش بیشتر در مورد کانال مذکور دارد. تعدادی از پاسخ ضربه‌های کانال براساس مدل Zimmermann در شکل ۵ رسم شده‌اند.



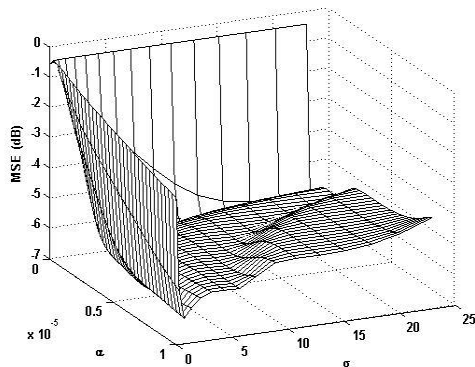
شکل ۵: سه نوع مختلف کانال PLC

در روش پیشنهادی، مناسب‌ترین تابع پایه به عنوان هسته که بیشترین تطابق را با مدل‌های مختلف کانال PLC دارد، به شکل زیر تعریف می‌شود:

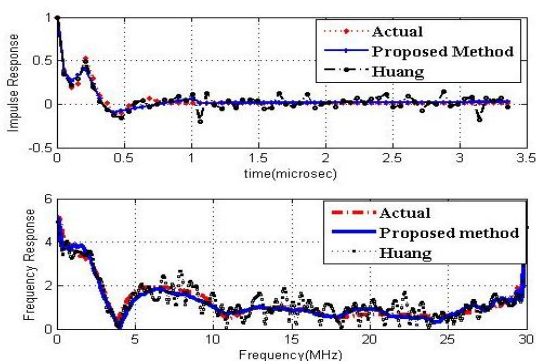
$$\phi(n) = A \times \left| n + \frac{v}{4} \right| \quad (19)$$

که در آن، A دامنه هسته پیشنهادی و شیف v به اندازه GI تعریف شده در سمبل OFDM می‌باشد که این تطابق بیشتر در مرحله یادگیری

بوده و مقادیر اولیه بهینه برای این پارامترها $\alpha_i = 8 \times 10^{-7}$ و $\alpha_i = 0.35$ به دست آمده است. در مرحله دوم، تأثیر پارامترهای هسته پیشنهادی در کیفیت تخمین کانال PLC مورد بررسی قرار می‌گیرد. بعد از تعیین مقادیر بهینه پارامترهای کلیدی الگوریتم ارائه شده، تخمین کانال در دو حوزه زمان و فرکانس به‌ازاء ۴٪ تأثیر نویز ضربه‌ای و $SNR=0$ دسی‌بل انجام و نتایج حاصله به‌همراه پاسخ واقعی و روش هوانگ جهت مقایسه در شکل ۷ ترسیم شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده، نزدیکی پاسخ کانال تخمینی در روش ارائه شده را با پاسخ واقعی کانال و اختلاف فاحش آن را با روش هوانگ نشان می‌دهد. به‌منظور ارزیابی بیش‌تر دقت روش پیشنهادی، منحنی‌های MSE و BER در شکل‌های ۸ و ۹ رسم شده‌اند. تغییرات SNIR در این دو منحنی بین 0.5 - دسی‌بل و 17 دسی‌بل و مدولاسیون استفاده شده از نوع BPSK می‌باشد. بهبود حدود ۵ دسی‌بل در روش ارائه شده نسبت به روش هوانگ در منحنی MSE مشاهده می‌شود. منحنی BER نیز بهبود این روش را تأیید می‌نماید.



شکل ۶: منحنی MSE نسبت به هایپر پارامترهای α و σ



شکل ۷: پاسخ کانال PLC به‌ازاء $SNR=0$ dB و نویز ضربه‌ای ۴٪

دامنه پایلوت نقش مهمی را در مدیریت سیگنال به نویزهای محلی و تخمین کانال بازی می‌کند. در این مقاله، منحنی‌های MSE از این منظر نیز با هم مقایسه شده‌اند. شکل ۱۰، تغییرات MSE را به‌ازاء دو مقدار مختلف دامنه پایلوت (۱ و ۰/۵) در حضور نویزهای ضربه‌ای و زمینه AWGN به‌همراه نتایج هوانگ نشان می‌دهد.

الگوریتم ارائه شده با تکرار مراحل زیر به تخمین نهایی کانال PLC منجر می‌شود:

- 1- محاسبه ماتریس کواریانس Σ
- 2- تعیین میانگین μ
- 3- به‌روزرسانی پارامترهای α و σ
- 4- محاسبه پاسخ ضربه کانال تخمینی به صورت:
$$h_{estimated} = \phi \mu$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی عمل‌کرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها براساس پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ و در محیط متلب انجام می‌گیرد. در ضمن برای بررسی تأثیر سیگنال به نویز از پارامترهای SNR و SNIR به‌صورت زیر استفاده شده است:

$$SNR = \frac{P_s}{P_N} \quad (28)$$

که در آن P_s و P_N به ترتیب متناظر با توان‌های سیگنال ارسالی و نویز AWGN می‌باشند و:

$$SNIR = \frac{P_s}{(1-p)P_N + p.P_I} \quad (29)$$

در این رابطه، P_I توان نویز ضربه‌ای و p ضریب تأثیرگذاری آن می‌باشد که به نوعی درصد حضور نویزهای ضربه‌ای و AWGN را کنترل می‌کند.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

parameter	Value
Number of subcarriers,	64, 128, 360, 3072
FFT size, N	256, 512, 4096
Pilot spacing	2-18
Pilot amplitude	1, 0.5
Size of Cyclic Prefix	64, 512
Baseband modulation	BPSK, 16 QAM
Channel type	PLC(AWGN + Impulsive)

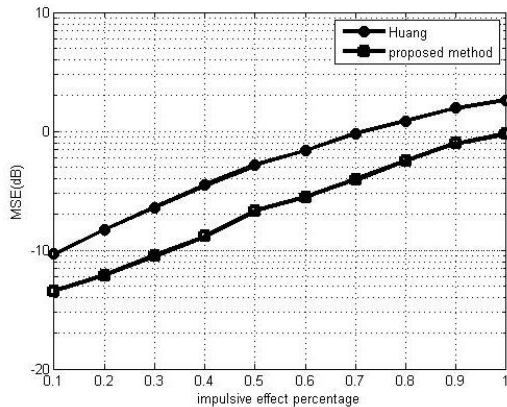
در تمامی شبیه‌سازی‌ها از مدل چندمسیره Zimmermann براساس معادله ۱ و مطابق با پارامترهای جدول ۲ استفاده شده است.

جدول ۲: پارامترهای مدل ۴ مسیره کانال PLC

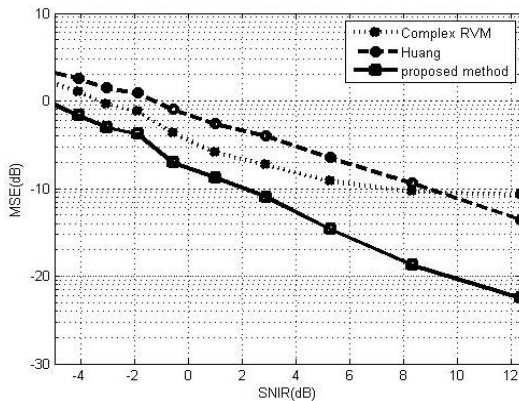
Attenuation Parameters		
K=1	$a_0=0$	$a_1=7.8 \times 10^{-10}$ s/m
Path parameters		
i	g_i	d_i/m
1	0.64	200
2	0.38	222.4
3	-0.15	244.8
4	0.05	267.5

شکل ۶ منحنی ۳ بعدی MSE را نسبت به مقادیر اولیه مختلف هایپر پارامترهای α و σ نشان می‌دهد که دارای حداقل دو کمینه محلی

۱۹۰۱ استفاده و منحنی‌های مربوط به روش پیشنهادی، هوانگ و RVM مختلط پیشنهادی با هسته گوسی در کنارهم در شکل ۱۲ ترسیم شده‌اند.



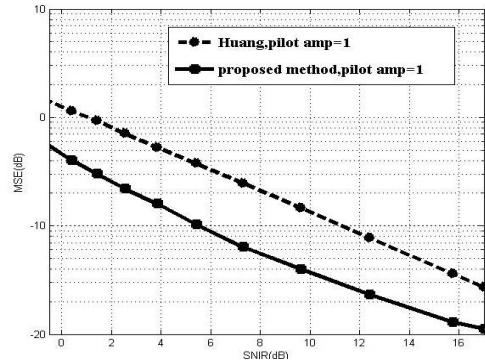
شکل ۱۰: تغییرات MSE نسبت به اثر نویز ضربه‌ای به‌ازاء: مدولاسیون BPSK، $N_c=۶۴$ ، $N=۲۵۶$ و $CP=۶۴$ ، $pilot_space=۴$



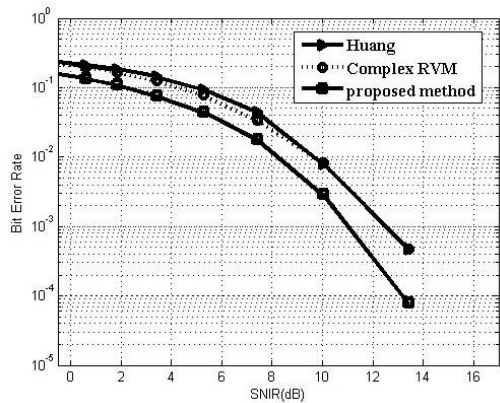
شکل ۱۱: منحنی MSE به‌ازاء مقادیر متناظر با استاندارد ۱۹۰۱: مدولاسیون BPSK، $N_c=۳۰۷۲$ ، $N=۴۰۹۶$ و $CP=۵۱۲$ ، $pilot_space=۴$

۵- نتیجه

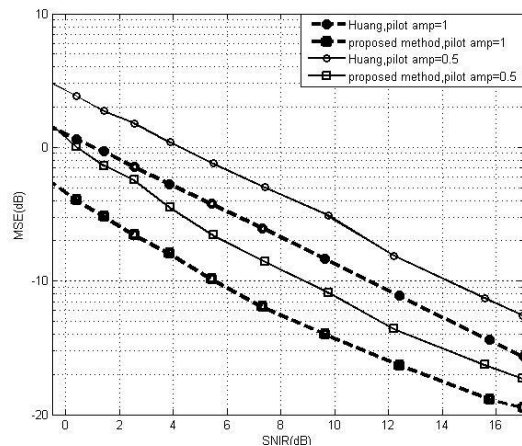
در این مقاله پس از بررسی روش‌های مختلف تخمین کانال، RVM حقیقی با هسته گوسی جهت پیاده‌سازی در کانال PLC و دقت بیش‌تر به حالت مختلط توسعه داده شد. سپس یک هسته جدید به‌همراه بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای کلیدی آن براساس منحنی سه‌بعدی ارائه‌شده، معرفی و از ویژگی اسپارسیتی در مدل رگرسیون خطی الگوریتم RVM در حالت مختلط برای تخمین کانال PLC استفاده شد. بالابردن دقت تخمین کانال و کاهش قابل‌ملاحظه پیچیدگی‌های محاسباتی نسبت به روش‌های اخیر از اهداف اصلی مقاله حاضر بود. به‌همین خاطر تخمین کانال مبتنی بر روش هوانگ نیز برای مقایسه با روش پیشنهادی، شبیه‌سازی و نتایج حاصله در قالب منحنی‌های پاسخ زمانی و فرکانسی کانال، MSE و BER در کنار روش ارائه‌شده نمایش داده‌شد. تأثیر تغییرات دامنه پیلوت نیز که اهمیت خاصی در مدیریت توان و کنترل سیگنال به



شکل ۸: مقایسه منحنی‌های MSE نسبت به تغییرات SNIR به‌ازاء: مدولاسیون BPSK، $N_c=۳۶۰$ ، $N=۵۱۲$ و $CP=۶۴$ ، $pilot_space=۴$



شکل ۹: مقایسه منحنی‌های BER نسبت به تغییرات SNIR به‌ازاء: مدولاسیون BPSK، $N_c=۳۶۰$ ، $N=۵۱۲$ و $CP=۶۴$ ، $pilot_space=۴$



شکل ۱۰: تغییرات MSE نسبت به SNIR به‌ازاء: مدولاسیون BPSK، $N_c=۳۶۰$ ، $N=۵۱۲$ و $CP=۶۴$ ، $pilot_space=۴$

برای اثبات مقاوم‌تر بودن روش پیشنهادی در مقابل اثرات نویز ضربه‌ای، شکل ۱۱ با استفاده از شبیه‌سازی به‌دست آمده‌است که برای نمونه، بهبود حدود ۴ dB به‌ازاء ۶۰٪ تأثیر نویز ضربه‌ای در مقایسه با روش هوانگ مشهود است. در انتها برای مقایسه بیشتر نتایج، از مقادیر پارامترهای مطابق با استاندارد PLC موسوم به استا-تاردار

[18] R. Negi and J. Cioffi, "Pilot tone selection for channel estimation in a mobile OFDM system," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 44, pp. 1122-1128, 1998.

[19] A. Cichocki and S. Amari, *Adaptive Blind Signal and Image Processing*, New York: John Wiley & Sons, 2003.

[20] A. Fatma, D. Pierre, and A. Florence, "Impulsive noise cancellation in multicarrier transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, pp. 94-106, 2005.

[21] T. N. Zogakis, P. S. Chow, J. T. Aslanis, and J. M. Cioffi, "Impulse noise mitigation strategies for multicarrier modulation," in *Proc. 1993 IEEE ICC.*, Geneva, Switzerland, 23-26 May 1993, pp. 784-788, 1993.

[22] J. H. Stott, "Detection and removal of clipping in multi-carrier receivers," European Patent Office. EP 1043874, Oct. 2000.

[23] H. A. Suraweera, C. Chai, J. Shentu, and J. Armstrong, "Analysis of impulse noise mitigation techniques for digital television systems," in *Proc. 8th Int. OFDM Workshop*, Hamburg, Germany, 24-25 Sept 2003, pp. 172-176, 2003.

[24] Y. Z. Zou, S. C. Chan, and T. S. Ng, "Least mean m-estimate for robust adaptive filtering in impulse noise," *IEEE Trans. Circuits-II*, vol. 47, pp. 1564-1569, 2000.

[25] A. Moghaddamjoo and R. L. Kirlin, "Robust adaptive Kalman filtering with unknown inputs," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 37, pp. 1166-1175, 1989.

[26] احمد قلی‌زاده سوتو و حسین خالقی بیزی، «تخمین پارامترهای کد کانولوشنال نرخ k/n در شرایط نویزی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، صفحه ۲۵۸-۲۴۷، شماره ۴، ۱۳۹۵.

[27] D. Bueche, P. Corlay, M. Gazalet, and F. X. Coudoux, "A method for analyzing the performance of comb-type pilot-aided channel estimation in power line communications," *IEEE T Consum Electr.*, vol. 54, pp. 1074-1081, 2008.

[28] Z. Huidog, H. Yong, Q. Shushan, and Y. Tianchun, "Design and implementation of channel estimation for low-voltage power line communication systems based on OFDM," *J. Semicond.*, vol. 33, pp. 1-5, 2012.

[29] Y. Chen, Q. Zhang, Y. Ge, Y. Hu, J. Chen, N. Ding, and X. Zeng, "Algorithm and VLSI Architecture of Channel Estimation Impaired by Impulsive Noise in PLC," in *Symp. 2013 IEEE 56th Int. Midwest Symp. on Circuits and systems (MWSCAS)*, Shanghai, China, 4-7 Aug. 2013, pp. 932-935, 2013.

[30] T. R. Oliveira, W. A. Finamore, and M. V. Ribeiro, "A Sounding Method based on OFDM Modulation for PLC Channel Measurement," in *Symp. 2013 IEEE 17th Int. Symp. on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, 24-27 March 2013, pp. 185-190, 2013.

[31] D. R. Vanitha, "Channel estimation and modeling of power line communication," M.S. thesis, National Institute of Technology Rourkela-769 008, Odisha, India, 2013.

[32] A. Mehboob, Li Zhang, J. Khangosstar, and K. Suwunnapak, "Joint Channel and Impulsive Noise Estimation using Compressive Sensing for Powerline Communications," in *Symp. 2013 IEEE 17th Int. Symp. on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, 24-27 March 2013, pp. 203-208, 2013.

[33] J. Huang, P. Wang, and Q. Wan, "Robust approach for channel estimation in power line communication," *J. Commun. Netw-S Kor.*, vol. 14, pp. 237-242, 2012.

[34] M. J. Garcia, J. L. Rojo-Álvarez, F. A. Atienza and M. M. Ramón, "Support vector machines for Robust Channel Estimation in OFDM," *IEEE Signal Proc. Let.*, vol. 13, pp.397-400, 2006.

[35] A. Tahat and N. Galatsanos, "Relevance Vector Machines for Enhanced BER in DMT Based Systems," *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2010, pp. 1-8, 2010.

[36] P. S. Chow, J. C. Tu, and J. M. Cioffi, "Performance evaluation of a multichannel transceiver system for ADSL and VHDSL services," *IEEE J Sel Area Comm.*, vol. 9, pp. 909-919, 1991.

[37] J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Westford, Massachusetts, USA: Prentice Hall, 2007.

[38] S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform," *IEEE Commun.*, vol. 19, pp. 628-34, 1991.

نویزهای محلی دارد، در الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که در هر شرایطی نتایج روش ارائه‌شده خیلی بهتر می‌باشد. همچنین میزان تأثیرگذاری نویز ضربه‌ای از ۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش داده شد و نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله با دو روش هوانگ و RVM با هسته گوسی مقایسه شد. مقاوم‌تر بودن روش پیشنهادی مقاله در مقابل نویز ضربه‌ای نسبت به سایر روش‌های اخیر موجود در این نتایج نیز کاملاً مشهود بود.

مراجع

[1] K. Dostert, *Power Line Communications*. First ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 2001.

[2] D. Huaiyu and H. V. Poor, "Advanced Signal Processing for Power Line Communications," *IEEE Commun Mag.*, vol. 41, pp. 100-107, 2003.

[3] F. J. Canete, L. Diez, J. A. Cortes, and J. T. Entrambasaguas, "Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium," *IEEE Commun Mag.*, vol. 41, pp. 41-47, 2003.

[4] M. Lienard, M. O. Carrion, V. Degardin, and P. Degauque, "Modeling and Analysis of In-Vehicle Power Line Communication Channels," *IEEE T Veh Technol.*, vol. 57, pp. 670-678, 2008.

[5] M. A. Tunc and E. Perrins, "Pilot Based Channel Estimation and Transform Domain Analysis in Broadband PLC for Smart Grid," in *IEEE 2013 SmartGridComm Symposium - Communication Networks for Smart Grids and Smart Metering*, Vancouver, Canada, 21-24 October 2013, pp.283-288, 2013.

[6] L. T. Berger, A. Schwager, and J. J. Escudero-Garzás, "Power Line Communications for Smart Grid Applications," *Hindawi Publishing Corporation J. Electr. Comput.*, Eng. 2013, pp.1-17, 2013.

[7] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band power line communications," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 44, pp. 249-258, 2002.

[8] M. Götz, M. Rapp, and K. Dostert, "Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design," *IEEE Commun.Mag.*, vol. 42, pp. 78-86, 2004.

[9] F. J. Canete, L. Diez, J. A. Cortes, and J. T. Entrambasaguas, "Broad-band modeling of indoor power-line channels," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol.48, pp. 175-183, 2002.

[10] P. Amirshahi and M. Kavehrad, "High-frequency characteristics of overhead multiconductor power lines for broadband communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, pp. 1292-1303, 2006.

[11] E. Biglieri E, "Coding and modulation for a horrible channel," *IEEE Commun Mag.*, vol. 41, pp. 92-98, 2003.

[12] K. Dostert, "Multipath model for the power line channel," *IEEE T Commun.*, vol. 50, pp. 553-559, 2000.

[13] L. Lampe and J. Huber, "Bandwidth efficient power line communications based on OFDM," *AEU-Arch. Elektr. Ubertragungstech.*, vol. 54, pp. 2-12, 2000.

[14] J. Grando, A. Torralba, J. Chavez, and V. Baena-Lecuyer, "Multi-carrier receiver for broadband power line communications," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 53, pp. 1293-1301, 2007.

[15] S. Hara and R. Prasad, "Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications," *Inc. Norwood, MA, USA: Artech House*, 2003.

[16] Y. H. Ma, P. L. So, and E. Gunawan, "Performance Analysis of OFDM Systems for Broadband power line communications under Impulsive Noise and Multipath effects," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, pp. 674-682, 2005.

[17] O. Edfors, M. Sandel, J. J. Van de Beek, S. K. Wilson, and P. O. Borjesson, "OFDM Channel estimation by Singular value decomposition," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 931-939, 1998.

- Systems," *IEEE Wireless Commun. Let.* vol. 7, no. 1, pp. 114-117, 2018.
- [46] M. Asadpour, F. A. Ajhiri, B. M. Tazehkand and M. H. Seyedarabi, "Jointly RVM Based Channel Estimation and PAPR Reduction using Modified Tabu Search Algorithm in Power Line Communication Systems," *J. Wireless Pers. Commun.*, vol. 84, no. 4, pp. 2757-2775, 2015.
- [47] M. E. Tipping, "Sparse Bayesian Learning and the Relevance Vector Machine," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 1, pp. 211-244, 2001.
- [48] احمد قلی‌زاده سوته و حسین خالقی بیژکی، «تخمین پارامترهای کد BCH باینری در شرایط نویزی با استفاده از روش مبتنی بر بیت‌های توازن»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، صفحه ۲۰۹-۱۹۷، شماره ۱، ۱۳۹۶.
- [49] C. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, New York: Springer, 2006.
- [50] J. Berger, *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*, New York: Springer, 1985.
- [39] H. Philipps, "Modelling of Powerline Communication Channels," in *Proc. 3rd Int. Symp. Power-Line Commun. and its Applications*, Lancaster, UK, 30 March - 1 April 1999, pp. 14-21, 1999.
- [40] M. Zimmermann and K. Dostert, "A Multipath Model for the Power line Channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, pp. 553-559, 2002.
- [41] C. Hensen and W. Schulz, "Time Dependence of the Channel Characteristics of Low Voltage Power-Lines and its Effects on Hardware implementation," *AEU Int. J. Electron. Commun.*, vol. 54, pp. 23-32, 2000.
- [42] Shen, Y. and Martinez, E., "Channel Estimation in OFDM Systems", *Freescale Semiconductor, AN3059*, 2006.
- [43] A. Chini, W. Yiyuan, M. El-Tanany, and S. Mahmoud, "Filtered decision feedback channel estimation for OFDM-based DTV-terrestrial broadcasting system," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 44, pp. 2-11, 1998.
- [44] K. Yan, H. Zhang and H. C. Wu, "Robust multipath channel estimation in the presence of impulsive noise," *IET Commun.*, vol. 12, no. 2, pp. 228-235, 2018.
- [45] H. Ye, G. Y. Li and B. H. Juang, "Power of Deep Learning for Channel Estimation and Signal Detection in OFDM

زیر نویس‌ها

⁸ Support Vector Machine (SVM)

⁹ Additive White Gaussian Noise (AWGN)

¹ multipath fading 0

¹ Inter-Symbol Interference (ISI) 1

¹ Asymmetric Digital Subscriber Line 2

¹ Guard Interval (GI) 3

¹ Cyclic Prefix (CP) 4

¹ Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) 5

¹ Channel State Information (CSI)

² Minimum Mean Square Error (MMSE)

³ Maximum Likelihood (ML)

⁴ Least Square (LS)

⁵ Time spread

⁶ Open Power-line communication European Research Alliance

⁷ Compressive sensing