

Joint Adaptivity of Pilot Pattern and Channel Estimation in OFDM Systems

Mostafa Sobhani¹, Mohammadali Sebghati^{2*} and Hassan Zareian³

1-Broadcast Engineering Department, IRIBU, Tehran, Iran.

2*- Broadcast Engineering Department, IRIBU, Tehran, Iran.

3- Broadcast Engineering Department, IRIBU, Tehran, Iran.

¹ mostafa.s1509@gmail.com, ^{2*} sebghati@iribu.ac.ir, and ³ zareian@iribu.ac.ir

Corresponding author address: Mohammadali Sebghati, Faculty of Broadcast Engineering, IRIBU, Tehran, Iran, Post Code: 19956-14317.

Abstract- In wireless communications which are widely applicable nowadays, the channel variation over time and frequency is a major problem. Therefore, the channel estimation and compensation are critical challenges in these systems. The OFDM technique is noteworthy for wireless channels due to robustness, high efficiency and consequently high data rate. Pilot-aided channel estimation is a promising approach in many OFDM systems, including mobile networks, digital audio and video broadcasting standards. The number and the arrangement of pilots in the time-frequency grid affect the accuracy and the period of the channel estimation procedure. Practical OFDM systems utilize fixed pilot patterns that are designed based on typical assumptions of the fading channel. Thus, unnecessary pilot overhead is imposed when the channel is close to a flat slow fading channel, and the performance degrades in the worst condition of the channel. To remedy this issue, adaptive pilot arrangement based on the channel response is introduced in the previous researches. Indeed, finding the best pilot arrangement according to the channel response is an optimization problem and the adaptive approach is exploited to find its answer. In this paper, we develop a novel method for adaptive pilot arrangement based on Kalman filter which is combined with the channel estimation algorithm. Therefore, the position of the pilots and the channel response are jointly estimated in the proposed method. This method is simulated for various channel types and its performance is evaluated by bit error rate (BER) and pilot overhead criteria. Simulation results illustrate that the proposed method obtains the same performance as the previous methods by fewer pilots. This achievement leads to significant increase in the capacity of data transfer.

Keywords- Channel estimation, Adaptive pilot pattern, Pilot overhead, Kalman filter, OFDM.

وفقی سازی توأمان الگوی پایلوت و تخمین کانال در سیستم‌های OFDM

مصطفی سبحانی^۱، محمدعلی سبقتی^{۲*}، حسن زارعیان^۳

۱- دانشکده مهندسی رسانه، دانشگاه صدا و سیما، تهران، ایران.

۲* - دانشکده مهندسی رسانه، دانشگاه صدا و سیما، تهران، ایران.

۳- دانشکده مهندسی رسانه، دانشگاه صدا و سیما، تهران، ایران.

1 mostafa.s1509@gmail.com, 2* sebghati@iribu.ac.ir, and 3 zareian@iribu.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: محمدعلی سبقتی، تهران، ابتدای بزرگراه هاشمی رفسنجانی، دانشگاه صدا و سیما، دانشکده مهندسی رسانه، کد پستی:

۱۴۳۱۷-۱۹۹۵۶

چکیده- در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم که امروزه کاربرد گسترده‌ای یافته است، تغییرات فرکانسی و زمانی کانال یکی از مشکلات اساسی است؛ از این رو مسأله تخمین کانال و جبران اثرات آن چالشی کلیدی در این سیستم‌ها محسوب می‌شود. تکنیک OFDM به دلیل مقاومت در برابر فرکانس‌گزینی، بهره‌وری فرکانسی و نرخ ارسال بالا مورد توجه قرار دارد. تخمین کانال بر مبنای پایلوت از پرکاربردترین روش‌هاست که در بسیاری از سیستم‌های OFDM از جمله شبکه‌های موبایل و استانداردهای پخش صدا و ویدیوی دیجیتال استفاده شده است. تعداد و آرایش پایلوت‌ها در صفحه زمان-فرکانس تأثیر مستقیم در دقت و سرعت فرآیند تخمین کانال مخابراتی دارد. در ارتباطات واقعی از آرایش پایلوت ثابتی استفاده می‌شود که معمولاً با فرض شرایط نوعی برای محوشوندگی کانال طراحی می‌گردد. این امر منجر به سربار پایلوت غیرضروری در وضعیت خوب کانال (نزدیک به محوشوندگی کند و تخت) و همچنین تخریب عملکرد در بدترین وضعیت کانال می‌شود. لذا در تحقیقات پیشین، پیشنهاد وفقی‌سازی آرایش پایلوت‌ها بر اساس پاسخ کانال مطرح شده است. در واقع یافتن بهترین آرایش پایلوت متناسب با پاسخ کانال، یک مسأله بهینه‌سازی است که رویکرد وفقی به دنبال دستیابی به پاسخ آن است. در این پژوهش روش جدیدی برای وفقی‌سازی آرایش پایلوت‌ها بر اساس فیلتر کالمن ارائه و با الگوریتم تخمین کانال ترکیب شده است. بدین ترتیب در روش پیشنهادی، محل پایلوت‌ها و پاسخ کانال توأماً با یکدیگر تخمین زده می‌شود. این روش در شرایط مختلف کانال شبیه‌سازی شده و عملکرد آن با معیارهای نرخ خطای بیت (BER) و درصد سربار پایلوت ارزیابی گردیده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد روش پیشنهادی با درصد سربار پایلوتی کمتر از روش‌های موجود به عملکردی مشابه دست می‌یابد که متناظر با افزایش ظرفیت انتقال داده به میزان قابل توجهی است.

واژه‌های کلیدی: تخمین کانال، آرایش پایلوت وفقی، سربار پایلوت، فیلتر کالمن، سیستم‌های چندحاملی فرکانس متعامد.

روش‌های تخمین کانال^۶ که در استانداردهای پخش صدا و ویدیوی دیجیتال نیز به کار می‌رود بر مبنای ارسال پایلوت در بلوک‌های زمانی و زیرحامل‌های از پیش تعیین شده طراحی و اجرا شده است [1]. این رویکرد از سه مرحله اساسی تشکیل می‌گردد. مشاهده وضعیت کانال با استفاده از پایلوت‌ها، تخمین وضعیت کانال بر اساس نتایج مشاهده و درون‌یابی نتایج تخمین برای به کارگیری در زیرحامل‌های مربوط به داده. با بهبود هر یک از این سه مرحله

۱- مقدمه

کانال‌های بی‌سیم^۱ که امروزه کاربرد بسیاری دارند، در اثر پدیده‌هایی مانند چندمسیره‌گی^۲ دچار تغییرات می‌شوند. تکنیک OFDM^۳ راهکار مناسبی برای مقابله با محوشوندگی^۴ کانال و افزایش نرخ ارسال و بهره‌وری فرکانسی است. یکی از چالش‌های مهم در سیستم‌های OFDM، تخمین اطلاعات کانال، با دقت و سرعت بالا به منظور استفاده در آشکارسازهای همدوس^۵ است. یک دسته از

محوشوندگی سریع، استفاده از وفقی‌سازی روی محور فرکانس به کمک SNR با تخمینگر کمترین مربعات و درون‌یابی خطی، عملکرد خوبی در معیار میانگین مربعات خطا در تخمین کانال و نرخ خطای بیت دارد [16].

در این پژوهش وفقی‌سازی آرایش پایلوت‌ها در ترکیب با الگوریتم‌های وفقی مانند فیلتر کالمن برای تخمین پارامترهای پاسخ کانال مدنظر است. بدین ترتیب هم نمونه برداری از کانال در صفحه زمان-فرکانس وفقی است و هم الگوریتم تخمین پارامترهای کانال. وفقی شدن آرایش پایلوت با تغییر پارامتر فاصله فرکانسی پایلوت‌ها در الگوریتم کالمن پیشنهاد شده است. برای پیاده‌سازی این ایده نیز فیلتر کالمن مستقلی اضافه نشده است، بلکه با تعمیم بردار متغیرهای حالت، این پارامتر همراه با پارامترهای کانال در قالب یک فیلتر کالمن تخمین زده می‌شود. بدین ترتیب به جای دو مسیر مجزا برای جستجوی دو مجموعه پارامتر مربوط به آرایش پایلوت‌ها و کانال، یک مسیر جستجو برای دستیابی به پاسخ بهینه در فضای تعمیم یافته انجام می‌شود که همه پارامترها را توأمان پوشش می‌دهد. با وفقی شدن آرایش پایلوت‌ها، به دنبال پاسخ مناسب بر اساس تغییر شرایط کانال هستیم. هدف اصلی، بهبود تخمین کانال و کاهش احتمال خطا با درصد سربار پایلوت یکسان، یا دستیابی به همان عملکرد به ازای تعداد پایلوت‌های کمتر (درصد سربار پایین‌تر) است.

در بخش دوم این مقاله مدل سیستم OFDM باند پایه مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در ادامه انگیزه استفاده از پایلوت وفقی و تخمینگر فیلتر کالمن بیان می‌شود. در بخش سوم روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. در بخش چهارم شبیه‌سازی‌ها و نتایج عددی آن‌ها در سناریوهای مختلف تشریح می‌شود. در بخش پنجم نیز نتایج این پژوهش ارائه می‌گردد.

۲- مدل سیستم

۲-۱- مدل سیستم OFDM باند پایه

مدل باند پایه برای یک سیستم ارتباطی بی‌سیم OFDM رایج، در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های دودویی که باید منتقل شوند، ابتدا با استفاده از طرح‌های مدولاسیون دیجیتال مانند M -PSK و M -QAM نگاشت می‌شوند. سمبل‌های داده مدوله شده از قالب سریال به موازی تبدیل می‌شود. بلوک جای‌گذاری پایلوت^{۱۷} برای انتقال داده‌های شناخته شده است. زیرحامل‌های پایلوت با زیرحامل‌های داده ترکیب می‌شوند و $X(k)$ را تولید می‌کنند. هر سمبل OFDM در حوزه فرکانس با استفاده از عملیات معکوس تبدیل فوریه گسسته به حوزه زمان تبدیل می‌شود که با

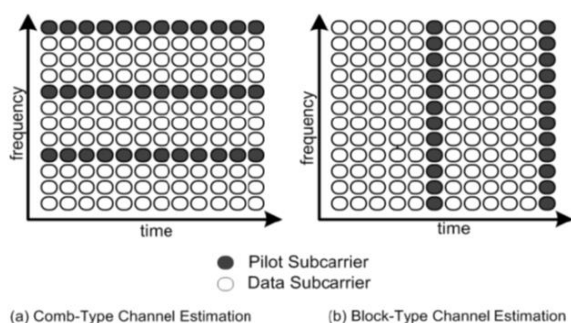
می‌توان سرعت و دقت تخمین کانال و در نتیجه کارایی سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم را افزایش داد.

در تحقیقات مختلف از الگوریتم‌ها و روش‌های متنوع برای هر یک از مراحل استفاده شده است. در مرحله اول که شامل مشاهده وضعیت کانال با استفاده از پایلوت‌ها است، تعداد و چیدمان پایلوت‌ها در صفحه زمان-فرکانس بررسی می‌شود. تعداد پایلوت‌ها باید طبق قاعده نمونه برداری انتخاب شود، ولی برای نحوه چینش آن‌ها راه-حل‌های مختلفی وجود دارد. بدین منظور انواع آرایش‌های ثابت منظم [2] و نامنظم [3] پیشنهاد شده است. در آرایش‌های منظم، آرایش نوع بلوکی^{۱۸}، نوع شانه‌ای^{۱۹} و پراکنده (مشابه آنچه در استاندارد DVB-T2 وجود دارد [4]) و همچنین الماسی [5] پیشنهاد و تحلیل شده است. ممکن است یک الگوی پایلوت که برای کانال در وضعیت فعلی مناسب است، با تغییر پاسخ کانال در طول زمان، از الگوی بهینه برای کانال جدید دور شده باشد. در نتیجه انواع آرایش‌های وفقی در امتداد محور زمان و امتداد محور فرکانس و نسبت انرژی پایلوت به انرژی داده با توجه به الگوها و فواصل از پیش تعیین شده [6]-[18] پیشنهاد شده است. مسأله چینش پایلوت‌ها در صفحه زمان-فرکانس در واقع یک مسأله بهینه‌سازی است. این مسأله به صورت‌های مختلف قابل تعریف است. هدف از حل این مسأله تعیین فواصل زمانی و فرکانسی بین پایلوت‌ها و نسبت انرژی آن‌ها به انرژی داده است، به نحوی که معیار مشخصی را بهینه کند. این معیار بهینه‌سازی می‌تواند میانگین مربعات خطا (MSE)^{۲۰} در تخمین کانال، نرخ خطای بیت^{۲۱} یا نرخ انتقال داده^{۲۲} در کانال باشد [19]. البته الگوریتم‌های موجود در عمل به پاسخ بهینه نمی‌رسند، بلکه جستجویی را برای بهبود آرایش پایلوت‌ها انجام می‌دهند.

مرحله دوم، تخمین وضعیت کانال بر اساس نتایج مشاهده است که از الگوریتم‌های مختلف تخمین شامل تخمین کمترین مربعات^{۲۳}، تخمین حداقل میانگین مربعات خطا^{۲۴} [20], [21]، تخمین حداکثر درست‌نمایی^{۲۵} [22] و فیلتر کالمن [23] استفاده شده است. مرحله سوم درون‌یابی نتایج تخمین برای بکارگیری در زیرحامل‌های مربوط به داده است که از انواع درون‌یاب‌های خطی، مرتبه دوم، مکعبی اسپلاین، پایین‌گذر، دو بعدی و غیره استفاده شده است [2]. با بهبود هر یک از این سه مرحله می‌توان سرعت و دقت تخمین کانال و در نتیجه کارایی سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم را افزایش داد. جمع‌بندی این تحقیقات نشان می‌دهد که در آرایش ثابت در کانال با محوشوندگی سریع، استفاده از آرایش نوع شانه‌ای با تخمینگر کمترین مربعات و درون‌یابی پایین‌گذر و همچنین آرایش نوع شانه‌ای با تخمینگر فیلتر کالمن و درون‌یابی پایین‌گذر بهترین عملکرد را دارند [2], [23]. برای آرایش وفقی در کانال با

۲-۲ - مزایای استفاده از پایلوت وقفی

برای تخمین تابع تبدیل کانال می‌توان از سمبل‌های پایلوت استفاده کرد. نحوه چینش پایلوت‌ها در کنار داده‌های اصلی متنوع است. انتخاب تعداد و مکان بهینه برای پایلوت‌ها در واقع معاوضه‌ای است بین انرژی مصرف شده برای سیگنال‌های پایلوت، دقت در تخمین کانال و کارایی طیفی سیستم مخابراتی. ساختار سیگنال‌های پایلوت به کار رفته در الگوریتم‌های تخمین کانال به طبیعت کانال و نوع سیستم مخابراتی بستگی داشته و تاثیر مستقیمی بر کیفیت روش تخمین کانال دارد [1]. اگر جایابی سمبل‌های پایلوت در صفحه زمان-فرکانس بر مبنای ترتیب خاصی باشد آنگاه آرایش منظم تشکیل می‌شود که انواعی دارد. در آرایش نوع بلوکی با توجه به شکل ۲ سمبل‌های پایلوت در زمان‌هایی مشخص در همه زیرحامل‌ها جای‌گذاری می‌شود. این آرایش برای کانال‌های با محوشوندگی کند مناسب است. تعیین فاصله زمانی مناسب برای ارسال پایلوت به همدوسی زمانی کانال بستگی دارد [2]. در آرایش نوع شانه‌ای با توجه به شکل ۲ سمبل‌های پایلوت در برخی فرکانس‌های مشخص ولی در همه زمان‌ها جای‌گذاری می‌شود. این آرایش برای کانال‌های با محوشوندگی سریع مناسب است. انتخاب زیرحامل‌های مناسب برای قرار دادن پایلوت‌ها به همدوسی فرکانسی کانال بستگی دارد [2].



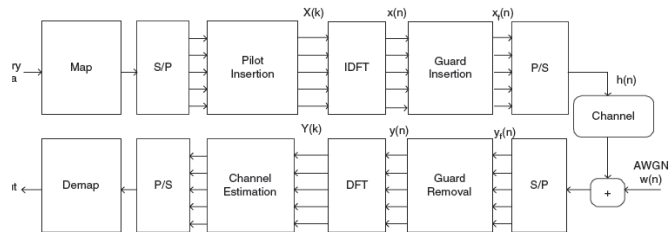
شکل ۲: آرایش نوع بلوکی و شانه‌ای [2]

در یک آرایش پایلوت، انتخاب تعداد و مکان بهینه برای پایلوت‌ها در صفحه زمان-فرکانس می‌تواند در مدت تخمین یک کانال ثابت باشد که به آرایش پایلوت ثابت معروف است. اما ممکن است تعداد و مکان بهینه برای پایلوت‌ها که برای کانال در وضعیت فعلی مناسب است، با تغییر پاسخ کانال در طول زمان، از الگوی بهینه برای کانال جدید دور شده باشد. لذا آرایش پایلوت وقفی تلاشی برای بهبود دقت در تخمین کانال و کارایی طیفی سیستم‌های مخابراتی است. شبکه‌های بی‌سیم OFDM امروزی از الگوی پایلوت ثابتی استفاده می‌کنند، لذا تراکم پایلوت‌ها علیرغم تغییر پاسخ کانال محوشونده، تغییر نمی‌کند.

$x(n)$ نشان داده شده است. یک پیشوند چرخشی^{۱۸} به ابتدای هر سمبل OFDM در حوزه زمان متصل می‌شود تا با اعوجاج ناشی از تداخل بین سمبل^{۱۹} در کانال مقابله کند. پیشوند چرخشی یک رونوشت از آخرین بخش از هر سمبل OFDM است. پس از اعمال پیشوند چرخشی، سمبل‌های OFDM بدست آمده به شکل سریال تبدیل و از طریق یک کانال بی‌سیم منتقل می‌شوند. این کانال می‌تواند از نوع محوشوندگی تخت یا از نوع محوشوندگی فرکانس‌گزینه باشد. در هر حالت وجود نویز سفید گوسی جمع شونده^{۲۰} غیر قابل انکار است که با $w(n)$ نشان داده شده است. هماهنگ‌سازی کامل بین فرستنده و گیرنده در نظر گرفته شده است. در عمل، هماهنگ‌سازی زمانی با بهره‌گیری از ساختار پیشوند چرخشی بدست می‌آید. در گیرنده، سمبل‌های دریافت شده به شکل موازی تبدیل می‌شوند و سپس پیشوند چرخشی حذف می‌شود که با $y_g(n)$ نشان داده شده است. سمبل‌های OFDM بدست آمده که در حوزه زمان قرار دارند از طریق بلوک تبدیل فوریه گسسته به حوزه فرکانس تبدیل می‌شوند که با $Y(k)$ نشان داده شده است. زیرحامل‌های پایلوت دریافتی $Y_p(k)$ از $Y(k)$ بدست می‌آید. یک متعادل‌ساز^{۲۱} مبتنی بر پایلوت از این سمبل‌ها برای تخمین کانال و پردازش‌های بیشتر داده‌های دریافتی برای تخمین سمبل‌های منتقل شده استفاده می‌کند و $\hat{H}(k)$ از $H_p(k)$ محاسبه می‌شود، که $H_p(k)$ تابع تبدیل تخمین کانال در نقاط پایلوت است. نمونه‌های داده انتقالی $X(k)$ را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$X(k) = \frac{Y(k)}{\hat{H}(k)} \quad (1)$$

یعنی با داشتن تابع تبدیل کانال و سیگنال‌های دریافتی به راحتی می‌توان مقادیر داده را بدست آورد، که $\hat{H}(k)$ تابع تبدیل تخمین کانال و $Y(k)$ سیگنال دریافتی بلوک تخمین کانال است. سپس این سمبل‌ها به شکل سریال تبدیل می‌شوند و با اعمال عکس نگاشت داده‌های دودویی انتقالی بدست می‌آیند [20].



شکل ۱: مدل سیستم OFDM باند پایه [2]

رفتار کانال‌های بی‌سیم براساس زمین^{۲۲}، محیط انتشار^{۲۳}، تحرک کاربران، موانع^{۲۴} و غیره متفاوت است. برای تحرک پذیری پایین و کانال با خط دید^{۲۵} قوی، محوشوندگی کانال از نوع کند و فرکانس ناگزین (تخت) است، در حالی که برای تحرک پذیری بالا در یک محیط چند مسیره قوی، این کانال فرکانس گزینی بالا و محوشوندگی سریع را نشان می‌دهد. اکثر استانداردهای بی‌سیم برای عملکرد در بدترین شرایط کانال طراحی شده‌اند. ایده اصلی وفقی سازی پایلوت که تغییر الگوی چینش پایلوت‌ها متناسب با پاسخ کانال است در شکل ۳ مشاهده می‌شود. در این شکل فاصله پایلوت‌ها در امتداد محور زمان $(\Delta_{p,t})$ به زمان هم‌دوسی کانال وابسته است. فاصله پایلوت‌ها هنگامی که زمان هم‌دوسی بالا باشد، افزایش می‌یابد و هنگامی که پایین باشد کاهش می‌یابد. همچنین فاصله پایلوت‌ها در امتداد محور فرکانس $(\Delta_{p,f})$ تابعی از پهنای باند هم‌دوسی کانال است. هنگامی که پهنای باند هم‌دوسی کانال بالا باشد این فاصله افزایش و هنگامی که پایین باشد، کاهش می‌یابد [19].

تعیین شده است و یا با گام‌هایی ثابت و یکنواخت اجرا می‌گردد [19]؛ ولی در روش پیشنهادی، گام‌های تغییر فاصله فرکانسی پایلوت‌ها یکنواخت نیست و می‌تواند متناسب با پهنای باند هم‌دوسی کانال، کوچک یا بزرگ شود تا فاصله فرکانسی پایلوت‌ها $(\Delta_{p,f})$ به مقدار بهینه نزدیک باشد. بدین منظور پارامتر $\Delta_{p,f}$ به عنوان یک متغیر توسط فیلتر کالمن تخمین زده می‌شود. برای آنکه این عملیات تخمین‌گری جدید و مجزا از روند تخمین کانال نباشد، تخمین $\Delta_{p,f}$ با روال تخمین پاسخ فرکانسی کانال ادغام شده است. بدین ترتیب به جای جستجوهای جهت یافتن پاسخ‌های بهینه برای فاصله فرکانسی پایلوت‌ها و ضرایب کانال، پاسخ بهینه به طور مشترک و در فضایی تعمیم یافته توسط یک فیلتر کالمن جستجو می‌شود. بدین منظور پارامتر $\Delta_{p,f}$ به مجموعه بردار حالت شامل ضرایب پاسخ فرکانسی کانال اضافه می‌شود. پهنای باند هم‌دوسی کانال نیز به عنوان مشاهده یا اندازه‌گیری جهت تصحیح تخمین‌ها به بردار مشاهدات افزوده می‌گردد. لذا پهنای باند هم‌دوسی کانال را محاسبه می‌کنیم و از آن به عنوان مشاهده برای تخمین فواصل پایلوت در فیلتر کالمن استفاده می‌نماییم.

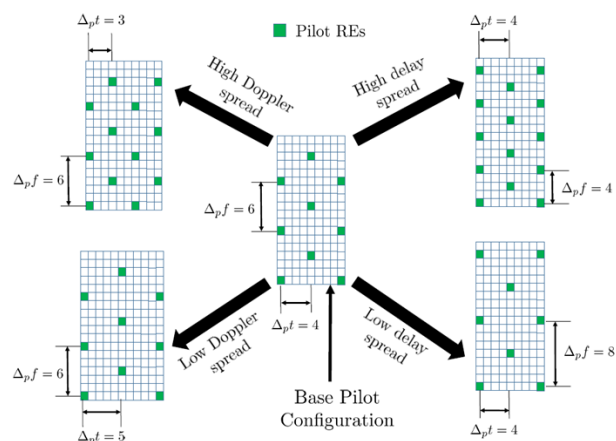
۳-۱- محاسبه پهنای باند هم‌دوسی

در یک کانال با محوشوندگی ناشی از چندمسیرگی، مدت زمان میان رسیدن سیگنال اصلی و آخرین نسخه تأخیری از مسیرهای مختلف به گیرنده را گستردگی تأخیر می‌نامند. اگر Δf_c پهنای باند هم‌دوسی کانال و T_m گستردگی تأخیر کانال باشد، میانگین پهنای باند هم‌دوسی کانال با معکوس گستردگی تأخیر تقریب زده می‌شود.

$$\Delta f_c = \frac{1}{T_m} \quad (2)$$

فواصل پایلوت در راستای محور فرکانسی تابعی از پهنای باند هم‌دوسی کانال لحاظ می‌شود. در سمت گیرنده بعد از دریافت سیگنال از کانال و اعمال دمدولاسیون OFDM، پهنای باند هم‌دوسی بر اساس پنجاه درصد همبستگی در سیگنال دریافتی محاسبه می‌شود. لازم به تأکید است این پهنای باند هم‌دوسی را از روی نتایج تخمین کانال استخراج نمی‌کنیم، بلکه از روی مشاهدات واقعی یعنی مقادیر سیگنال دریافتی محاسبه می‌نماییم، ولی به دلیل فرض سفید بودن نویز اندازه‌گیری، بازه متناظر با همبستگی بزرگتر یا برابر با پنجاه درصد همان پهنای باند هم‌دوسی کانال واقعی را مشخص می‌نماید.

حداکثر فاصله پایلوت در حوزه فرکانس به کمک قضیه نمونه-برداری قابل تعیین است. اگر $\Delta_{p,f}$ فاصله پایلوت‌ها از هم در راستای محور فرکانس، N تعداد زیرحامل‌ها در هر سمبل OFDM و T بازه نمونه برداری باشد، آنگاه با توجه به قضیه نمونه برداری:



شکل ۳: وفقی سازی پایلوت در شرایط مختلف کانال [19]

۳-۲- روش پیشنهادی

آرایش نوع شانه‌ای که در هر سمبل OFDM زیرحامل‌هایی را به پایلوت اختصاص می‌دهد برای کانال با محوشوندگی سریع مناسب است، لذا در روش پیشنهادی وفقی سازی این آرایش مدنظر قرار گرفته است. انتخاب تعداد و مکان بهینه برای پایلوت‌ها چالش اصلی در وفقی سازی آرایش پایلوت‌هاست. در روش پیشنهادی وفقی سازی روی محور فرکانس اعمال می‌شود، یعنی فاصله فرکانسی پایلوت‌ها $(\Delta_{p,f})$ با توجه به پهنای باند هم‌دوسی کانال مخابراتی تعیین می‌گردد که به تعداد و مکان مناسب برای پایلوت‌ها منجر می‌شود. بدین ترتیب فاصله پایلوت‌ها در محور فرکانس متناسب با پهنای باند هم‌دوسی کانال افزایش یا کاهش می‌یابد. در روش‌های موجود این افزایش و کاهش یا بر اساس انتخاب الگویی از پیش

$$Y_p(n) = \begin{bmatrix} Y_1(n) \\ Y_2(n) \\ \vdots \\ Y_{Np}(n) \\ \Delta f_c \end{bmatrix}, H_p(n) = \begin{bmatrix} H_1(n) \\ H_2(n) \\ \vdots \\ H_{Np}(n) \\ \Delta pf \end{bmatrix}, V_p(n) = \begin{bmatrix} V_1(n) \\ V_2(n) \\ \vdots \\ V_{Np}(n) \\ V(n) \end{bmatrix}$$

$$X_p(n) = \begin{bmatrix} X_1(n) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & X_2(n) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & X_{Np}(n) & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_{Np}(n) & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}, W_p(n) = \begin{bmatrix} W_1(n) \\ W_2(n) \\ \vdots \\ W_{Np}(n) \\ W(n) \end{bmatrix}$$

در معادله (۵) $Y_p(n)$ بردار مشاهدات و $X_p(n)$ پایلوت‌های ارسالی در سمت فرستنده و $\alpha = \frac{2}{\mu}$ معکوس ضریب تعداد پایلوت در پهنای باند همدوسی کانال است. $V_p(n)$ نویز اندازه‌گیری است که یک نویز گوسی سفید جمع شونده با میانگین صفر در حوزه فرکانس با واریانس $R_p(n)$ فرض می‌شود. در معادله (۶) $H_p(n)$ بردار حالت و ماتریس ضرایب یک مدل خودبازگشتی^{۲۶} (AR) مرتبه اول از کانال را شامل می‌شود که درایه a_{Np} آن ضریب مدل خودبازگشتی برای زیرحامل p و α ضریبی است که ارتباط پهنای باند همدوسی را با فاصله پایلوت‌ها طبق رابطه (۴) مدل می‌کند. همچنین $W_p(n)$ نویز پردازش یا مدل‌سازی با واریانس $Q_p(n)$ است. چون معادله حالت بر اساس مدل‌سازی AR است، پارامترهای آن شامل ضرایب ماتریس A و واریانس Q_p به کمک معادلات Yule-Walker بدست می‌آید [25]. در مرحله اول، فضای حالت برای کانال متغیر با زمان به صورت زیر پیش‌بینی می‌شود:

$$H_p(n | n-1) = A \hat{H}_p(n-1) \quad (۷)$$

$$P_p(n | n-1) = A \hat{P}_p(n-1) A^H + Q_p(n) \quad (۸)$$

$H_p(n | n-1)$ نتیجه پیش‌بینی حالت و $P_p(n | n-1)$ نتیجه پیش‌بینی کوواریانس خطا است. در مرحله بعد، به روزرسانی با استفاده از معادلات زیر انجام می‌شود:

$$K = P_p(n) (P_p(n) + R_p(n))^{-1} \quad (۹)$$

$$e_p(n) = Y_p(n) - X_p(n) \hat{H}_p(n-1) \quad (۱۰)$$

$$\hat{H}_p(n) = H_p(n | n-1) + K e_p(n) \quad (۱۱)$$

$$\hat{P}_p(n) = (I - K) P_p(n | n-1) \quad (۱۲)$$

در معادلات بالا، $P_p(n)$ به عنوان کوواریانس خطای پیش‌بینی حالت شناخته می‌شود، $\hat{H}_p(n)$ نتیجه تخمین بردار حالت، $\hat{P}_p(n)$

$$\frac{N}{\Delta pf} > \frac{T_m}{T} \quad (۳)$$

بنابراین $\max(\Delta pf) = \left\lceil \frac{NT}{T_m} \right\rceil = \lceil NT \Delta f_c \rceil$ حداکثر فاصله پایلوت مجاز است که به کمک گستردگی تأخیر تعیین می‌شود [19]. فواصل پایلوت کمتر از پهنای باند همدوسی کانال است. به عبارت دیگر می‌توان در یک پهنای باند همدوسی کانال حداقل دو پایلوت استفاده کرد. افزایش تعداد پایلوت‌ها تأثیر مستقیم بر تخمین کانال دارد [24]. فواصل پایلوت با توجه به معادله زیر می‌تواند ضریبی از پهنای باند همدوسی کانال باشد،

$$\Delta pf = \frac{1}{2} \mu \Delta f_c \quad (۴)$$

که $0 < \mu \leq 1$ است. بعد از محاسبه پهنای باند همدوسی کانال، فیلتر کالمن از این مقدار در بردار مشاهدات استفاده می‌کند تا فاصله مناسب برای پایلوت‌ها را تخمین بزند.

۳-۲- تخمین توأمان به کمک فیلتر کالمن

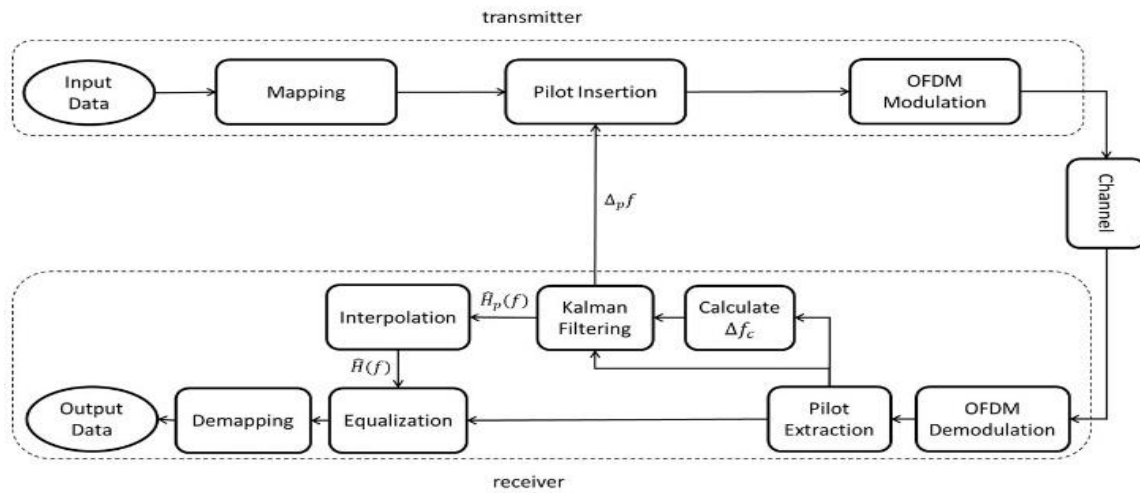
در روش پیشنهادی، دو عملیات تخمین توأم با یکدیگر انجام می‌شود. یک عملیات، تخمین پاسخ فرکانسی کانال در نقاط پایلوت، بر اساس سیگنال دریافتی در سمت گیرنده است. عملیات دیگر، تخمین فواصل پایلوت به کمک پهنای باند همدوسی کانال تخمینی است. بدین منظور پارامتر Δpf به مجموعه بردار حالت شامل ضرایب پاسخ فرکانسی کانال اضافه می‌شود. از مشخصه پهنای باند همدوسی کانال نیز به عنوان مشاهده یا اندازه‌گیری جهت تصحیح تخمین‌ها استفاده می‌شود.

فیلتر کالمن بر اساس معادلات حالت و اندازه‌گیری که رفتار بردار حالت و ارتباط مشاهدات با آن را مدل می‌کند طراحی می‌گردد. این فیلتر در دو مرحله بردار حالت را تخمین می‌زند. در مرحله اول با استفاده از معادلات حالت، مقدار متغیر را در لحظه بعد پیش‌بینی می‌کند. در مرحله بعدی که به روزرسانی نامیده می‌شود این پیش‌بینی را با کمک مشاهده در لحظه فعلی تصحیح می‌نماید. این اصلاح بر اساس اختلاف مقدار حاصل از پیش‌بینی با مشاهده واقعی و با وزن بهره کالمن صورت می‌گیرد. فیلتر کالمن برای سیستم‌های خطی با نویز گوسی جواب بهینه دارد.

در مسأله این پژوهش، معادلات اندازه‌گیری و حالت را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$Y_p(n) = X_p(n) H_p(n) + V_p(n) \quad (۵)$$

$$H_p(n) = A H_p(n-1) + W_p(n) \quad (۶)$$



شکل ۴: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

فاصله پایلوت در طول دریافت چند سمبل (یک بلوک زمانی) ذخیره و به‌روز رسانی می‌شود. طول یک بلوک زمانی به کمک زمان همدوسی کانال تعیین می‌گردد. پس از دریافت همه سمبل‌های یک بلوک زمانی، اطلاعات به‌روز رسانی شده مربوط به فاصله پایلوت به سمت فرستنده ارسال می‌شود. فرستنده با استفاده از این فواصل بهینه، پایلوت‌ها را در بین داده‌های اصلی در سمبل‌های بعدی جای‌گذاری می‌کند. یعنی دریافت پایلوت‌ها و تخمین فاصله بهینه پایلوت‌ها بر اساس پهنای باند همدوسی کانال در گیرنده به صورت سمبل به سمبل انجام می‌شود، ولی ارسال نتیجه به فرستنده در لینک فیدبک و تغییر آرایش پایلوت‌ها بر اساس نتیجه تخمین، به صورت بلوک به بلوک صورت می‌گیرد. برای محاسبه پاسخ فرکانسی کانال در موقعیت زیرحامل‌های داده، خروجی دیگر فیلتر کالمن که پاسخ فرکانسی کانال در نقاط پایلوت است، وارد بلوک درون‌یابی می‌گردد. سپس یک متعادل‌ساز^{۲۷} به کمک پاسخ فرکانسی کانال و داده‌های دریافتی، داده‌های ارسالی را تعیین می‌کند. در ادامه به کمک دمدولاسیون دیجیتال داده‌های اصلی بدست می‌آید.

۴ - شبیه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مختلف، آزمایش‌هایی طراحی و اجرا شده است که شرح و نتایج آنها در این فصل بیان می‌گردد. برای مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های رقیب، از سه معیار نرخ خطای بیت، میانگین مربعات خطا و درصد سربار پایلوت استفاده شده است. معیار سربار پایلوت نسبت تعداد پایلوت‌ها به تعداد کل زیرحامل‌ها (اعم از داده و پایلوت) است که معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود. در روش پیشنهادی که بر اساس آرایش پایلوت وفقی است، سربار پایلوت ثابت نمی‌ماند و با

کواریانس خطای حالت و K بهره کالمن است [26], [23]. این روند بازگشتی در طول زمان ادامه می‌یابد.

خروجی فیلتر کالمن تخمینی از فاصله پایلوت‌ها و پاسخ فرکانسی کانال در نقاط پایلوت است. برای بهبود دقت تخمین، از تبدیل فوریه گسسته استفاده می‌شود. این تکنیک امکان کاهش اثرات نویز را فراهم می‌کند. بدین منظور پس از تخمین پاسخ فرکانسی کانال، پاسخ ضربه با عکس تبدیل فوریه گسسته بدست می‌آید. با توجه به تخمین پهنای باند همدوسی، تقریبی از گستردگی تأخیر کانال (T_m) در اختیار است. لذا مقادیر پاسخ کانال در حوزه زمان خارج از این بازه به نویز مربوط می‌شود. با حذف این ضرایب که دیرتر از حداکثر تأخیر کانال ظاهر شده است و بازگشت به حوزه فرکانس به کمک تبدیل فوریه گسسته، تقریب بهتری از پاسخ فرکانسی کانال بدست می‌آید.

روند روش پیشنهادی و جایگاه آن در بلوک دیاگرام شکل ۴ نشان داده شده است. ابتدا داده ورودی توسط دمدولاسیون دیجیتال نگاشت می‌شوند. سپس پایلوت‌ها با توجه به فواصل بهینه وفقی شده در بین داده‌ها جای‌گذاری می‌شوند. در ادامه، پایلوت‌ها به همراه داده‌ها وارد بلوک دمدولاسیون OFDM می‌شوند و سمبل OFDM را تشکیل می‌دهند. در سمت گیرنده دمدولاسیون OFDM اعمال می‌شود و سپس پایلوت‌ها از داده‌های دریافتی جدا می‌شوند و برای محاسبه پهنای باند همدوسی کانال مورد استفاده قرار می‌گیرند. پایلوت‌ها و مقدار پهنای باند همدوسی کانال وارد تخمینگر کالمن می‌شوند. فیلتر کالمن مطابق الگوریتم طراحی شده در هر مرحله به کمک پارامترهای کنترلی به پیش‌بینی و به‌روز رسانی پاسخ فرکانسی کانال در نقاط پایلوت و فواصل پایلوت می‌پردازد تا نزدیک‌ترین مقدار به مقدار واقعی را محاسبه کند. نتیجه تخمین

سناریوی اول یک کانال نوعی است که عملکرد روش‌های مرجع در کارهای گذشته نیز روی این کانال تست شده است. در سناریوی دوم وضعیت محوشوندگی کانال بهتر و در سناریوی سوم بدتر شده است تا عملکرد روش پیشنهادی در هر دو صورت ارزیابی گردد.

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

روش پیشنهادی در نرم افزار متلب شبیه‌سازی و آزمایش‌های مختلفی مطابق با سناریوهای تعریف شده در بخش قبل انجام شده است. روش پیشنهادی با سه روش مقایسه می‌شود. این روش‌ها عبارت است از پایلوت با آرایش شانهای ثابت همراه با تخمینگر کانال کمترین مربعات و درون‌یابی پایین گذر [2]، پایلوت با آرایش شانهای ثابت با تخمینگر کانال فیلتر کالمن و درون‌یابی پایین گذر [23] و پایلوت با آرایش شانهای وقفی با تخمینگر کانال کمترین مربعات و درون‌یابی خطی [16]. نام‌گذاری روش‌های مورد مقایسه در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: نام‌گذاری روش‌های مورد مقایسه

نام روش	آرایش	تخمینگر	درون‌یاب
روش اول (Fixed Pilot-LS)	شانهای ثابت	کمترین مربعات	پایین گذر
روش دوم (Fixed Pilot-Kalman)	شانهای ثابت	فیلتر کالمن	پایین گذر
روش سوم (Adaptive Pilot-LS)	شانهای وقفی	کمترین مربعات	خطی
روش پیشنهادی (Adaptive Pilot-Kalman)	شانهای وقفی	فیلتر کالمن	اسپلاین

نمودارها با تکرار مونت کارلو^{۲۸} استخراج شده است. هر آزمایش برای هر SNR به تعداد ۱۰۰ بار تکرار شده و میانگین BER و سربار پایلوت ثبت و ترسیم گردیده است. در هر تکرار ۲۲۰ هزار بیت آزموده شده است.

پیش از انجام آزمایش‌های اصلی بر اساس سناریوی مفروض، اثر مرتبه مدولاسیون روی روش پیشنهادی ارزیابی شده است. شکل ۵ معیار BER را بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ روی کانال با شرایط سناریوی اول و فرکانس داپلر ۵۰ هرتز نشان می‌دهد. نمودارهای مربوط به مدولاسیون‌های M-PSK و M-QAM با مرتبه‌های مختلف رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش مرتبه مدولاسیون معیار BER کاهش می‌یابد؛ یعنی روش پیاده‌سازی شده رفتاری منطقی از خود نشان می‌دهد و تفاوت صحیح راندمان توان مدولاسیون‌ها در خروجی این شبیه‌سازی دیده می‌شود. بنابراین انتخاب نوع مدولاسیون حساسیت و تأثیر ویژه‌ای ندارد. از این رو در تمام آزمایش‌های بعدی، هم روش پیشنهادی و هم روش‌های رقیب با مدولاسیون یکسان BPSK اجرا و مقایسه می‌شود.

زمان تغییر می‌کند. لذا این نسبت پس از اتمام هر مرحله شبیه‌سازی و به ازای کل سمبل‌های OFDM محاسبه شده است:

$$(13) \quad \text{تعداد زیرحامل‌های داده} + \text{تعداد پایلوت‌ها} = \frac{\text{تعداد پایلوت‌ها}}{\text{درصد سربار پایلوت}}$$

۴-۱- پارامترهای شبیه‌سازی

پارامترهای سیستم OFDM در شبیه‌سازی به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱: پارامترهای مدل سیستم OFDM در شبیه‌سازی

پارامترها	مقادیر
اندازه FFT (N_{FFT})	256
پهنای باند (BW)	5 MHz
طول سمبل (N)	256
طول پیشوند چرخشی (CP)	32
فرکانس نمونه برداری (f_s)	10 MHz
زمان هر سمبل (T_s)	$T_s = \frac{1}{f_s} = 0.1 \mu s$
زمان پیشوند چرخشی (T_{CP})	$T_{CP} = CP \times T_s = 3.2 \mu s$
زمان سمبل OFDM (T_{sym})	$T_{sym} = (CP + N) \times T_s = 28.8 \mu s$
منظومه سیگنال	M-PSK, M-QAM
مدل کانال	Rayleigh (Jakes spectrum)
مدل نویز	AWGN
تعداد مسیرهای کانال (L)	3

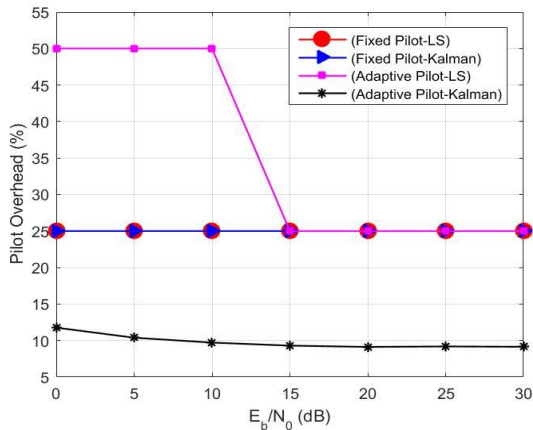
کانال بی‌سیم به صورت یک کانال با محوشوندگی رایلی و نویز سفید گوسی با L مسیر فرض می‌شود.

$$(14) \quad h(\tau) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_l \delta(t - \tau_l)$$

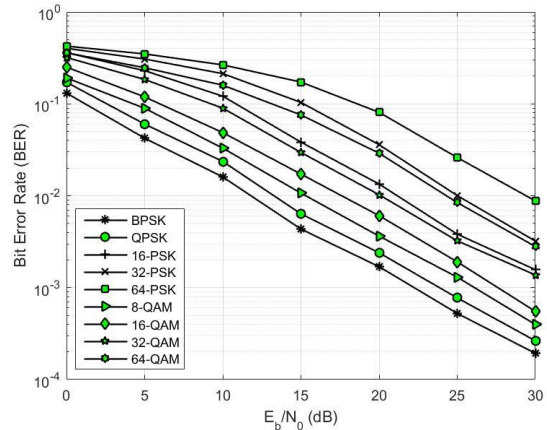
α_l ضریب هر مسیر کانال است که توزیع گوسی دارد، لذا توان هر مسیر متغیر تصادفی با توزیع رایلی است. همچنین توزیع طیف توان این کانال با تابع Jakes مدل می‌شود. در این سناریوها کانالی با فرکانس نمونه برداری ۱۰ مگاهرتز و شرایط مختلفی با توجه به تأخیر مسیره‌ها، توان یا افت متوسط هر مسیر و حداکثر شیفت داپلر در نظر گرفته شده است. سناریوهای شبیه‌سازی بر اساس شرایط کانال مطابق جدول زیر است.

جدول ۲: سناریوهای مختلف شبیه‌سازی

سناریو	تأخیر مسیره‌ها (μs)	بهره متوسط مسیره‌ها (dB)	حداکثر شیفت داپلر (Hz)
سناریوی اول	[0 0.1 0.3]	[0 -5 -10]	50, 200
سناریوی دوم	[0 0.1]	[0 -20]	200
سناریوی سوم	[0 0.2 1]	[0 -5 -10]	200



شکل ۷: مقایسه معیار سربار پایلوت بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی اول با فرکانس داپلر ۵۰ هرتز

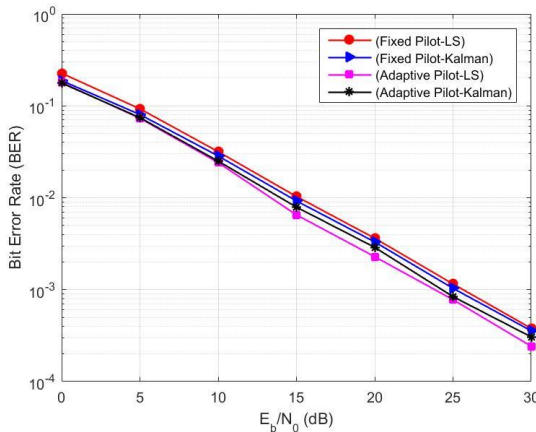


شکل ۵: مقایسه معیار BER بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای مدولاسیون‌های مختلف

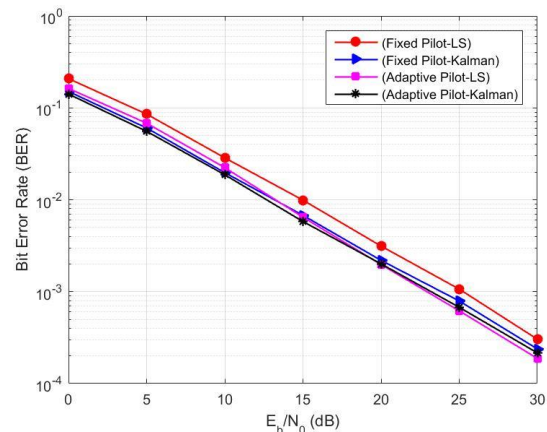
آزمایش اول: مقایسه روش‌ها در سناریوی اول

شکل ۸ و شکل ۹ معیارهای BER و سربار پایلوت را بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای کانال سناریوی اول با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز نشان می‌دهد. در این حالت نیز عملکرد روش‌ها از نظر معیار BER تفاوت چشمگیری ندارد. روش پایلوت وفقی با تخمینگر LS بهترین عملکرد را دارد و روش پیشنهادی در رده پس از آن قرار می‌گیرد. البته روش پیشنهادی با سربار پایلوتی در حدود ۹ درصد در SNR بر بیت ۲۰ دسیبل به این عملکرد رسیده است ولی سایر روش‌ها سربار پایلوت ۲۵ درصدی دارند.

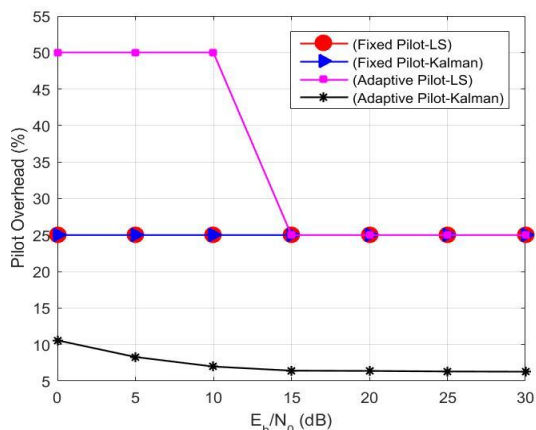
شکل ۶ و شکل ۷ معیارهای BER و سربار پایلوت را بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای کانال سناریوی اول با فرکانس داپلر ۵۰ هرتز نشان می‌دهد. عملکرد روش‌ها از نظر معیار BER نزدیک یکدیگر است؛ ولی باید توجه داشت درصد سربار پایلوت در روش پیشنهادی خیلی کمتر از سایر روش‌هاست. در SNR بر بیت ۲۰ دسیبل، روش پیشنهادی با سربار پایلوتی در حدود ۹ درصد به این عملکرد رسیده است و سایر روش‌ها سربار پایلوت ۲۵ درصدی دارند. البته در SNR بر بیت پایین مقدار سربار پایلوت برای روش پایلوت وفقی با تخمینگر LS، ۵۰ درصد است.



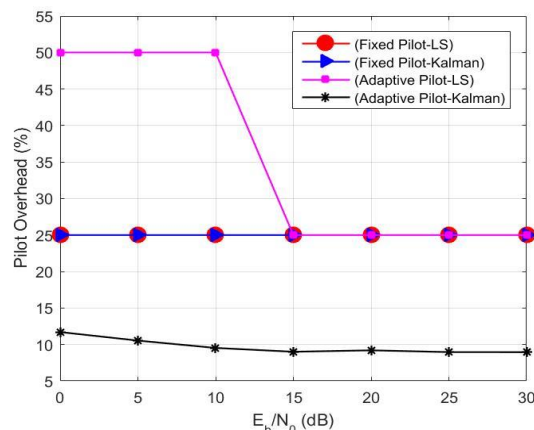
شکل ۸: مقایسه معیار BER بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی اول با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز



شکل ۶: مقایسه معیار BER بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی اول با فرکانس داپلر ۵۰ هرتز



شکل ۱۱: مقایسه معیار سربار پایلوت بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی دوم با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز



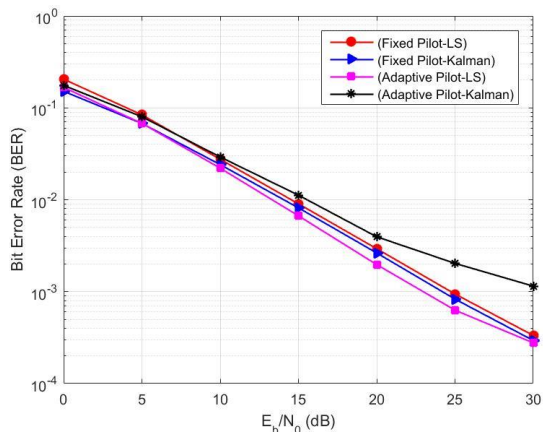
شکل ۹: مقایسه معیار سربار پایلوت بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی اول با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز

آزمایش سوم: مقایسه روش‌ها در سناریوی سوم

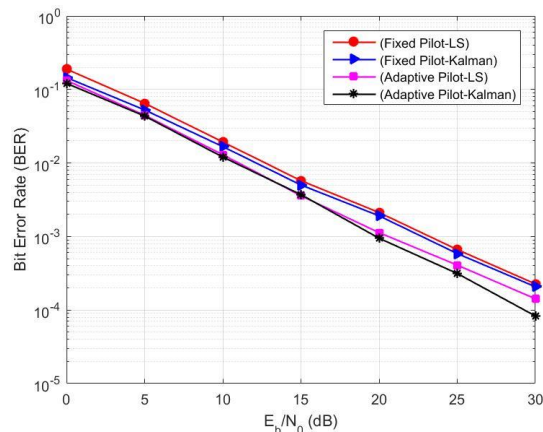
شکل ۱۲ و شکل ۱۳ معیارهای BER و سربار پایلوت را بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای کانال در سناریوی سوم با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز نشان می‌دهد. مقادیر BER در همه روش‌ها نزدیک به یکدیگر است. البته اختلاف BER در روش پیشنهادی نسبت به روش پایلوت وفقی با تخمینگر LS که بهترین عملکرد را دارد بیشتر شده است که به دلیل شدیدتر بودن چندمسیرگی در کانال این سناریو است. ولی باید توجه داشت درصد سربار پایلوت در روش پیشنهادی افزایش نیافته است و این نتایج با همان ۱۰ درصد سربار پایلوت حاصل شده است.

آزمایش دوم: مقایسه روش‌ها در سناریوی دوم

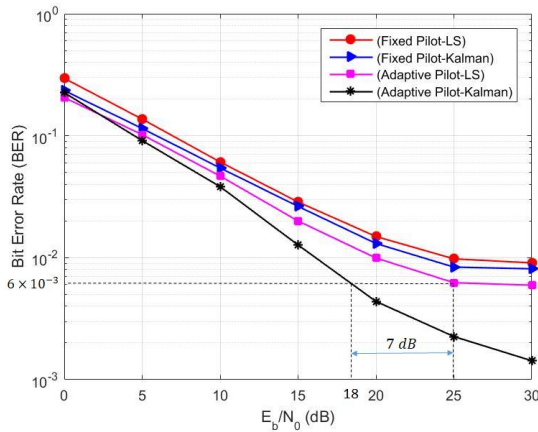
شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب معیارهای BER و سربار پایلوت را بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای کانال در سناریوی دوم با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز نشان می‌دهد. عملکرد روش‌ها از نظر معیار BER نزدیک به یکدیگر است؛ البته روش پیشنهادی عملکرد بهتری دارد که در SNR بر بیت بالاتر محسوس است. در SNR بر بیت ۲۰ دسیبل، روش پیشنهادی با سربار پایلوتی در حدود ۶ درصد به این عملکرد رسیده است و سایر روش‌ها سربار پایلوت ۲۵ درصدی دارند.



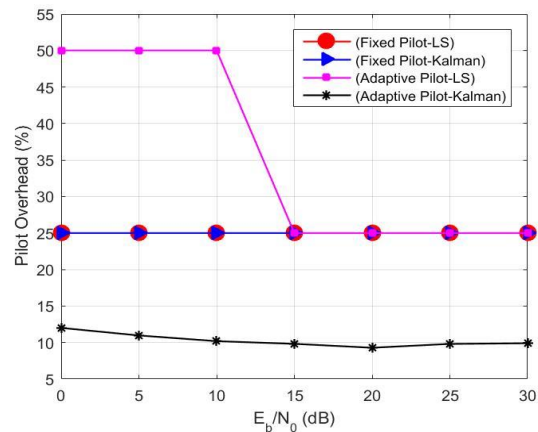
شکل ۱۲: مقایسه معیار BER بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی سوم با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز



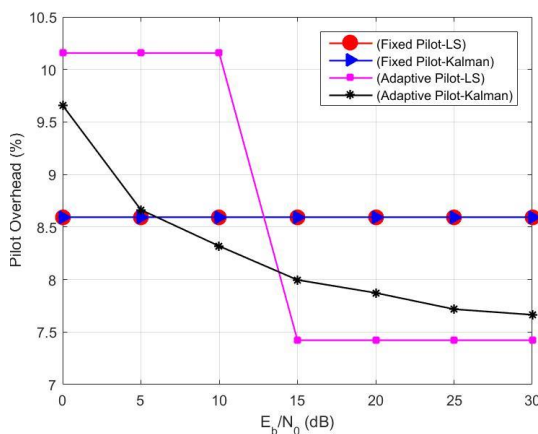
شکل ۱۰: مقایسه معیار BER بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی دوم با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز



شکل ۱۴: مقایسه معیار BER بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی سوم با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز



شکل ۱۳: مقایسه معیار سربار پایلوت بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی سوم با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز



شکل ۱۵: مقایسه معیار سربار پایلوت بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای سناریوی سوم با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز

آزمایش چهارم: مقایسه با سربار پایلوت مشابه

در آزمایش گذشته مشاهده شد کاهش قابل توجه درصد سربار پایلوت نسبت به سایر روش‌ها موجب شده است مقدار BER در روش پیشنهادی کمی افزایش یابد. اکنون این پرسش مطرح می‌شود که اگر اجازه تخریب BER با کاهش تراکم پایلوت‌ها در سایر روش‌ها نیز مجاز باشد، عملکرد آن‌ها در مقایسه با روش پیشنهادی چگونه است. بدین منظور باید همه روش‌ها با تراکم پایلوت مشابه یکدیگر پیاده‌سازی گردد. در آخرین آزمایش به دنبال این هدف هستیم، لذا سربار پایلوت همه روش‌ها در حد روش پیشنهادی کاهش داده می‌شود تا میزان تخریب عملکرد آن‌ها بر اساس معیار BER ارزیابی گردد. این تست با سناریوی سوم برای کانال با فرکانس داپلر ۲۰۰ هرتز انجام شده است که بدترین شرایط کانال در مجموع این آزمایش‌هاست.

شکل ۱۴ و شکل ۱۵ معیارهای BER و سربار پایلوت را بر حسب $\frac{E_b}{N_0}$ برای کانال در سناریوی سوم نشان می‌دهد. در حالی که میانگین سربار پایلوت در تمام روش‌ها حدود ۸/۵ درصد است، روش پیشنهادی بهترین عملکرد (کمترین BER) را دارد. روش پیشنهادی با SNR بر بیت ۱۸ دسیبل به احتمال خطایی برابر با 6×10^{-2} دست می‌یابد در حالی که روش رقیب با SNR بر بیت ۲۵ دسیبل به همان احتمال خطا می‌رسد که به معنای ۷ دسیبل بهبود در SNR است.

۵ - نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی برای وفقی‌سازی آرایش پایلوت به کمک فیلتر کالمن ارائه شد. وفقی‌سازی پایلوت در منابع گذشته به صورت گسسته انجام شده است، یعنی محل‌های مجاز برای پایلوت‌ها یا گام‌های تغییر فاصله آن‌ها از پیش تعیین شده است. در روش پیشنهادی این فاصله فرکانسی می‌تواند بر اساس نتیجه تخمینگر

کالمن هر مقداری اختیار کند، لذا آرایش‌های پایلوت متنوعی بر اساس این مقدار قابل اجراست. همچنین این فیلتر کالمن در ادغام با تخمینگر پاسخ فرکانسی کانال پیاده‌سازی می‌شود.

عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مختلف ارزیابی و با سه روش پرکاربرد پیشین مقایسه گردید. این ارزیابی و مقایسه‌ها بر مبنای معیارهای BER و درصد سربار پایلوت بر روی کانال با شرایط مختلف انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد تمام روش‌ها در کانال یکسان، از نظر BER عملکرد مشابهی دارند، اما روش پیشنهادی در SNR بر بیت ۲۰ دسیبل با کاهش حداقل ۱۵ درصدی سربار پایلوت، از نظر نرخ ارسال داده عملکردی به مراتب بهتر از سایر روش‌ها دارد. از زاویه دیگر، اگر تمام روش‌ها درصد سربار پایلوت مشابهی نزدیک ۸/۵ درصد داشته باشند، روش پیشنهادی BER کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارد که این بهبود عملکرد، بهره‌ای در حدود ۷ دسیبل به ازای BER برابر با 6×10^{-3} دارد. بنابراین با استفاده از روش

channels," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–11, 2012.

[13] M. Karami and N. C. Beaulieu, "Channel adaptive power allocation and pilot optimization for OFDM systems," *GLOBECOM - IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, pp. 4893–4898, 2012.

[14] M. Simko, P. S. R. Diniz, Q. Wang, and M. Rupp, "Adaptive pilot-symbol patterns for MIMO OFDM systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 9, pp. 4705–4715, 2013.

[15] Y. Kim, G. Miao, and T. Hwang, "Energy efficient pilot and link adaptation for mobile users in TDD multi-user MIMO systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 382–393, 2014.

[16] C. Rezgui and K. Grayaa, "An enhanced channel estimation technique with adaptive pilot spacing for OFDM system," *Int. Symp. Networks, Comput. Commun. ISNCC*, pp. 1–4, 2016.

[17] N. Ksairi, B. Tomasi, and S. Tomasin, "Pilot pattern adaptation for 5G MU-MIMO wireless communications," *IEEE Work. Signal Process. Adv. Wirel. Commun. SPAWC*, pp. 1–6, 2016.

[18] Z. Sheng, H. D. Tuan, Y. Fang, H. H. M. Tam, and Y. Sun, "Data rate maximization based power allocation for OFDM System in a high-speed train environment," *2015 IEEE Glob. Conf. Signal Inf. Process. Glob. 2015*, no. 2, pp. 265–269, 2016.

[19] R. M. Rao, V. Marojevic, and J. H. Reed, "Adaptive Pilot Patterns for CA-OFDM Systems in Nonstationary Wireless Channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 2, pp. 1231–1244, 2018.

[20] P. Sure and C. Mohan, "A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising strategies," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 2, pp. 629–636, 2017.

[21] A. M. Khan, V. Jeoti, and M. A. Zakariya, "Improved Pilot – based LS and MMSE Channel Estimation using DFT for DVB-T OFDM Systems," *IEEE Symp. Wirel. Technol. Appl.*, pp. 120–124, 2013.

[22] M. Morelli and U. Mengali, "A Comparison of Pilot-Aided Channel Estimation Methods for OFDM Systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 49, no. 12, pp. 3065–3073, 2001.

[23] O. M. Elbadri and A. S. Elbarsha, "Kalman-Filter Channel Estimator for OFDM System In Time-Varying Channel," *Univ. Benghazi-Al-Adab J.*, vol. 23, pp. 92–95, 2016.

[24] J. Rinne and M. Renfors, "Pilot Spacing In Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems On Practical Channels," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 42, no. 4, pp. 959–962, 1996.

[25] D. Manolakis, V. Ingle and S. Kogon, *Statistical and Adaptive Signal Processing*, Artech House, 2005.

[26] S. K. Wang and D. C. Chang, "Pilot-aided channel estimation methods for ICI reduction in mobile OFDM systems," *6th IEEE Consum. Commun. Netw. Conf. CCNC*, pp. 1–5, 2009.

پیشنهادی می‌توان از سربار پایلوت غیرضروری جلوگیری کرد و نرخ انتقال داده یا به عبارت دیگر بهره‌وری طیفی را افزایش داد.

مراجع

[1] Y. Liu, Z. Tan, H. Hu, L. J. Cimini, and G. Y. Li, "Channel Estimation for OFDM," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 1891–1908, 2014.

[2] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems," *Proc. IEEE 56th Veh. Technol. Conf.*, vol. 48, no. 3, pp. 223–229, 2002.

[3] L. U. Khan, S. A. Mahmud, G. M. Khan, M. H. Zafar, and M. Ashraf, "Channel Estimation based on Non-Equally Spaced Pilot Allocation in OFDM System," in *6th Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEEC)*, 2014, pp. 139–143.

[4] F. Salman, J. Cosmas, and Y. Zhang, "Modelling and performance of a DVB-T2 channel estimator and equaliser for different pilot patterns," *IEEE Int. Symp. Broadband Multimed. Syst. Broadcast. BMSB*, pp. 1–6, 2012.

[5] J. Choi and Y. Lee, "Optimum Pilot Pattern for Channel Estimation in OFDM Systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 4, no. 5, pp. 2083–2088, 2005.

[6] F. Sanzi and J. Speidel, "An Adaptive Two-Dimensional Channel Estimator for Wireless OFDM with Application to Mobile DVB-T," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 46, no. 2, pp. 128–133, 2000.

[7] O. Simeone and U. Spagnolini, "Adaptive pilot pattern for OFDM systems," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2, pp. 978–982, 2004.

[8] R. C. Cannizzaro, P. Banelli, and G. Leus, "Adaptive Channel Estimation for OFDM Systems with Doppler spread," *IEEE 7th Work. Signal Process. Adv. Wirel. Commun.*, pp. 1–5, 2007.

[9] A. R. Ali, A. Balalem, T. Khazada, J. Machac, and A. Omar, "Adaptive pilot distribution for OFDM systems in time-variant channels," *Proc. 2008 Asia Pacific Microw. Conf. APMC 2008*, vol. 1, no. 1, pp. 3–6, 2008.

[10] W. M. Afifi and H. M. Elkamchouchi, "A New Adaptive Channel Estimation for Frequency Selective Time Varying Fading OFDM Channels," *Int. Conf. Comput. Eng. Syst.*, pp. 573–578, 2009.

[11] J. Byun and N. P. Natarajan, "Adaptive pilot utilization for OFDM channel estimation in a time varying channel," *2009 IEEE 10th Annu. Wirel. Microw. Technol. Conf. WAMICON 2009*, no. 1, pp. 3–7, 2009.

[12] M. Simko, P. S. R. Diniz, Q. Wang, and M. Rupp, "Power efficient pilot symbol power allocation under time-variant

زیرنویس‌ها:

¹⁵ Multilevel Phase Shift Keying

¹⁶ Multilevel Quadrature Amplitude Modulation

¹⁷ Pilot Insertion

¹⁸ Cyclic Prefix (CP)

¹⁹ Inter Symbol Interference (ISI)

²⁰ Additive white Gaussian noise (AWGN)

²¹ Equalizer

²² Terrain

²³ Propagation Environment

²⁴ Obstructions

²⁵ Line of Sight (LOS)

²⁶ Autoregressive (AR)

²⁷ Equalization

²⁸ Monte Carlo

¹ Wireless

² Multi-path

³ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

⁴ Fading

⁵ Coherent

⁶ Channel Estimation

⁷ Block-Type

⁸ Comb-Type

⁹ Mean Square Error (MSE)

¹⁰ Bit Error Rate (BER)

¹¹ Throughput

¹² Least Square (LS)

¹³ Minimum Mean-Square Error (MMSE)

¹⁴ Maximum Likelihood (ML)