

Vol. 12/ No. 48/Summer 2023

Research Article

# A Novel Iterative Channel Estimation Technique for Multipath Fading Channels in MIMO-OFDM Using Auxiliary Pilots

Seyed Hamidreza Mirsalari, PhD Student<sup>1</sup>  | Afrooz Haghbin, Assistant Professor<sup>2\*</sup>  | Farbod Razzazi, Associate Professor<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [hr.mirsalari@gmail.com](mailto:hr.mirsalari@gmail.com)

<sup>2</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [a.haghbin@srbiau.ac.ir](mailto:a.haghbin@srbiau.ac.ir)

<sup>3</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [razzazi@srbiau.ac.ir](mailto:razzazi@srbiau.ac.ir)

#### Correspondence

Afrooz Haghbin, Assistant Professor of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [a.haghbin@srbiau.ac.ir](mailto:a.haghbin@srbiau.ac.ir)

**Received:** 13 October 2022

**Revised:** 11 December 2022

**Accepted:** 13 January 2022

## Abstract

The paper proposes a novel iterative channel estimation technique for multipath fading channels in Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MIMO-OFDM) systems with Gaussian noise and impulse noise. MIMO-OFDM systems can be beneficial if the estimated channel quality is assured at the receiver. The paper also proposes an auxiliary pilot for channel re-estimation based on some reliably retrieved data symbols. In subsequent iterations, adding new auxiliary pilots improves channel estimation accuracy. The correlation between the data channel coefficients and the original pilots is used to select reliable data. Since iterative channel estimation is time-consuming, using a channel estimator with a low processing time and computational complexity is imperative. An easy-to-implement baseline least squares (LS) method is used in the proposed estimator. According to the simulation results, the proposed iterative channel estimation technique improves MIMO-OFDM performance by increasing the number of pilots in subsequent iterations compared to the conventional channel estimation techniques.

**Keywords:** MIMO-OFDM, Multi-Path Fading, Auxiliary Pilots, Channel Re-estimation.

## Highlights

- Presenting an iterative channel estimation method with low complexity and simple implementation
- Increasing the number of pilots in the receiver without increasing the number of pilots on the transmitter side (increasing resource efficiency)
- Improve estimation accuracy in each iteration by using auxiliary pilots extracted from quality retrieved data
- Improving system performance in the presence of high-energy impulse noise

**Citation:** S. H. Mirsalari, A. Haghbin, and F. Razzazi, "A Novel Iterative Channel Estimation Technique for Multipath Fading Channels in MIMO-OFDM Using Auxiliary Pilots," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 48, pp. 1–12, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1969332.1174, (in Persian).

## تخمین کانال تکرار شونده جدید با استفاده از پایلوت‌های کمکی برای کانال محوشدگی چندمسیره در سیستم MIMO-OFDM

سید حمیدرضا میرسالاری<sup>1</sup> | افروز حق بین\*<sup>2</sup> | فرید رزازی<sup>3</sup> ID

### چکیده:

در این مقاله یک روش تخمین کانال تکرار شونده در کانال محوشدگی چندمسیره برای یک سیستم چند ورودی - چند خروجی با تقسیم فرکانسی چندگانه متعامد (MIMO-OFDM) در حضور نویز گوسی و ضربه‌ای پیشنهاد می‌دهیم. مزایای سیستم‌های MIMO-OFDM زمانی قابل درک است که کیفیت تخمین کانال در گیرنده تضمین شده باشد. ما در این مقاله پیشنهاد می‌کنیم که بخشی از سمبل‌های داده بازبازی شده قابل اعتماد را به‌عنوان پایلوت کمکی برای تخمین مجدد کانال در نظر بگیریم. با اضافه کردن پایلوت‌های کمکی جدید به پایلوت‌های اصلی دقت تخمین کانال در تکرارهای بعدی بهبود می‌یابد. برای انتخاب داده‌های قابل اعتماد ما از معیار همبستگی بین ضرایب کانال داده با پایلوت‌های اصلی بهره می‌بریم. با این حال استفاده از تخمین کانال تکرار شونده زمان‌بر است، بنابراین لازم است از تخمین‌گر کانالی که زمان پردازش کم و پیچیدگی محاسباتی پایینی دارد، استفاده شود. ما در تخمین‌گر پیشنهادی از روش پایه حداقل مربعات (LS) که پیاده‌سازی بسیار ساده‌ای دارد استفاده کردیم. نتایج شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که روش تکرار شونده پیشنهادی با افزایش پایلوت‌ها در تکرارهای بعدی در مقایسه با روش‌های کلاسیک موجود عملکرد سیستم MIMO-OFDM را بهتر می‌کند.

کلید واژه‌ها: MIMO-OFDM، محوشدگی چندمسیره، پایلوت‌های کمکی، تخمین مجدد کانال

<sup>1</sup>دانشجو دکتری مهندسی برق، دانشکده برق و کامپیوتر - علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، hr.mirsalari@gmail.com

<sup>2</sup>استادیار گروه برق، دانشکده برق و کامپیوتر - علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، a.hagbhin@srbiau.ac.ir

<sup>3</sup>دانشیار گروه برق، دانشکده برق و کامپیوتر - علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، razzazi@srbiau.ac.ir

نویسنده مسئول

\*افروز حق بین، استادیار گروه برق، دانشکده برق و کامپیوتر - علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، a.hagbhin@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۱ مهر ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۲۰ آذر ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۳ بهمن ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1969332.1174>

### ۱-مقدمه

امروزه تقسیم فرکانسی چندگانه متعامد (OFDM)<sup>1</sup> به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم مورد استفاده قرار می‌گیرد که قادر به ارائه نرخ داده نسبتاً بالا است. همچنین استفاده از چند ورودی-چند خروجی (MIMO)<sup>2</sup> باعث افزایش ظرفیت و نرخ ارسال داده در یک کانال محوشدگی می‌شود. طبیعی است که ترکیب MIMO و OFDM انتقال داده باکیفیت بالا را پشتیبانی کند؛ بنابراین، MIMO-OFDM به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های بی‌سیم مدرن استفاده می‌شود [۱-۳]. این سیستم‌ها برای دسترسی به داده‌های باکیفیت بالا غالباً نیاز به داشتن اطلاعات دقیقی از وضعیت کانال مربوطه دارند. در عمل،

<sup>1</sup> Orthogonal Frequency Division Multiplexing

<sup>2</sup> Multiple Input-Multiple Output

اطلاعات وضعیت کانال به‌ندرت برای یک سیستم بی‌سیم از قبل در دسترس بوده و لذا لازم است که این اطلاعات در گیرنده تخمین زده شود. بنابراین تخمین کانال سریع، دقیق و با پیچیدگی کم یکی از مشکلات اساسی در سیستم‌های بی‌سیم با توجه به کانال‌های بی‌سیم متغیر با زمان است که در طراحی گیرنده بسیار ضروری است. تخمین مناسب بر روی همسان‌سازی سمبل‌های دریافتی در سمت گیرنده و کیفیت داده‌های بازیابی شده تأثیر مستقیم دارد که بر اساس آن نرخ خطا کاهش می‌یابد [۴].

برای تخمین کانال دو روش تخمین کلاسیک حداقل مربعات (LS<sup>۱</sup>) و حداقل میانگین مربع خطا (MMSE<sup>۲</sup>) وجود دارد. از آنجا که LS بدون نیاز به دانشی درباره اطلاعات آماری کانال پاسخ کانال را به دست آورد، عملکرد تخمین به‌اندازه کافی خوب نیست ولی ویژگی مهم آن پیچیدگی محاسباتی کم و پیاده‌سازی ساده آن است. عملکرد تخمین می‌تواند تا حد زیادی با استفاده از اطلاعات آماری کانال بهبود یابد. در این حالت تخمین‌گر MMSE عملکرد قابل ملاحظه‌ای دارد، ولی پیچیدگی نیز با توجه به نیاز به انجام ماتریس معکوس افزایش می‌یابد. همچنین اطلاعات آماری موردنیاز همیشه در گیرنده در دسترس نیست و یا ممکن است با توجه به کانال بی‌سیم متغیر با زمان تغییر کنند [۴-۶]. به‌طور کلی، MMSE بهتر از LS عمل می‌کند ولی به دلیل وابستگی آن به آماره‌های کانال و نویز پیچیدگی آن بالا است. باین‌حال، همان‌طور که در مرجع [۷] نشان داده شده است MMSE در مقادیر کم نسبت سیگنال به نویز (SNR<sup>۳</sup>) عملکرد بهتری را ارائه می‌دهد ولی برای مقادیر SNR بالا عملکرد آن کاهش می‌یابد.

با افزایش پایلوت‌ها می‌توان کیفیت تخمین کانال را در گیرنده بهبود بخشید ولی نرخ ارسال داده کاهش خواهد یافت. می‌توان بخشی از سمبل‌های داده بازیابی شده قابل اعتماد در گیرنده را به‌عنوان پایلوت کمکی برای تخمین مجدد کانال در نظر گرفت، که این روش اغلب به‌عنوان تخمین کانال مبتنی بر تصمیم-مستقیم (DD-CE<sup>۴</sup>) نامیده می‌شود [۸،۹]. در این روش از سمبل‌های داده بازیابی شده (بخشی از آن‌ها) به‌عنوان پایلوت کمکی در تخمین مجدد کانال استفاده می‌شود. در این حالت قابلیت اطمینان سمبل‌های داده شناسایی شده برای تخمین مجدد یک امر بسیار مهم است، زیرا کیفیت تخمین کانال را به خطر می‌اندازد. روشی مانند بازخورد تصمیم (DF<sup>۵</sup>) از تمام داده‌های بازیابی شده برای تخمین مجدد استفاده می‌کنند که می‌تواند منجر به انتشار خطا در تکرارهای بعدی شود و در نتیجه کیفیت تخمین ممکن است به دلیل خطای داده بازیابی شده به خطر بیفتد [۱۰،۱۱]. بنابراین با انتخاب بخشی از داده‌های بازیابی شده مطمئن به‌عنوان پایلوت‌های کمکی و اضافه کردن آن‌ها به پایلوت‌های اصلی در تکرارهای بعدی می‌توان کیفیت تخمین را بهبود بخشید و در نتیجه عملکرد سیستم را افزایش داد.

همچنین استفاده از تخمین تکرارشونده در گیرنده زمان‌بر خواهد بود، بنابراین استفاده از روش‌های تخمینی که پیچیدگی محاسباتی پایینی و زمان پردازش بسیار کمی دارند، یک اولویت است. در مراجع [۱۲،۱۳] تخمین تکرارشونده با انتخاب پایلوت‌های کمکی استفاده می‌شود که از تخمین‌گر MMSE که پیچیدگی بالایی نسبت به LS دارد بهره می‌برد و با تکرار مجدد نیز قطعاً زمان پردازش افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. ما در این مقاله، یک روش تخمین تکرارشونده با استفاده از روش ساده LS ارائه خواهیم داد. با انتخاب بخش قابل اطمینانی از داده‌های بازیابی شده به‌عنوان پایلوت کمکی در تکرار بعدی تعداد پایلوت‌ها را افزایش می‌دهیم و در نتیجه دقت تخمین افزایش می‌یابد. انتخاب پایلوت‌های کمکی از ضرایب کانال داده‌ها می‌بایست طوری باشد که مجموعه انتخابی (پایلوت‌های کمکی) همبستگی بالایی با ضرایب پایلوت‌های اصلی داشته باشند. بنابراین برای انتخاب آن‌ها از آزمون همگنی واریانس استفاده می‌کنیم که یک آزمون استنباطی است و مجموعه‌ای که کمترین اختلاف واریانس با مجموعه اصلی (کمتر از ۰/۰۵) و کمترین اختلاف میانگین با میانگین مجموعه اصلی را داشته باشد دارای بیشترین همبستگی با آن است. بنابراین مجموعه انتخاب‌شده شرایط تقریباً مشابهی با پایلوت‌های اصلی را در کانال انتقال تجربه کرده و می‌توانند به‌عنوان پایلوت کمکی در تخمین مجدد کانال استفاده شوند.

<sup>۱</sup> Least Squares

<sup>۲</sup> Minimum Mean Square Error

<sup>۳</sup> Signal-to-Noise Ratio

<sup>۴</sup> Decision-Directed Channel Estimation

<sup>۵</sup> Decision Feedback

بقیه این مقاله به صورت زیر تنظیم شده است. در بخش دوم، خلاصه‌ای از یک سیستم MIMO-OFDM با حضور نویز گوسی و ضربه‌ای ارائه می‌دهیم. همچنین مدل کانال محوشدگی چندمسیره را به صورت یک فیلتر <sup>۱</sup>AR به طور خلاصه بیان می‌کنیم. در بخش سوم، ما روش تخمین کانال پیشنهادی و روش‌های تخمین معمولی را ارائه می‌دهیم. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی ارائه خواهد شد و نتیجه‌گیری این مقاله در بخش ۵ بیان می‌شود.

## ۲- مدل سیستم

یک سیستم MIMO-OFDM استاندارد با  $T$  آنتن فرستنده و  $R$  آنتن گیرنده و  $K$  زیرحامل برای هر سمبل OFDM را در نظر بگیرید. بیت‌های اطلاعات توسط یک کدکننده توربو همراه با درهم‌نه کد شده و سپس توسط مدولاسیون <sup>۲</sup>QAM مدوله می‌شوند. سپس سمبل‌های پایلوت به موقعیت‌های از پیش تعیین شده تخصیص داده می‌شوند و سمبل‌های داده بقیه زیر حامل‌ها را پر می‌کنند. سمبل‌های تولید شده برای یک سمبل OFDM از طریق تبدیل فوریه معکوس گسسته (<sup>۳</sup>IDFT) به حوزه زمان تبدیل می‌شوند. در خروجی IDFT (یعنی در حوزه زمان) پیشوند دوره‌ای (CP) <sup>۴</sup> به طول  $N_g$  که یکی از آخرین قسمت سمبل OFDM جاری است، در ابتدای هر سمبل برای جلوگیری از تداخل بین سمبل‌های (ISI) <sup>۵</sup> اعمال می‌شود و طول آن که  $N_g$  فرض می‌شود نباید از طول کانال کوچک‌تر باشد. سیگنال‌های ارسالی از طریق کانال محوشدگی چندمسیره که به صورت یک فیلتر AR متغیر با زمان مدل می‌شود، انتشار می‌یابند. پس از حذف CP از سیگنال دریافتی سمبل‌های OFDM از طریق تبدیل فوریه گسسته (<sup>۶</sup>DFT) به حوزه فرکانس تبدیل می‌شوند. بنابراین سیگنال دریافتی در  $n$  آنتن گیرنده برای  $n$  آنتن سمبل OFDM در حوزه فرکانس را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$\mathbf{Y}_r[n] = \sum_{t=1}^T \text{diag} \left\{ \mathbf{F}[\mathbf{h}_{r,t}, \mathbf{0}_{1 \times (K-L)}] \right\}^T \times \mathbf{X}_t[n] + \mathbf{n}_r[n] \quad (1)$$

$$\mathbf{h}_{r,t} = [h_{r,t}(1), h_{r,t}(2), \dots, h_{r,t}(L)]$$

که  $\mathbf{h}_{r,t}$  پاسخ ضربه کانال با طول  $L$  مسیر از  $t$  آنتن ارسال به  $n$  آنتن دریافتی است و  $\mathbf{F}$  و  $\mathbf{n}_r[n]$  به ترتیب بردار نویز گوسی سفید جمعی (AWGN) با واریانس  $\sigma_n^2$  و ماتریس DFT هستند. همچنین  $\mathbf{X}_t[n]$  بردار  $K \times 1$  ارسال شده توسط  $t$  آنتن است. در یک نمایش فشرده، بلوک دریافتی  $n$  آنتن سمبل OFDM در گیرنده را می‌توان به صورت زیر نوشته شود:

$$\mathbf{Y}[n] = \mathbf{H}[n]\mathbf{X}[n] + \mathbf{n}[n]$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{1,1} & \cdots & \mathbf{H}_{1,T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{R,1} & \cdots & \mathbf{H}_{R,T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{n}_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_{r,t} = \text{diag} \left\{ \mathbf{F}[\mathbf{h}_{r,t}, \mathbf{0}_{1 \times (K-L)}] \right\}^T \quad (3)$$

که در این رابطه  $\mathbf{Y}_r$ ،  $\mathbf{X}_t$  و  $\mathbf{n}_r$  بردارهای  $K \times 1$  هستند.

یک کانال عملی نه تنها توسط نویز پس‌زمینه گوسی بلکه همچنین از نویز غیر گوسی مانند تداخل ضربه‌ای نیز تأثیر می‌پذیرد، که این نویز ضربه‌ای می‌تواند باعث خطاهای بزرگ در گیرنده شود. نویز ضربه‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد سیستم‌های ارتباطی را از نظر نرخ خطای بیت (BER) <sup>۷</sup> تحت تأثیر قرار دهد. از آنجاکه زمان رسیدن این ضربه‌ها غیرقابل پیش‌بینی است و غالباً دامنه بسیار بالایی دارند، در نتیجه انرژی زیادی نیز دارند که می‌تواند بسیار بیشتر از انرژی سیگنال اصلی باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که ماهیت نویز ضربه‌ای را می‌توان با توزیع‌هایی مانند توزیع کلاس A، توزیع

<sup>1</sup> AutoRegressive

<sup>2</sup> Quadrature Amplitude Modulation

<sup>3</sup> Inverse Discrete Fourice Transform

<sup>4</sup> Cyclic Prefix

<sup>5</sup> Inter Symbol Interference

<sup>6</sup> Discrete Fourice Transform

<sup>7</sup> Bit Errore Rate

برنولی-گوسی، توزیع لاپلاس و گوسی به خوبی توصیف کرد. معمولاً این نویز ضربه‌ای که کانال را غیرخطی می‌کند، با فرآیند برنولی - گوسی در بیشتر مقالات مدل می‌شود [۱۴، ۱۵].

نویز ضربه‌ای با فرآیند  $i(m)=G(m)\lambda(m)$  مدل می‌شود که  $G$  دارای توزیع گوسی و  $\lambda$  دارای توزیع برنولی است.

$$P_r(\lambda(m)) = \begin{cases} p & \lambda = 1 \\ 1-p & \lambda = 0 \end{cases} \quad (۴)$$

در این صورت نمایش ماتریسی سیگنال دریافتی در گیرنده می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{n} + \mathbf{i} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{w} \quad (۵)$$

پارامترهای  $\mathbf{n}$  و  $\mathbf{i}$  به ترتیب نویز AWGN و نویز ضربه‌ای هستند. مجموع هر دو نویز گوسی و ضربه‌ای  $\mathbf{w}$  است که دارای تابع چگالی احتمال برنولی-گوسی زیر است [۱۴]:

$$p_{GB}(w) = p \times G(w, 0, \sigma_n^2 + \sigma_i^2) + (1-p) \times G(w, 0, \sigma_n^2) \quad (۶)$$

تابع چگالی  $G(w, 0, \sigma_n^2)$  گوسی با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_n^2$  است و  $\sigma_i^2$  نیز واریانس نویز ضربه‌ای است.

## ۲-۱-۲ مدل کانال

در یک سیستم مخابراتی بی‌سیم انتقال به دلیل محوشدگی ناشی از حرکت و چند مسیری مختل می‌شود. کانال محوشدگی چندمسیره را می‌توان به صورت یک فیلتر متغیر با زمان مدل کرد [۱۶].

$$h(t, \tau) = \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) \delta(t - \tau_l) \quad (۷)$$

که در آن  $\alpha_l(t)$  ضریب مختلط  $l$ امین مسیر و  $\tau_l$  تأخیر تصادفی متناسب با مسیر  $l$ ام است.  $L$  طول مسیرهای کانال است. ضرایب  $\alpha_l(t)$  متغیرهای گوسی مختلط WSS<sup>۱</sup> هستند و برای هر مسیر مستقل از هم هستند. در این حالت تغییر کانال بی‌سیم بر حسب زمان از تابع خودهمبستگی آن (ACF)<sup>۲</sup> ناشی می‌شود. خودهمبستگی نرمالیزه شده کانال به صورت زیر است [۱۷]:

$$E\{h_k h_l^*\} = J_0(2\pi f_m |k-l|) \quad (۸)$$

که  $J_0(\cdot)$  تابع بسل نوع اول مرتبه صفر است و  $f_m = f_d T$  ماکزیمم فرکانس داپلر نرمالیزه شده به نرخ نمونه‌برداری  $1/T$  است. فرض می‌کنیم که کانال محوشدگی متغیر با زمان و ناشناخته در هر دو سمت فرستنده و گیرنده را به صورت یک فیلتر AR با درجه  $M$  مدل می‌کنیم:

$$h_k = -\sum_{m=0}^M a_m h_{k-m} + w_k \quad (۹)$$

که  $w_k$  یک فرآیند گوسی نویز سفید با میانگین صفر و با مؤلفه‌های حقیقی و موهومی ناهمبسته است. پارامترهای مدل AR شامل ضرایب فیلتر  $\{a_1, a_2, \dots, a_M\}$  (با استفاده معادله یول-واکر به دست می‌آیند) و واریانس  $\sigma_m^2$  که از فرآیند نویز گوسی  $w_k$  به دست می‌آید هستند.

## ۳- تخمین کانال

در سیستم‌های MIMO-OFDM، ابتدا کانال در یک پنجره با استفاده از مشاهدات پایلوت برای داده‌های پایلوت با روش پایه LS تخمین زده می‌شود و سپس با درون‌یابی پاسخ کانال برای سیگنال‌های داده تعیین می‌شوند. سمبل‌های پایلوت بر اساس معیار LS [۴، ۵] به منظور به حداقل رساندن  $[(\mathbf{Y}_P - \mathbf{H}_P \mathbf{X}_P)(\mathbf{Y}_P - \mathbf{H}_P \mathbf{X}_P)^H]$  تخمین زده می‌شوند که به صورت زیر است:

$$\hat{\mathbf{H}}_{P-LS} = (\mathbf{X}_P)^{-1} \mathbf{Y}_P \quad (۱۰)$$

<sup>۱</sup> Wide-Sense Stationary

<sup>۲</sup> Autocorrelation Function

سیگنال دریافتی  $\mathbf{Y}_P$  در موقعیت پایلوت‌ها و  $\mathbf{X}_P$  سمبل‌های پایلوت که در گیرنده در دسترس هستند. روش LS پیچیدگی بسیار کمی دارد، بنابراین پیاده‌سازی آن ساده است و زمان پردازش بسیار کم است. ولی چون از دانش آماری کانال برای تخمین بهره نمی‌برد از دقت کافی برخوردار نیست. عملکرد تخمین می‌تواند تا حد زیادی با استفاده از اطلاعات آماری کانال بهبود یابد که در این حالت، تخمین‌گر MMSE تخمین‌گر مطلوب بوده که به شرح زیر است [۴،۶]:

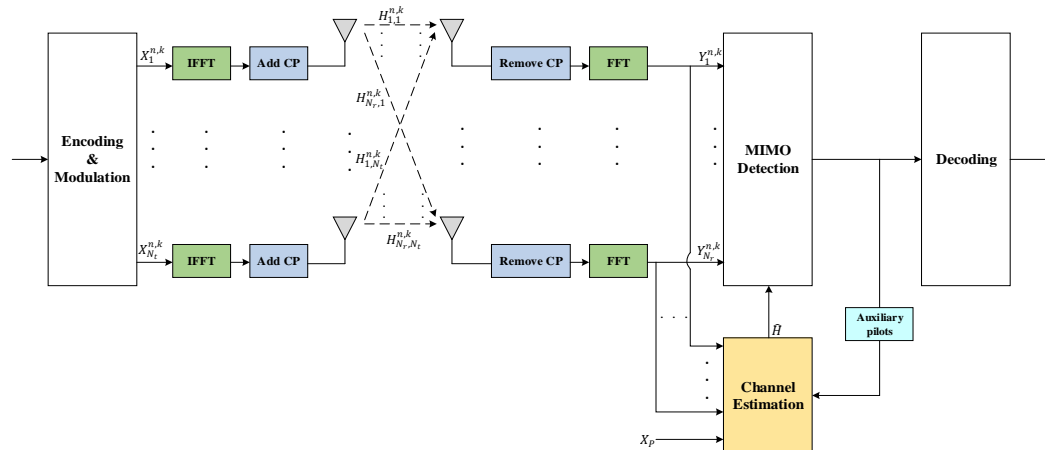
$$\hat{\mathbf{H}}_{P-MMSE} = \mathbf{R}_{Y_P H_P} (\mathbf{R}_{Y_P Y_P})^{-1} \mathbf{Y}_P \tag{11}$$

$$\hat{\mathbf{H}}_{P-MMSE} = \mathbf{R}_{H_P H_P} \left( \mathbf{R}_{H_P H_P} + \frac{1}{SNR} \mathbf{I} \right)^{-1} \hat{\mathbf{H}}_{P-LS}$$

که در آن  $\mathbf{R}_{H_P H_P} = E\{\mathbf{H}_P \mathbf{H}_P^H\}$  ماتریس همبستگی کانال است. در تخمین‌گر MMSE پیچیدگی با توجه به نیاز به انجام ماتریس معکوس افزایش می‌یابد و همچنین اطلاعات آماری موردنیاز همیشه در گیرنده در دسترس نیست و یا ممکن است با توجه به کانال بی‌سیم متغیر با زمان تغییر کنند. به‌طور کلی MMSE بهتر از تخمین‌گر LS عمل می‌کند اما به دلیل وابستگی آن به آماره‌های کانال و نویز پیچیدگی محاسباتی نیز افزایش می‌یابد. همچنین عملکرد آن برای مقادیر SNR بالا کاهش می‌یابد.

### ۳-۱- تخمین کانال تکرار شونده پیشنهادی

در این بخش ما الگوریتم تخمین کانال که علاوه بر پایلوت‌های اصلی از پایلوت‌های کمکی برای تخمین مجدد کانال بهره می‌برد را بحث می‌کنیم. بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. می‌توان بخشی از سمبل‌های داده بازبایی شده قابل اعتماد در گیرنده را به‌عنوان پایلوت کمکی برای تخمین مجدد کانال در نظر گرفت. در این روش از سمبل‌های داده بازبایی شده (بخشی از آن‌ها) به‌عنوان پایلوت کمکی در تخمین مجدد کانال استفاده می‌شود. در این حالت قابلیت اطمینان سمبل‌های داده شناسایی شده برای تخمین مجدد یک امر بسیار مهم است، زیرا کیفیت تخمین کانال را به خطر می‌اندازد. بنابراین با انتخاب بخشی از داده‌های بازبایی شده مطمئن به‌عنوان پایلوت‌های کمکی در تکرارهای بعدی می‌توان کیفیت تخمین را بهبود بخشید و در نتیجه عملکرد سیستم (BER) را افزایش داد. همچنین استفاده از تخمین تکرار شونده در گیرنده منجر به افزایش زمان پردازش می‌شود، بنابراین استفاده از روش‌های تخمینی که پیچیدگی محاسباتی پایینی دارند و زمان‌بر نیستند یک اولویت است. همان‌طور که می‌دانیم روش LS از دقت تخمین کافی برخوردار نیست و ما برای بهبود دقت تخمین آن در این مقاله یک روش تخمین تکرار شونده با استفاده از روش LS پیشنهاد خواهیم داد.



شکل ۱: بلوک دیاگرام طرح تخمین کانال پیشنهادی.

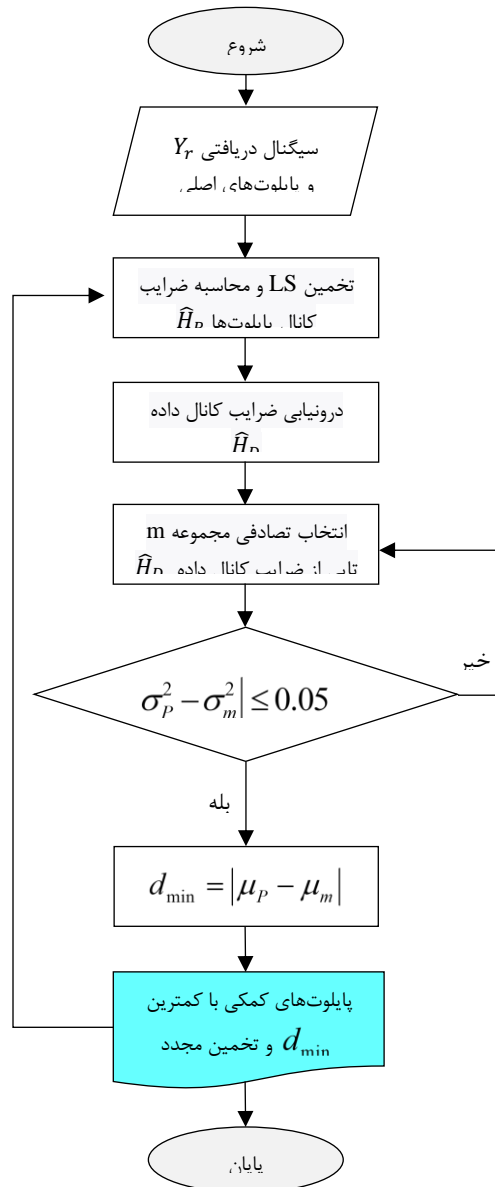
Figure 1. Block diagram of the proposed channel estimation scheme.

بدیهی است که انتخاب پایلوت‌های کمکی تأثیر مستقیمی بر کیفیت تخمین کانال دارد. بر این اساس یک معیار مناسب برای انتخاب  $m$  ضرب کانال داده بازبایی شده، حداقل کردن میانگین مربع خطا (MSE) است. بنابراین محاسبه MSE برای یک آنتن دریافتی با  $N_p$  مشاهدات پایلوت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{MSE} = E \left\{ \left\| \hat{\mathbf{H}} - \mathbf{H} \right\|^2 \right\} = E \left\{ (\hat{\mathbf{H}} - \mathbf{H})(\hat{\mathbf{H}} - \mathbf{H})^* \right\} = \underbrace{E \{ \hat{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{H}}^* \}}_{\lambda} + \underbrace{E \{ \mathbf{H} \mathbf{H}^* \}}_{\gamma} - \left( \underbrace{E \{ \hat{\mathbf{H}} \mathbf{H}^* \}}_{\lambda} + \underbrace{E \{ \mathbf{H} \hat{\mathbf{H}}^* \}}_{\gamma} \right) \quad (12)$$

بردارهای  $\mathbf{H}$  و  $\hat{\mathbf{H}}$  به ترتیب ضرایب کانال تخمین زده شده و ضرایب کانال واقعی هستند و هرکدام شامل دو بخش ضرایب کانال پایلوتها و داده هستند. برای اینکه MSE حداقل گردد کافی است در رابطه ۱۲ ترم دوم  $\gamma$  که درواقع همان همبستگی بین ضرایب کانال و ضرایب پایلوتها است، حداکثر گردد.

بنابراین انتخاب پایلوتهای کمکی از ضرایب کانال دادهها میبایست طوری باشد که مجموعه انتخابی (پایلوتهای کمکی) همبستگی بالایی با ضرایب پایلوتهای اصلی داشته باشند. برای انتخاب آنها از آزمون همگنی واریانس (آزمون لوین) استفاده می کنیم که یک آزمون استنباطی است و مجموعه ای که کمترین اختلاف واریانس با مجموعه اصلی (کمتر از ۰/۰۵) و کمترین اختلاف میانگین با میانگین مجموعه اصلی را داشته باشد دارای بیشترین همبستگی با آن است. بنابراین مجموعه انتخابی شرایط تقریباً مشابهی با پایلوتهای اصلی را در کانال انتقال تجربه کرده است و می تواند به عنوان پایلوت کمکی در تخمین مجدد کانال استفاده شوند.



شکل ۲: فلوجارت انتخاب پایلوتهای کمکی.

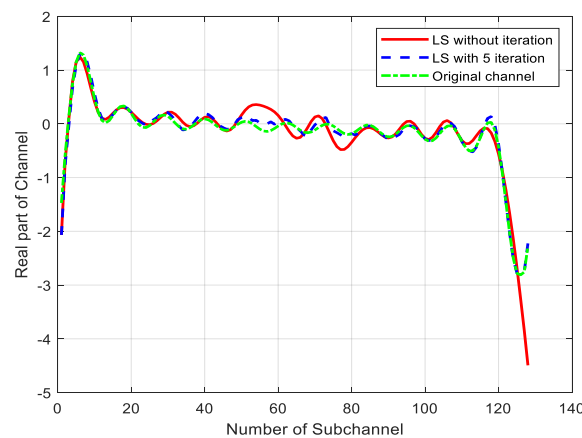
Figure 2. Flowchart of selecting auxiliary pilots.

برای انتخاب داده‌های بازبایی شده قابل اطمینان به عنوان پایلوت‌های کمکی ابتدا مجموعه‌های  $m$  تایی از ضرایب کانال در موقعیت داده‌ها انتخاب می‌کنیم و سپس مجموعه‌هایی که اختلاف واریانس آن‌ها از واریانس مجموعه پایلوت‌های اصلی کمتر از  $0.5$  باشد را جدا کرده و از میان آن‌ها مجموعه‌ای که کمترین اختلاف میانگین را با مجموعه پایلوت‌های اصلی داشته باشد را به عنوان پایلوت‌های کمکی انتخاب کرده و در تخمین مجدد کانال به پایلوت‌های اصلی اضافه می‌کنیم. اندازه هر مجموعه انتخابی ( $m$ ) را می‌توان با توجه به شرایط مسئله تغییر داد. مثلاً در SNRهای بالا که کیفیت تخمین خوب است می‌توان اندازه مجموعه را افزایش داد ولی برای SNRهای پایین که کیفیت تخمین ضعیف است آن را کوچک‌تر انتخاب کرد.

با فرض  $\sigma_p^2$  و  $\mu_p$  به ترتیب واریانس و میانگین پایلوت‌های اصلی و  $\sigma_m^2$  و  $\mu_m$  واریانس و میانگین پایلوت‌های کمکی باشند در این صورت ابتدا مجموعه‌های  $m$  تایی که شرط واریانس  $|\sigma_p^2 - \sigma_m^2| \leq 0.5$  را برآورده کنند جدا می‌شوند. سپس از میان مجموعه  $m$  تایی مجموعه‌ای که شرط  $d_{\min} = |\mu_p - \mu_m|$  را حداقل کند را به عنوان پایلوت‌های کمکی انتخاب کرده و سبیل بازبایی شده متناسب با آن پاسخ فرکانسی را مدوله کرده و به پایلوت‌های اصلی اضافه می‌کنیم و سپس تخمین مجدد کانال را با پایلوت‌های اصلی و جدید انجام می‌دهیم. شکل ۲ فلوجارت انتخاب پایلوت‌های کمکی را نشان می‌دهد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد روش تخمین کانال پیشنهادی را با روش‌های دیگر در حضور نویز گوسی و نویز ضربه‌ای با شبیه‌سازی متلب مقایسه می‌کنیم. تنظیمات شبیه‌سازی بر اساس یک سیستم MIMO-OFDM با مدولاسیون QPSK و تعداد زیرحامل‌ها ۱۲۸ است. یک سیستم  $2 \times 2$  MIMO با کانال محوشدگی چندمسیره که با یک فیلتر AR متغیر با زمان مدل شده مانند آنچه در بخش ۱-۲ بیان شده را بررسی می‌کنیم. همچنین استراتژی تخصیص پایلوت‌ها برای همه آنتن‌ها یکسان است. برای درون‌یابی از تابع درون‌یاب مکعب زبانه‌دار<sup>۱</sup> استفاده کردیم و پارامترهای کانال محوشدگی AR با درجه  $M = 100$ ، فرکانس داپلر نرمالیزه شده  $f_m = 0.5$  و تعداد مسیرهای کانال  $L = 9$  را در نظر گرفتیم.



شکل ۳: نمایش قسمت حقیقی پاسخ فرکانسی کانال با  $SNR = 20$  dB در حضور نویز گوسی.

Figure 3. Real part of the channel frequency response in the presence of Gaussian noise with  $SNR = 20$  dB.

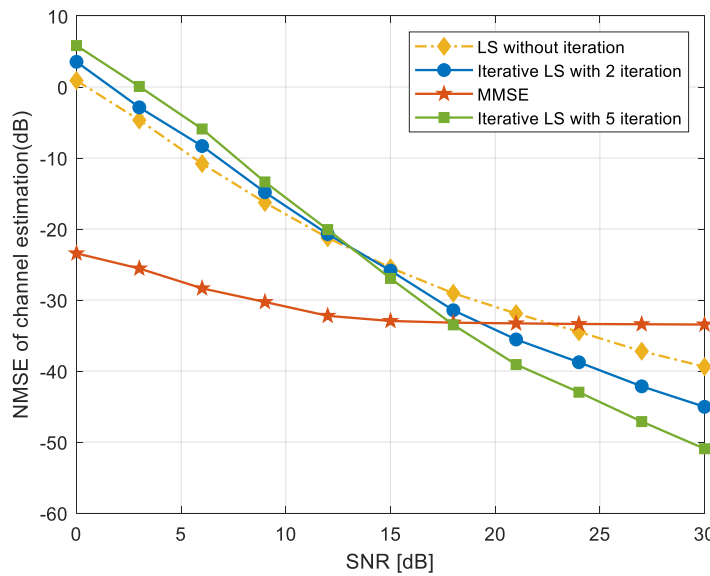
شکل ۳ قسمت حقیقی پاسخ فرکانسی کانال تخمین زده شده با روش LS و روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روش پیشنهادی با بهره‌گیری از پایلوت‌های کمکی و تخمین مجدد کانال تخمین مناسبی از کانال دارد و به کانال واقعی نزدیک است.

شکل ۴ عملکرد MSE روش LS، MMSE و روش پیشنهادی با ۲ و ۵ بار تکرار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، روش پیشنهادی که به صورت تکرار شونده است، با توجه به استفاده از پایلوت‌های کمکی در تخمین مجدد کانال عملکرد آن در SNRهای بالا در هر تکرار بهتر می‌شود. از آنجاکه در SNRهای بالا پایلوت‌های کمکی قابلیت

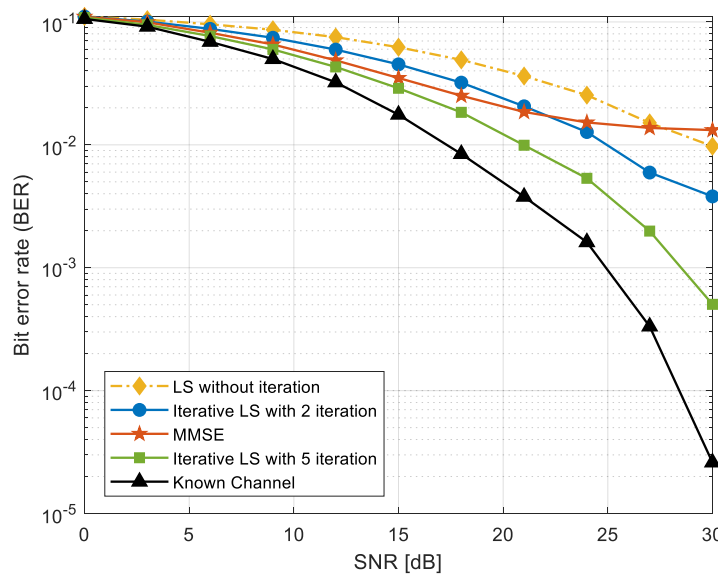
<sup>۱</sup> Spline Cubic



اطمینان بیشتری دارند، جای تعجب ندارد که روش پیشنهادی در SNRهای بالا عملکرد بهتری داشته باشد. همان طور که ملاحظه می‌کنید عملکرد MMSE در SNRهای پایین مطلوب است ولی در SNR بالا عملکرد آن کاهش می‌یابد. در شکل ۵ عملکرد BER روش LS و روش پیشنهادی با ۲ و ۵ بار تکرار را ترسیم کردیم. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، عملکرد BER روش MMSE مانند حالت MSE در SNRهای پایین نسبت به دیگر روش‌ها بهتر است ولی در SNRهای بالا کاهش می‌یابد. اگرچه عملکرد روش پیشنهادی نسبت به LS بدون تکرار در SNR پایین تغییری نمی‌کند، ولی با افزایش تعداد تکرارها و SNR مشاهده می‌کنیم که عملکرد روش پیشنهادی به دلیل استفاده از پایلوت‌های کمکی مطمئن‌تر و افزایش تعداد آن‌ها در تکرارهای بعدی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. مشابه حالت MSE، عملکرد BER تخمین‌گر تکرارشونده پیشنهادی در SNRهای بالا افزایش می‌یابد و حدود ۸ dB بهره در نرخ خطای بیت ۰/۰۱ با ۵ بار تکرار ایجاد می‌کند که بهره قابل ملاحظه‌ای است و نزدیک به حالتی است که کانال در گیرنده شناخته شده باشد.

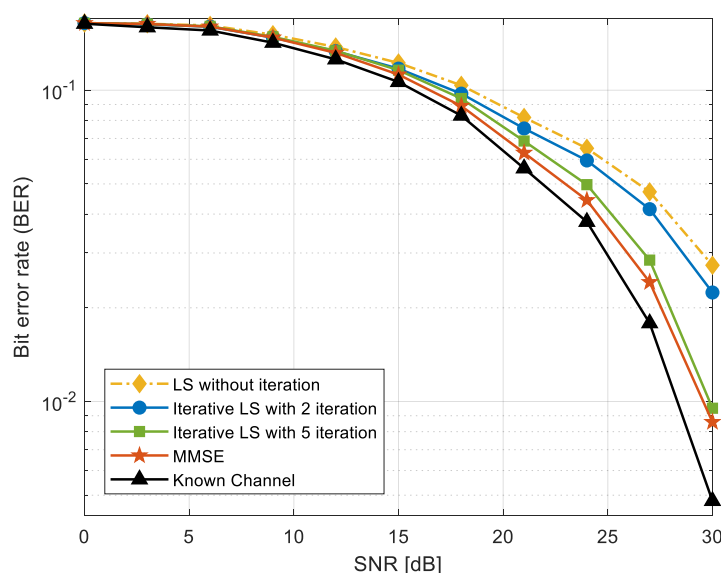


شکل ۴: عملکرد MSE طرح پیشنهادی تکرارشونده و LS در حضور نویز گوسی.  
 Figure 4. The MSE performance of the proposed iterative scheme and LS in the presence of Gaussian noise.

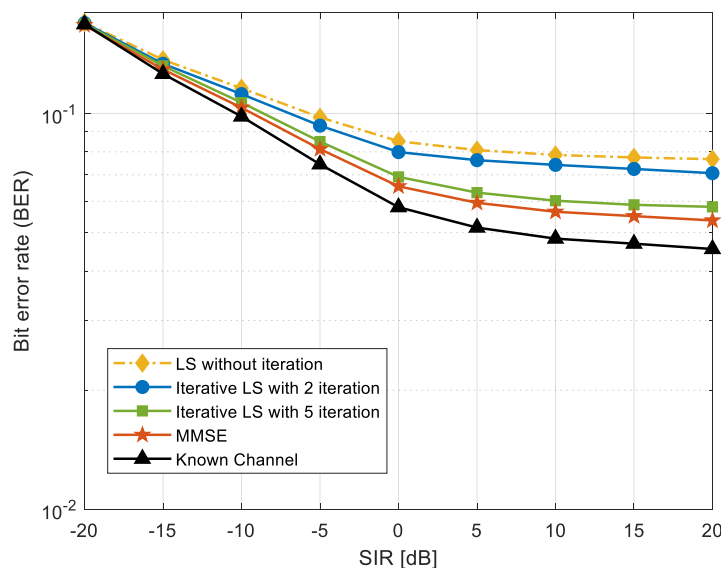


شکل ۵: عملکرد BER طرح پیشنهادی تکرارشونده و LS در حضور نویز گوسی.  
 Figure 5. The BER performance of the proposed iterative scheme and LS in the presence of Gaussian noise.

نویز ضربه‌ای می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی عملکرد سیستم‌های ارتباطی را از نظر BER تحت تأثیر قرار دهد. شکل ۶ عملکرد BER روش تکرار شونده پیشنهادی با روش‌های LS و MMSE را در کانال محوشدگی چندمسیره با حضور نویز گوسی و نویز ضربه‌ای نشان می‌دهد. در SNRهای پایین عملکرد سیستم با روش‌های تخمین مختلف به دلیل اینکه ضربه‌ها غیرقابل پیش‌بینی هستند و غالباً انرژی زیادی دارند، مشابه و پایین است. در SNRهای بالا روش پیشنهادی بهره‌مناسبی ایجاد می‌کند و نرخ خطای بیت در هر بار تکرار کاهش و در نتیجه عملکرد سیستم بهتر می‌شود. همان‌طور که مشاهده شد در حضور نویز ضربه‌ای به دلیل اینکه دامنه سیگنال دریافتی افزایش می‌یابد روش MMSE عملکرد بهتری دارد خصوصاً در SNRهای بالا نسبت به حالتی که فقط نویز گوسی است.



شکل ۶: عملکرد BER طرح پیشنهادی تکرار شونده (۵ بار تکرار) و روش‌های دیگر در حضور نویز گوسی و ضربه‌ای با  $p = 0.3$  و  $SIR = -5$  dB.  
Figure 6. The BER performance of the proposed iterative scheme (5 iterations) and other methods in the presence of Gaussian and impulse noise with  $p = 0.3$  and  $SIR = -5$  dB.



شکل ۷: عملکرد BER سیستم بر حسب SIR در حضور نویز گوسی و ضربه‌ای با  $p = 0.05$  و  $SNR = 20$  dB.  
Figure 7. The system BER in terms of SIR in the presence of Gaussian and impulse noises ( $p = 0.05$  and  $SNR = 20$  dB).

همان‌طور که انتظار می‌رفت در شکل ۷ روش LS تکراری پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش LS بدون تکرار دارد و این بهبود عملکرد در نسبت سیگنال به نویز ضربه (SIR)های بالا نیز افزایش یافته و بهره قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند. روش پیشنهادی به دلیل استفاده از داده‌های قابل اعتماد (بخشی از آن‌ها نه همه) به‌عنوان پایلوت‌های کمکی در تخمین مجدد کیفیت تخمین را افزایش می‌دهد و عملکرد تقریباً مشابهی با روش MMSE دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در مقایسه با روش‌های معمولی LS و MMSE روش تخمین کانال تکرارشونده پیشنهادی عملکرد قابل ملاحظه‌ای در کانال محوشدگی چندمسیره از خود نشان می‌دهد. با استخراج پایلوت‌های جدید که همبستگی بالایی با پایلوت‌های اصلی دارند و تخمین مجدد کانال با توجه به افزایش پایلوت‌ها مشاهده کردیم که دقت تخمین و در نتیجه عملکرد سیستم در تکرارهای بعدی نیز بهبود می‌یابد و بهره قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند. همچنین با توجه به روش تکرارشونده جهت بهره‌وری از داده‌های بازبایی شده قابل اعتماد لازم است که پیچیدگی و زمان پردازش کم باشد و ما از LS که کمترین پیچیدگی را دارد استفاده کردیم. در این کار ما روی سیستم MIMO-OFDM تمرکز کردیم که می‌توان برای سیستم‌های بی‌سیم مختلف نیز استفاده کرد و تخمین مجدد کانال در محیط‌های تداخل محدود را نیز انجام داد.

## مراجع

- [1] D. Tse, P. Viswanath, "Fundamentals of Wireless Communication", Cambridge U.K: Cambridge University, 2005.
- [2] J. Lee, J.-K. Han and J. Zhang, "MIMO Technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, no. 302092, p. 10, 2009, doi: 10.1155/2009/302092.
- [3] S. Dixit, H. Katiyar and A. K. Singh, "MIMO-OFDM in a Cooperative Frequency Selective Fading Channel: An Analysis," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2019, p. 7, 2019, doi: 10.1155/2019/9107505.
- [4] Y. Liu, Zh. Tan, H. Hu, L. J. Cimini Jr, and G. Ye Li, "Channel Estimation for OFDM," *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 1891-1908, 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2320074.
- [5] A. A. Kalachikov, "Numerical Evaluation of the MU-MIMO Beamforming with LS Channel Estimation," in *2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, Yekaterinburg, 2022, pp. 183-186, doi: 10.1109/USBREIT56278.2022.9923380.
- [6] V. Vasylyshyn, "Channel Estimation Method for OFDM Communication System using Adaptive Singular Spectrum Analysis," in *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2020, pp. 884-887, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088787.
- [7] R. Srividhya, T. Jayachandran, A. Bennet M and V. Rajmohan, "Channel Estimation for OFDM Systems Using MMSE and LS Algorithms," in *2022 6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, Tirunelveli, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3059776.
- [8] J. Gao and H. Liu, "Decision-Directed Estimation of MIMO Time-Varying Rayleigh Fading Channels," *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS*, vol. 4, no. 4, pp. 1412 - 1417, 2005, doi: 10.1109/TWC.2005.852131.
- [9] Ch. Sh. Valmeekam and K. Narayanan, "A Semi-Blind Decision Directed Iterative Channel Estimation and Decoding for LDPC Coded OFDM Systems," in *2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Austin, 2022, pp. 686-691, doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771751.

- [10] A. Ladaycia, M. Pesavento, A. Mokraoui, K. Abed-Meraim and A. Belouchrani, "Decision Feedback Semi-blind Estimation Algorithm for Specular OFDM Channels," in *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP)*, Brighton, 2019, pp. 4664-4668, doi: 10.1109/ICASSP.2019.8683699.
- [11] X. Li, Q. Zhang, Q. Tian, Y. Tao, B. Liu, F. Tian, Y. Shen, D. Chen and H. Wa, "A decision feedback channel estimation approach of the satellite mobile communication system," in *15th International Conference on Optical Communications and Networks(ICOCN)*, Hangzhou, 2016, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICOCN.2016.7875820.
- [12] S. Park, B. Shim and J. W. Choi, "Iterative Channel Estimation Using Virtual Pilot Signals for MIMO-OFDM Systems," *IEEE Transactions On Signal Processing*, vol. 63, no. 12, pp. 3032 - 3045, 2015, doi: 10.1109/TSP.2015.2416684.
- [13] M. Okamura and Ch. J. Ahn, "Channel compensation with virtual pilot signal and time-frequency interferometry for MIMO-OFDM," *Nonlinear Theory and Its Applications IEICE*, vol. 9, no. 1, pp. 82-94, 2018, doi: 10.1587/nolta.9.82.
- [14] Th. Shongwe , A. J. Han Vinck and H. C. Ferreira, "A Study on Impulse Noise and Its Models," *SAIEE Africa Research Journal*, vol. 109, no. 3, pp. 119 - 131, 2015, doi: 10.23919/SAIEE.2015.8531938.
- [15] Th. Shongwe , A. J. Han Vinck and H. C. Ferreira, "A Study on Impulse Noise and Its Models," *SAIEE Africa Research Journal*, vol. 109, no. 3, pp. 119 - 131, 2015, doi: 10.23919/SAIEE.2015.8531938.
- [16] M. Yusuf, E. Tanghe, F. Challita, P. Laly, L.Martens, D. P. Gaillot, M. Lienard and W. Joseph, "Autoregressive Modeling Approach for Non-Stationary Vehicular Channel Simulation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 1124 - 1131, 2022, doi: 10.1109/TVT.2021.3132859.
- [17] K. E. Baddour and N. C. Beaulieu, "Autoregressive Modeling for Fading Channel Simulation," *IEEE Transaction on Wireless Communication*, vol. 4, no. 4, pp. 1650 - 1662, 2005, doi: 10.1109/TWC.2005.850327.

---

#### COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

---

