

## اثر اطلاعات جانبی بر تعداد اندازه‌گیری‌ها و ردگیری کانال تنک متغیر با زمان با حسگری فشرده

حمیرا خالدیان<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمد حسین کهایی<sup>۲</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - h\_khaledian@iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - kahaei@iust.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، مساله تخمین کانال‌های تنک متغیر با زمان در سیستم‌های مالتی‌پلکس تقسیم فرکانسی متعامد (OFDM) با روش نرم-پایه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این روش، ترکیب نرم‌ها بر اساس بازیابی تنک با استفاده از اطلاعات جانبی، جهت استخراج همزمان دو ویژگی تنکی و تغییرات زمانی کانال صورت می‌گیرد. بدین منظور همبستگی زمانی کانال‌های متغیر با زمان به‌عنوان اطلاعات جانبی در نظر گرفته می‌شود و اثر این اطلاعات بر تعداد اندازه‌گیری‌ها و ردگیری کانال بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی افزایش دقت تخمین و ردگیری کانال‌های تنک متغیر با زمان را تا چند دسی‌بل و همچنین کاهش تعداد اندازه‌گیری‌ها را در مقایسه با بعضی الگوریتم‌های متداول بازیابی نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** تخمین کانال تنک متغیر با زمان، بازیابی تنک با اطلاعات جانبی، اندازه‌گیری‌ها، ترکیب نرم‌ها، سیستم‌های OFDM.

## Effect of Side Information on the Number of Measurements and Dynamic Sparse Channel Tracking using Compressed Sensing

H. Khaledian<sup>1</sup>, MSc. Student ; M. H. Kahaei, Associate Professor<sup>2</sup>

1- School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: h\_khaledian@iust.ac.ir

2- School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: kahaei@iust.ac.ir

**Abstract:** In this paper, the problem of dynamic sparse channel estimation in orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) systems is studied using norm-based methods. In this method, a mixture of norms is performed based on sparse recovery using side information for simultaneous extraction of both sparseness and dynamic features. For this purpose, temporal correlation of dynamic channels is considered as the side information whose effect on the number of measurements and dynamic channel tracking is investigated. Simulation results show an increase on both estimation accuracy and tracking of dynamic sparse channels for some decibels and also reduction of the number of measurements compared to some conventional reconstruction algorithms.

**Keywords:** Dynamic sparse channel estimation, sparse recovery with side information, measurements, mixed norms, OFDM systems.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۷

نام نویسنده مسئول: دکتر محمدحسین کهایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - بزرگراه رسالت - خیابان هنگام - خیابان حیدرآبادی - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق.

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌های مدولاسیون چندحاملی، سیستم OFDM می‌باشد، که راه‌حل قابل اعتمادی را برای نیازهای آینده با سرعت بالای نرخ انتقال اطلاعات فراهم می‌آورد [۱]. سیستم OFDM جهت مقابله با اثرات دریافت چند مسیری<sup>۱</sup>، با تقسیم پهنای باند فرکانسی، کانال با محوشدگی فرکانس‌گزین<sup>۲</sup> را به چندین زیرکانال باندهای یک با محوشدگی تخت<sup>۳</sup> تبدیل می‌کند. همچنین جهت جلوگیری از تداخل بین سمبلی<sup>۴</sup> (ISI)، از باند محافظ برای جداسازی سمبل‌های داده استفاده می‌کند [۲]. در سال‌های اخیر، توجه‌ها به سمت OFDM در سیستم‌های مخابرات بی‌سیم به دلیل بازخورد موفق اثرات آن، رشد چشمگیری یافته است.

داشتن مخابره مطمئن و در عین حال پرسرعت، در هنگام ارسال بر روی یک کانال مخابراتی، یک مساله مهم می‌باشد. برای این کار، تخمین دقیق کانال مورد نیاز است که برای آن سه روش بر اساس دنباله آموزشی<sup>۵</sup> [۲]، تخمین کور<sup>۶</sup> [۳] و تخمین نیمه‌کور که ترکیبی از دو حالت اول است، ارائه شده است. در روش تخمین کور کانال، از ویژگی‌های آماری سیگنال دریافتی استفاده می‌شود. در حالی که تخمین بر اساس دنباله آموزشی، از همه و یا قسمتی از سیگنال‌های ارسالی با عنوان پایلوت که در دسترس گیرنده هستند، استفاده می‌کند.

از سوی دیگر، پردازش سیگنال‌های تنک<sup>۷</sup> و حسگری فشرده<sup>۸</sup> (CS)، از جمله زمینه‌های پردازش و ریاضیات کاربردی است که حجم بالایی از تحقیقات انجام شده در پردازش سیگنال و مخابرات دیجیتال را به خود اختصاص داده‌اند [۴]. بر اساس این نظریه، بازیابی سیگنال‌هایی با ویژگی خاص (تنک بودن)، با تعداد اندازه‌گیری‌هایی<sup>۹</sup> که بسیار کمتر از حد نایکوئیست می‌باشند، امکان‌پذیر خواهد شد. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که انواع بسیاری از سیگنال‌ها می‌توانند از طریق بسط در یک پایه مناسب، تنها با تعداد کمی از ضرایب غیر صفر، به خوبی تقریب‌زده شوند [۴]. تنها شرط این بازیابی، ناهمبستگی فرآیند نمونه‌برداری با تبدیلی است که نمایش تنک از آن حاصل می‌شود [۵]. تنک بودن سیگنال بدین معناست که میزان اطلاعات موجود در یک سیگنال، بسیار کمتر از تعداد نمونه‌های آن به هنگام نمونه‌برداری است. یکی از کاربردهای بسیار مهم که قابلیت استفاده از حسگری فشرده را داراست، تخمین کانال تنک است. پاسخ ضربه کانال<sup>۱۰</sup> (CIR) بی‌سیم دارای تعداد بسیار کمی مولفه غیرصفر در مقایسه با طول کانال می‌باشد. این نوع کانال‌ها در شبکه‌های سلولی<sup>۱۱</sup>، کانال‌های صوتی زیر آب<sup>۱۲</sup> و همچنین مخابرات بی‌سیم باند وسیع<sup>۱۳</sup> (UWB) دیده می‌شوند [۶].

از طرف دیگر، اکثر روش‌های موجود در تخمین کانال‌های تنک، تغییرات زمانی کانال را نادیده گرفته و کانال را نامتغیر با زمان فرض می‌نمایند. این در حالی است که کانال‌های موجود در دنیای واقعی، دارای تغییرات زمانی می‌باشند [۷]. منظور از تغییرات زمانی، حرکت

فرستنده نسبت به گیرنده و تغییرات زمانی مشخصه‌های کانال شامل تأخیر<sup>۱۴</sup>ها و تعداد مسیرهای با اهمیت است. بنابراین، در سناریوهای متغیر با زمان روش‌های متداول حسگری فشرده با توجه به سرعت تغییرات کانال از دقت مناسبی برخوردار نیستند.

از طرفی، فیلتر کالمن متداول‌ترین روشی است که جهت ردگیری<sup>۱۵</sup> استفاده می‌شود. L. Wang و N. Jing در مقاله [۸] برای حل مساله ردگیری تغییرات زمانی، تخمین کانال تنک متغیر با زمان با حسگری فشرده بر اساس فیلتر کالمن<sup>۱۶</sup> را پیشنهاد دادند. همچنین R. Prasad و سایرین در یک سناریوی متغیر با زمان، با استفاده از یک مدل بازگشتی مرتبه اول<sup>۱۷</sup> برای کانال بی‌سیم، الگوریتم بازگشتی یادگیری بیزین تنک بر اساس فیلتر کالمن<sup>۱۸</sup> (KSBL) را جهت تخمین کانال تنک متغیر با زمان ارائه دادند. در واقع روش‌های بازگشتی را بر اساس فیلتر کالمن و یکنواخت‌گر<sup>۱۹</sup> در چهارچوب الگوریتم SBL پیاده می‌کنند [۹].

در مقاله [۱] روشی ساده برای تخمین کانال تنک و ردگیری در سیستم‌های OFDM متغیر با زمان بر اساس مدل کانال پارامتری پویا بیان می‌شود. کانال با تعداد کمی از مسیرهای مشخص و هر کدام با تأخیر مسیر و بهره مسیر<sup>۲۰</sup> متناظر، پارامتردهی شده‌اند. این روش شامل سه مرحله می‌باشد، در مرحله اول به طور وفقی<sup>۲۱</sup>، شبکه‌بندی تأخیر را انتخاب کرده و هر تأخیر مسیر کانال را به طور تکراری تخمین می‌زند. پس از آن در مرحله دوم، جهت کاهش بیشتر پیچیدگی محاسباتی، الگوریتم ردگیری تأخیر مسیرها را استفاده می‌کند. عمل ردگیری بر اساس این حقیقت می‌باشد که تغییر در تعداد مسیرهای کانال و تأخیر مسیرها در هر برش زمانی<sup>۲۲</sup> به اندازه کافی کوچک هستند. در مرحله آخر نیز، به وسیله گسترش بر اساس چندجمله‌ای‌ها<sup>۲۳</sup> (P-BEM) بهره مسیرهای کانال به دست می‌آید. لازم به ذکر است که بهره‌های کانال همان ضرایب P-BEM می‌باشند. درحالی که هدف از مقاله [۱] کاهش بار محاسباتی تخمین می‌باشد، روش ارائه شده در آن از دقت مناسبی در تخمین کانال تنک متغیر با زمان برخوردار نیست.

راه‌حل جذاب دیگر، تخمین کانال بر اساس روش‌های حریصانه<sup>۲۴</sup> می‌باشد. اما از آنجا که الگوریتم‌های حریصانه به دلیل ناتوانی در ردگیری تغییرات زمانی، برای تخمین کانال‌های تنک متغیر با زمان از دقت مناسبی برخوردار نمی‌باشند، الگوریتم‌های حریصانه وفقی که تغییر یافته الگوریتم جستجوی تطابقی<sup>۲۵</sup> (MP) می‌باشند، ارائه شده‌اند. از جمله این الگوریتم‌ها AMP<sup>۲۶</sup> [۱۰]، AOMP<sup>۲۷</sup> [۱۱]، DOMP<sup>۲۸</sup> [۱۲] و SMP<sup>۲۹</sup> [۱۳] می‌باشند. به طور کلی، الگوریتم‌های جستجوی تطابقی به صورت تکراری، جواب تنکی از مساله را که متناظر با نمونه‌های دریافتی است، تخمین می‌زنند [۱۴]. بنابراین، الگوریتم حریصانه وفقی در یک روش زنجیره‌ای، عمل تخمین و ردگیری را با به‌هنگام‌سازی تغییرات زمانی کانال انجام می‌دهد. در واقع نکته کلیدی این الگوریتم‌ها استفاده از همبستگی زمانی جهت ردگیری تغییرات زمانی

می‌باشد، که در آن  $L^{(t)}$ ،  $h_i^{(t)}$  و  $\tau_i^{(t)}$  به ترتیب تعداد ضرایب پاسخ ضربه کانال (معادل با تعداد مسیرهای انتشار)، بهره مختلط و تأخیر مسیر  $l$ ام در برش زمانی  $t$  ام را نشان می‌دهند. پارامتر  $L^{(t)}$  به صورت فرآیند تصادفی پواسن<sup>۳۷</sup> با میانگین  $E(L^{(t)}) = 1/\lambda_L$  مدل می‌شود [۱]. لازم به ذکر است که در هر برش زمانی کانال، با توجه به استقلال مسیرهای انتشار،  $\{h_i^{(t)}\}$  ها با یکدیگر ناهمبسته<sup>۳۸</sup> می‌باشند. به دلیل ویژگی همبستگی زمانی کانال متغیر با زمان، بهره مختلط  $h^{(t)}$ ، که برداری متشکل از  $h_i^{(t)}$  ها می‌باشد، به صورت مارکوف<sup>۳۹</sup> مرتبه اول مدل می‌گردد [۷]:

$$\mathbf{h}^{(t)} = w^{(t)}\mathbf{h}^{(t-1)} + \mathbf{v}^{(t)} \quad (2)$$

که در آن  $w^{(t)}$  و  $\mathbf{v}^{(t)} \sim \mathcal{N}(0, (1 - w^{(t)^2})\sigma_h^2)$  به ترتیب ضریب خودهمبستگی<sup>۴۰</sup> کانال در برش زمانی  $t$  ام و خطای مدل‌سازی می‌باشند.

با در نظر گرفتن مدل محوشدگی Jakes، تخمین کانال تنک متغیر با زمان در محوشدگی سریع بررسی خواهد شد. بنابراین همبستگی میان برش‌های زمانی به صورت بسل<sup>۴۱</sup> مدل می‌شود،  $w^{(t)} = J_0(2\pi f_D t)$  که در آن  $J_0$  تابع بسل مرتبه صفر از نوع اول در بازه  $-1 < w^{(t)} < 1$  می‌باشد [۱۵].  $\tau_i^{(t)}$  نیز به صورت:

$$\tau_i^{(t)} = \tau_i^{(t=0)} + \frac{f_D \cos(\bar{\theta}_l)}{f_C} b \times t \quad (3)$$

مدل می‌شود [۱۶]، که در آن  $f_D$  و  $f_C$  به ترتیب نشان‌دهنده فرکانس حامل<sup>۴۲</sup> سیستم مخابراتی و بیشینه فرکانس داپلر<sup>۴۳</sup> می‌باشند،  $\tau_i^{(t=0)}$  تأخیر اولیه مسیر  $l$  ام،  $\bar{\theta}_l$  زاویه ورود به مسیر<sup>۴۴</sup>  $l$  ام با توزیع یکنواخت به صورت  $\bar{\theta}_l \sim U(-\pi, \pi)$  و  $b$  تعداد سمبل متوالی OFDM در هر برش زمانی است. این معادله، وابستگی تغییرات زمانی تأخیر مسیرها را به فرکانس داپلر نشان می‌دهد. در گیرنده،  $L^{(t)}$  و  $\tau_i^{(t)}$  در طول یک برش زمانی ثابت فرض می‌شوند.

سیگنال دریافتی در برش زمانی  $t$  ام از اندازه‌گیری‌های خطی با یک معادله فرومعیین به دست می‌آید:

$$\mathbf{y}^{(t)} = \mathbf{A}^{(t)}\mathbf{h}^{(t)} + \mathbf{n}^{(t)} \quad (4)$$

که در آن  $\mathbf{y}^{(t)} = [y_1^{(t)}, y_2^{(t)}, \dots, y_M^{(t)}]^T$  و  $\mathbf{A}^{(t)} \in \mathbb{C}^{M \times N}$  و  $\mathbf{n}^{(t)} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$  به ترتیب بردار اندازه‌گیری، ماتریس اندازه‌گیری و نویز سفید گوسی جمع‌شونده در برش زمانی  $t$  ام می‌باشند.

ماتریس اندازه‌گیری در تخمین کانال‌های تنک در سیستم‌های OFDM با توجه به ساختار آن، به صورت  $\mathbf{A} = \mathbf{P}\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ ؛ ( $M < N$ ، به صورت آن، به ساختار آن، به صورت  $\mathbf{P} \in \mathbb{C}^{M \times M}$  ماتریس قطری با درایه‌های معلوم می‌باشد. که در آن

کانال تنک متغیر با زمان می‌باشد. الگوریتم SMP ارائه شده در سال ۲۰۱۵ توسط X. Zhu که دارای بیشترین دقت تخمین در میان سایر الگوریتم‌های حریصانه و فقی است، تأخیر مسیرهای کانال‌های تنک متغیر با زمان را به دو قسمت متفاوت با هم تقسیم می‌کند. این دو قسمت شامل ضرایب ثابت<sup>۴۰</sup> و ضرایب متغیر با زمان<sup>۴۱</sup> کانال می‌باشند. بر اساس این تقسیم‌بندی، الگوریتم در ابتدا ضرایب ثابت کانال تنک متغیر با زمان را در تمام برش‌های زمانی تشخیص داده و پس از آن، ضرایب متغیر با زمان کانال را به تنهایی در هر برش زمانی ردگیری می‌کند. تحلیل‌های تئوری الگوریتم SMP، تضمینی بر بازیابی موفق ضرایب ثابت و متغیر با زمان کانال می‌باشد [۱۳].

الگوریتم پیشنهادی ما در این مقاله، تخمین کانال تنک متغیر با زمان به وسیله بازیابی تنک با اطلاعات جانبی<sup>۴۲</sup> (SRSI) بر اساس روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی محدب می‌باشد. در واقع علاوه بر ساختار تنکی یک سیگنال، سایر ویژگی‌های ذاتی آن را می‌توان با عنوان اطلاعات جانبی در نظر گرفت. بنابراین، با دسترسی به مجموعه اندازه‌گیری‌های متداول با اطلاعات جانبی سیگنال، مساله بازیابی تنک با اطلاعات جانبی مطرح می‌شود. اطلاعات جانبی در روش پیشنهادی همبستگی زمانی<sup>۴۳</sup> کانال است که برای ردگیری تغییرات و کاهش تعداد اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود.

ساختار کلی مقاله نیز به صورت زیر می‌باشد: در بخش دوم، مدل سیستم OFDM و کانال تنک متغیر با زمان بیان می‌شود. در بخش سوم، روش تخمین و ردگیری کانال تنک متغیر با زمان شرح داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش چهارم ارائه می‌شوند. نتیجه‌گیری نیز در بخش پنجم ذکر می‌شود.

## ۲- مدل سیستم

یک سیستم OFDM، با  $K$  زیرحامل<sup>۴۴</sup> که تعداد  $K_U$  زیرحامل از آن‌ها برای انتقال فعال<sup>۴۵</sup> است، در نظر گرفته می‌شود. هر زیرحامل فعال با سمبل<sup>۴۶</sup> داده  $X_k(i)$  مدوله می‌شود، که در آن  $i$  و  $k$  به ترتیب نشان‌دهنده اندیس سمبل و اندیس زیرحامل می‌باشند. فرض شده است که سیگنال از یک کانال تنک متغیر با زمان با مدل ارائه شده در این بخش انتقال می‌یابد. مدل کانال متغیر با زمان علاوه بر آن که تنک است، تغییرات زمانی را نیز در بر دارد. کانال به صورت یک سری زمانی  $\{\mathbf{h}^{(t)}\}_{t=1}^T$  در نظر گرفته می‌شود که ویژگی‌های تنک و همبستگی زمانی را داراست. بدین شرح که در هر برش زمانی کانال،  $\mathbf{h}^{(t)}$  تنک می‌باشد. همچنین، همبستگی در میان برش‌های زمانی متوالی گنجانده شده است. بنابراین، پاسخ ضربه یک کانال تنک در برش زمانی  $t$  ام به صورت [۱]:

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

گرفت و در بازسازی سیگنال مورد نظر استفاده کرد [۱۸]. به‌طور قاطعانه‌تر می‌توان گفت که اگر  $\delta$  را بازسازی شده سیگنال تنک اصلی  $s$  در نظر گرفت، آنگاه  $r$  می‌تواند به‌عنوان سیگنال بازسازی شده ابتدایی باشد. همچنین، سیگنال‌هایی که به وسیله حسگرهای نزدیک در یک شبکه حسگری به‌دست آمده‌اند و یا تصاویری که به وسیله چندین دوربین نزدیک به هم در سیستم‌های چند تصویر گرفته شده‌اند، مشابه مساله داشتن سیگنال‌های جانبی عمل می‌کنند. بدین جهت، این سیگنال‌ها نیز می‌توانند به‌عنوان اطلاعات جانبی و یا ابتدایی استفاده شوند. بنابراین، با استفاده از ویژگی‌های سیگنال اصلی، می‌توان به اطلاعات جانبی دسترسی داشته و در بازسازی سیگنال اصلی از آن‌ها بهره جست [۱۹].

هدف اصلی در این مساله، پاسخ به دو سؤال اساسی زیر می‌باشد:

(۱) بازسازی سیگنال  $s$  از اندازه‌گیری‌های آن و اطلاعات اولیه  $r$

چگونه صورت می‌گیرد؟

(۲) تعداد اندازه‌گیری‌های لازم برای یک بازسازی موفق چه

مقدار می‌باشد؟

تحقیقات بسیاری بر بررسی و بازیابی سیگنال‌هایی با تنها یک ویژگی و تعدا مشاهدات خطی کم، صورت گرفته است. اغلب نرم‌هایی<sup>۴۸</sup> که در بازیابی سیگنال‌هایی با یک ویژگی منحصر به فرد استفاده می‌شوند، شناخته شده‌اند و جهت بازیابی از تعداد بهینه‌ای از اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌کنند. برای مثال، نرم  $l_1$  برای سیگنالی با ویژگی تنکی و نرم هسته‌ای<sup>۴۹</sup> نیز برای ماتریسی با مرتبه پایین<sup>۵۰</sup> استفاده می‌شود [۲۰].

کاربردهای بسیاری وجود دارند که ساختار سیگنال در آن‌ها می‌تواند دارای چندین ویژگی به‌صورت همزمان باشد. برای مثال، در ماتریسی که تنک و دارای مرتبه کم باشد، الگوریتمی مورد نیاز است که هر دو نوع ویژگی را با حداقل سازی تعداد اندازه‌گیری‌های مورد نیاز جهت بازسازی به‌دست آورد. بنابراین هدف دستیابی به سیگنالی است که تمامی ویژگی‌های سیگنال اصلی را به‌صورت همزمان دارا باشد. از آنجا که می‌توان هر ویژگی را در یک مجموعه خاص جای داد، بدین جهت استخراج همزمانی ویژگی‌های سیگنال اصلی در فصل مشترک چندین مجموعه اتفاق می‌افتد که تمامی ویژگی‌های منحصر به فرد آن را مشخص می‌کند.

شایع‌ترین تنظیم‌کننده محدب<sup>۵۱</sup> مورد استفاده جهت استخراج سیگنال‌هایی با چندین ویژگی به‌صورت همزمان، یک ترکیب خطی از تنظیم‌کننده‌های شناخته‌شده مناسب برای استخراج هر ویژگی منحصر به فرد از سیگنال است. بنابراین، با توجه به ساختار سیگنال مورد نظر، ترکیب برخی نرم‌ها می‌تواند مورد توجه واقع شود [۲۰].

بنابراین اگر جدای از مجموعه اندازه‌گیری‌ها، به اطلاعات جانبی

نیز دسترسی داشته باشیم، مساله بازسازی سیگنال‌های تنک با اطلاعات جانبی مطرح می‌شود. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، حاکی از بهبود عملکرد آن به نسبت روش‌های سنتی بازیابی تنک

پایلوت ارسالی (سمبل‌های معلوم داده) در طول قطر بوده و  $F \in \mathbb{C}^{M \times N}$  نیز زیرماتریسی از تبدیل فوریه بوده که با نام ماتریس فوریه جزئی تصادفی<sup>۴۵</sup> شناخته شده و شامل سطرهای متناظر با مکان پایلوت‌ها است [۹]. رابطه مابین سمبل‌های OFDM و  $y^{(t)}$ ، با توجه به ساختار ماتریس اندازه‌گیری که شامل سمبل‌های معلوم داده بوده، در رابطه (۴) گنجانده شده است.

ماتریس فوریه جزئی تصادفی از دسته ماتریس‌های تصادفی دارای ساختار است، چرا که انتخاب سطرهای ماتریس فوریه به‌صورت تصادفی می‌باشد. همچنین شرط ویژگی همسان محدود<sup>۴۶</sup> (RIP)

$$\begin{aligned} (1 - \delta_{L(t)}) \|\mathbf{h}^{(t)}\|_2^2 &\leq \|\mathbf{A}^{(t)} \mathbf{h}^{(t)}\|_2^2 \\ &\leq (1 + \delta_{L(t)}) \|\mathbf{h}^{(t)}\|_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

را برای هر بردار تنک مانند  $L^{(t)} \in \mathbb{C}^N$ ،  $\|\mathbf{h}^{(t)}\|_0 \leq L^{(t)}$  اقلان کرده [۱۷]، که  $\delta_R \in (0, 1)$  ثابت RIP نامیده می‌شود. بنابراین  $\mathbf{A}$  به‌عنوان ماتریس اندازه‌گیری استفاده می‌شود. برای سادگی، ماتریس اندازه‌گیری  $\mathbf{A}^{(t)}$  در رابطه (۴) نامتغیر با زمان در نظر گرفته می‌شود، به‌گونه‌ای که  $\mathbf{A}^{(1)} = \mathbf{A}^{(2)} = \dots = \mathbf{A}^{(T)} = \mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_M]$  بوده، که  $\mathbf{a}_i$  ستون‌های ماتریس اندازه‌گیری می‌باشند.

### ۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی ما بر اساس بازیابی تنک با استفاده از اطلاعات جانبی جهت تخمین و ردگیری کانال تنک متغیر با زمان می‌باشد. اثر تنکی و اطلاعات جانبی در کانال تنک متغیر با زمان به‌صورت دو اصل در نظر گرفته می‌شود. بنابر اصل اول در کاربردهای تخمین کانال، پاسخ ضربه کانال‌های مخابرات بی‌سیم در نمایش باند پایه در حوزه زمان، ساختاری تنک دارند. اصل دوم استفاده از همبستگی زمانی در ساختار پاسخ ضربه کانال، با عنوان اطلاعات جانبی در ردگیری کانال‌های متغیر با زمان می‌باشد. در واقع یکی از چالش‌های اصلی سناریوهای متغیر با زمان، چگونگی استفاده از همبستگی سیگنال در بازسازی آن می‌باشد، که بازیابی تنک با اطلاعات جانبی در این مقاله، امکان استفاده از همبستگی زمانی کانال را فراهم می‌آورد.

در سناریوهای متغیر با زمان، تخمین هدف به همراه ردگیری آن صورت می‌گیرد. ردگیری به معنای دنبال کردن تغییرات وضعیت هدف می‌باشد. در ردگیری هدف، به‌منظور پردازش اندازه‌گیری‌های دریافت‌شده نویزی، از یک و یا چندین حسگر<sup>۴۷</sup> استفاده می‌شود. کانال تنک متغیر با زمان نیز نیازمند ردگیری است.

ابتدا تعریف دقیق‌تری از اطلاعات جانبی بیان می‌شود. بدین گونه که اگر برای هر سیگنال  $s$ ، یک سیگنال مشابه با آن  $r \in \mathbb{R}^N$  موجود باشد،  $r$  اطلاعات جانبی سیگنال اصلی گویند. این ویژگی در بسیاری از سناریوهای مختلف پردازش سیگنال اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال، در تخمین ویدیو، هر فریم به فریم‌های قبل و بعد شباهت بسیاری دارد. بنابراین سیگنال‌های مشابه را می‌توان به‌عنوان اطلاعات جانبی در نظر

محوشدگی کند، با توجه به تقریباً ثابت بودن کانال در طول زمان همدوسی کانال و استقلال برش‌های زمانی در طول دو زمان همدوسی متوالی، ردگیری کانال بسیار حیاتی نمی‌باشد. بنابراین در این حالت، اثر اطلاعات جانبی در تخمین کانال قابل محسوس نمی‌باشد. اما در محوشدگی سریع، از آنجا که همدوسی زمانی کانال از عرض سمبل ارسالی کمتر است، کانال در طول بازه زمانی یک سمبل دارای تغییرات می‌باشد. بدین جهت در کانال‌های با محوشدگی سریع، تخمین کانال نیازمند ردگیری بوده و روش پیشنهادی قابل استفاده است. با توجه به میزان همبستگی زمانی کانال تنک متغیر با زمان، پارامتر جریمه به صورت  $\lambda = |J_0(2\pi f_D t)|$  تعریف می‌شود. همچنین جهت حل معادله بهینه‌سازی (۹)، با توجه به محدب بودن آن از روش‌های گرادینتی (cvx) استفاده شده است.

تابع هدف در معادله بهینه‌سازی (۹) از دو قسمت تشکیل شده است. هدف از قسمت اول آن، استخراج ویژگی تنک بودن پاسخ ضربه کانال با استفاده از نرم  $l_1$  می‌باشد و قسمت دوم نیز جهت ردگیری تغییرات زمانی کانال است. در واقع، اطلاعات زیادی از کانال در برش زمانی جاری را می‌توان از نتایج تخمین‌های قبل با توجه به همبستگی زمانی با عنوان اطلاعات جانبی در کانال تنک متغیر با زمان به دست آورد. بنابراین، با استفاده از شباهت و یا همبستگی کانال به صورت اختلاف پاسخ ضربه کانال در برش‌های زمانی متوالی، عمل ردگیری کانال تنک متغیر با زمان انجام می‌شود.

با توجه به تنک بودن بردار پاسخ ضربه کانال در هر برش زمانی و شباهت کانال در برش‌های زمانی متوالی، اختلاف پاسخ ضربه آن‌ها برداری تنک می‌باشد. بنابراین، جهت استخراج ویژگی تنک بودن بردار گرادیان گسسته پاسخ ضربه کانال، در قسمت دوم تابع هدف نیز از نرم  $l_1$  استفاده شده است.

بردار گرادیان گسسته پاسخ ضربه کانال، نشات گرفته از نرم تغییرات کلی<sup>۵۴</sup> [۲۱] است که در کاربردهایی همچون تصویر با توجه به همبستگی موجود در آن‌ها، بسیار مورد توجه واقع شده است [۲۲، ۲۳]. همبستگی بدین معنا که در یک تصویر هر پیکسل با پیکسل‌های همسایه‌اش ارتباط نزدیکی دارد، آن‌گونه که پیکسل‌های همسایه حاوی اطلاعات مشابهی می‌باشند. بنابراین، می‌توان گفت که تصاویر هموار بوده و یا به عبارتی دارای ویژگی همبستگی می‌باشند. از آنجا که تصویر در دو بعد به صورت یک ماتریس قابل نمایش است، همبستگی آن در دو بعد سطر و ستون ماتریس گنجانده می‌شود. بدین جهت، نرم تغییرات کلی از جمع تغییرات در راستای سطر و ستون حاصل می‌شود. بنابراین، در پردازش تصویر و ویدئو، به صورت:

$$\|H\|_{TV_1} := \sum_{j,k=1}^N |(\nabla H)_{j,k,1}| + |(\nabla H)_{j,k,2}| \quad (10)$$

تعریف می‌شود، که در آن  $H \in N^2$  تصویر مورد نظر و  $\nabla: \mathbb{C}^{N^2 \times 1} \rightarrow \mathbb{C}^{N^2 \times 2}$  بیانگر گرادیان گسسته می‌باشد [۲۲].

می‌باشد. بازیابی تنک با اطلاعات جانبی، به وسیله اصلاح مناسب جستجوی پایه<sup>۵۲</sup> (BP) بررسی می‌شود. با تعریف تابع  $g: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$  به گونه‌ای که این تابع مقدار شباهت میان  $\hat{s}$  و اطلاعات جانبی  $r$  را اندازه‌گیری می‌کند، انتظار می‌رود که  $g(\hat{s} - r)$  مقدار کوچکی داشته باشد. بنابراین مساله بازیابی تنک با اطلاعات جانبی به حل معادله بهینه‌سازی زیر منجر می‌شود [۱۹]:

$$\hat{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|s\|_1 + \beta g(s - r) \text{ s.t. } \|y - As\|_2 \leq \varepsilon \quad (6)$$

که در آن  $\varepsilon, \beta > 0$  و  $\| \cdot \|_p$  به ترتیب نشان‌دهنده میزان ارزش دو قسمت موجود در تابع هدف معادله بهینه‌سازی، تخمینی از انرژی نویز اندازه‌گیری و نرم  $p$ -یک بردار با تعریف  $\|s\|_p := (\sum_{i=1}^N |s_i|^p)^{1/p}$  می‌باشند. در واقع  $\beta$  پارامتری جهت ارزش دادن به تنکی سیگنال و شباهت سیگنال به اطلاعات جانبی می‌باشد. تابع  $g(s - r)$  در دو حالت مشخص بررسی شده است، به گونه‌ای که مدل‌های محدب برای  $g: g_1 := \| \cdot \|_1$  و  $g: g_2 := \| \cdot \|_2$  در نظر گرفته شده است [۱۹]. بنابراین مساله موجود در رابطه (۶) به صورت روابط

$$\hat{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|s\|_1 + \beta \|s - r\|_1 \text{ s.t. } \|y - As\|_2 \leq \varepsilon \quad (7)$$

$$\hat{s} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|s\|_1 + \beta \|s - r\|_2 \text{ s.t. } \|y - As\|_2 \leq \varepsilon \quad (8)$$

تبدیل می‌شود، که به ترتیب، این مسائل به کمینه‌سازی  $l_1 - l_1$  و  $l_1 - l_2$  اشاره دارند [۱۹]. با توجه به تنک بودن تابع  $g(\hat{s} - r)$  در مساله ما که در ادامه بیشتر بیان می‌گردد، استفاده از کمینه‌سازی  $l_1 - l_1$  به نسبت  $l_1 - l_2$  دارای تنک‌ترین پاسخ خواهد بود. بنابراین، با توجه به شرایط مساله که سیگنال مورد نظر دارای دو ویژگی تنک و همبستگی است، معادله بهینه‌سازی پیشنهادی جهت تخمین پاسخ ضربه کانال تنک متغیر با زمان به صورت:

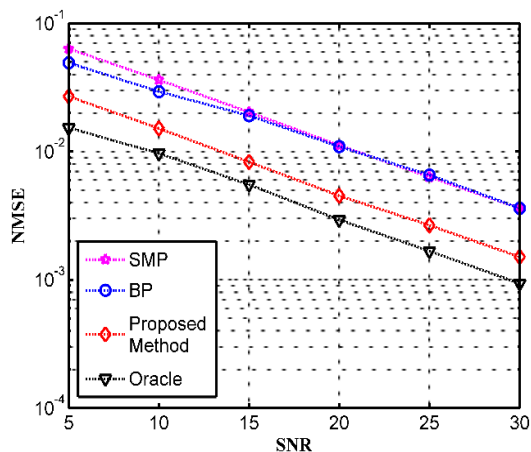
$$\hat{h} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \|y^{(t)} - Ah^{(t)}\|_2 \leq \varepsilon$$

می‌باشد، که در آن  $\hat{h}^{(t-1)}$  تخمین کانال در برش زمانی  $t - 1$  ام را بیان می‌کند.  $A, y^{(t)}$  و  $\varepsilon$  به ترتیب بردار اندازه‌گیری، ماتریس اندازه‌گیری و تخمینی از خطای نویز اندازه‌گیری می‌باشند.  $\lambda > 0$  نیز پارامتر جریمه<sup>۵۳</sup> است که قدرمطلق ضریب همبستگی میان برش‌های زمانی  $t$  ام و  $t - 1$  ام را نشان می‌دهد. در واقع، پارامتر جریمه  $\lambda > 0$  ارزش کانال در برش زمانی  $t - 1$  ام را جهت ردگیری کانال تنک متغیر با زمان تعیین می‌کند. از طرفی، همبستگی برش‌های زمانی کانال را می‌توان با توجه به نوع محوشدگی کند و سریع بیان کرد. در

جهت ارزیابی دقت تخمین گر پیشنهادی، تأثیر میزان دقت تخمین کانال در معیار میانگین مربعات خطای نرمالیزه شده<sup>۵۶</sup> (NMSE) برای یک مقدار معینی از تعداد پیلوت‌ها در مقادیر متفاوتی از سیگنال به نویز<sup>۵۷</sup> (SNR) بررسی خواهد شد. شبیه‌سازی برای تخمین‌گرهای SMP [۱۳]، BP [۱۴]، Oracle [۲۴] و روش پیشنهادی صورت گرفته است که در شکل (۲)، نشان داده شده است. تخمین‌گر Oracle با فرض دانستن مکان المان‌های غیرصفر، مقادیر بهره آن‌ها را بر اساس روش حداقل مربعات<sup>۵۸</sup> (LS) تخمین می‌زند. این تخمین‌گر از لحاظ میانگین مربع خطا بهینه بوده، بنابراین می‌تواند به‌عنوان کران پایین در معیار مقایسه در نظر گرفته شود [۲۴].

همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، از آنجا که تخمین‌گر SMP از دسته الگوریتم‌های حریصانه می‌باشد، به نسبت تخمین‌گر BP از دقت عملکرد پایین‌تری برخوردار می‌باشند. البته در SNR های بالا، این الگوریتم عملکرد مشابهی با BP دارد. همچنین با توجه به آن‌که تخمین‌گر پیشنهادی بر اساس BP می‌باشد، مقایسه این دو می‌تواند اثر اضافه‌شدن قسمت دوم از تابع هدف در معادله (۹) را نشان دهد. به‌گونه‌ای که با توجه به استفاده از ویژگی همبستگی زمانی به‌عنوان اطلاعات جانبی، تخمین‌گر پیشنهادی به نسبت BP بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. در واقع، اضافه‌نمودن قسمت دوم تابع هدف در روش پیشنهادی، معادل همان همبستگی زمانی در کانال‌های تنک متغیر با زمان می‌باشد. بنابراین در شکل (۲)، اثر ردگیری کانال تنک متغیر با زمان در بهبود تخمین، با مقایسه تخمین‌گر پیشنهادی و BP به‌خوبی قابل ملاحظه است.



شکل ۲: خطای میانگین مربع نرمالیزه شده در برابر نرخ سیگنال به نویز.

اثر اطلاعات جانبی بر تعداد اندازه‌گیری‌ها در روش پیشنهادی نیز حائز اهمیت است. از آنجا که، اختلاف تخمین‌گر پیشنهادی و BP، در استفاده از اطلاعات جانبی می‌باشد، این معیار در شکل (۳)، از دیدگاه تعداد اندازه‌گیری‌ها و در  $SNR = 20$  بررسی می‌شود. قابل مشاهده است که در صورت استفاده از اطلاعات جانبی در حسگری فشرده، تعداد اندازه‌گیری‌های کمتری مورد نیاز است. به‌عبارت دیگر، در یک اندازه‌گیری ثابت، تخمین‌گر پیشنهادی دارای خطای میانگین مربعات

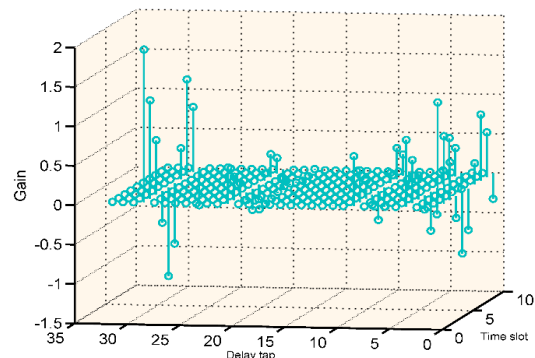
تفاوت قسمت دوم تابع هدف پیشنهادی جهت ردگیری کانال و نرم تغییرات کلی، استفاده از همبستگی تنها در یک بعد است. بنابراین در روش پیشنهادی، ردگیری تغییرات زمانی کانال به وسیله تخمین در برش‌های زمانی قبل و بردار تنک گرادیان گسسته پاسخ ضربه کانال با وزن‌دهی مشخص انجام می‌شود.

اثر اطلاعات جانبی بر تعداد اندازه‌گیری‌های مورد نیاز جهت بازیابی سیگنال تنک نیز مبحث مهمی می‌باشد. در حسگری فشرده، حداقل تعداد اندازه‌گیری‌هایی مورد نیاز می‌باشد. در صورت انتخاب مناسب تعداد اندازه‌گیری‌ها، می‌توان ادعا کرد که هر گونه انحرافی در مقدار تخمین‌زده شده، ناشی از نویز و میزان دقت تخمین‌گر در بازسازی سیگنال تنک خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی‌ها، نشان‌دهنده کاهش چشمگیر حداقل تعداد اندازه‌گیری‌های مورد نیاز در بازیابی تنک با استفاده از اطلاعات جانبی می‌باشد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، جهت ارزیابی روش پیشنهادی، از مدولاسیون OFDM با تعداد زیرحامل‌های  $K = 128$ ، تعداد زیرحامل‌های فعال  $K_u = 120$  و همچنین طول پیشوند دوری  $N_{CP} = 32$  استفاده می‌شود. میانگین تعداد مولفه‌های غیرصفر کانال با توزیع پواسن، برابر با  $E\{L^{(t)}\} = 4$  می‌باشد. با توجه به حداقل کران اندازه‌گیری در حسگری فشرده، تعداد پیلوت‌ها که معادل تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشند  $P = 20$  انتخاب شده است. نحوه تخصیص پیلوت‌ها نیز تصادفی می‌باشد. نتایج بر اساس روش مونت کارلو<sup>۵۵</sup> است که بر اساس میانگین‌گیری ۵۰۰ مرتبه تکرار به دست آمده است.

شکل (۱)، شبیه‌سازی پاسخ ضربه کانال با طول  $N = 32$  و دارای ویژگی‌های تنک و متغیر با زمان را در  $T = 10$  برش زمانی نشان می‌دهد. تغییرات ضرایب غیر صفر کانال از رابطه (۳) تبعیت می‌کنند که در آن  $f_c = 2\text{MHz}$  و  $f_D = 1200$  در نظر گرفته شده است. همچنین، کانال به‌صورت مارکوف مرتبه اول مدل شده و دارای محوشدگی سریع می‌باشد. به‌گونه‌ای که همبستگی ضرایب کانال از تابع بسل پیروی می‌کنند.



شکل ۱: کانال تنک متغیر با زمان.

شکل ۴: زمان اجرا (ثانیه) در برابر نرخ سیگنال به نویز.

### ۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله، مساله تخمین کانال‌های تنک متغیر با زمان در سیستم‌های OFDM بر اساس بازیابی تنک با اطلاعات جانبی، جهت استخراج دو ویژگی تنکی و متغیر با زمان کانال به صورت همزمان مطالعه شده است. نکته کلیدی، استفاده از همبستگی زمانی کانال‌های متغیر با زمان به عنوان اطلاعات جانبی می‌باشد. در این تحقیق، اثر اطلاعات جانبی بر تعداد اندازه‌گیری‌ها نیز بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دهنده بهبود در دقت تخمین و ردگیری کانال تنک متغیر با زمان و کاهش تعداد اندازه‌گیری‌ها، نسبت به الگوریتم‌های متداول بازیابی می‌باشند.

### مراجع

[1] D. Hu, X. Wang and L. He, "A new sparse channel estimation and tracking method for time-varying OFDM systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 9, pp. 4648–4653, 2013.

[2] 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.

[3] L. Tong, G. Xu and T. Kailath, "Blind identification and equalization based on second-order statistics: A time domain approach," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 40, no. 2, pp. 340–349, 1994.

[۴] محمود آتشبار و محمدحسین کهایی، «جهت‌یابی چند گوینده با استفاده از نمونه‌برداری فشرده مبتنی بر فاز»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۰، شماره ۲، صفحات ۱–۱۱، ۱۳۹۰.

[5] E. J. Candes and M. B. Wakin, "An Introduction To Compressive Sampling," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25, no. 2, pp. 21–30, 2008.

[6] C. R. Berger, S. Zhou, J. C. Preisig and P. Willett, "Sparse Channel Estimation for Multicarrier Underwater Acoustic Communication: From Subspace Methods to Compressed Sensing," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 3, pp. 1708–1721, 2010.

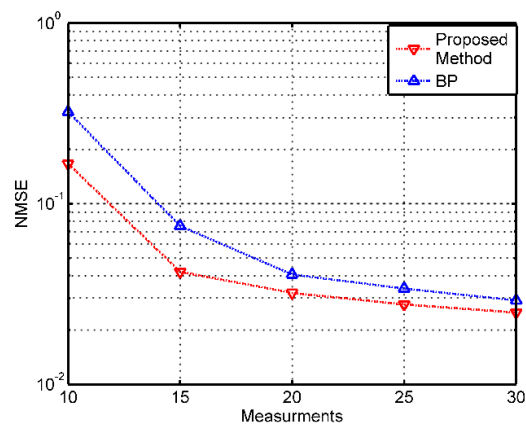
[7] K. Manolakis, C. Oberli, L. Herrera and V. Jungnickel, "Analytical Models for Channel Aging and Synchronization Errors for Base Station Cooperation," in *Signal Processing Conference (EUSIPCO), Proceedings of the 21th European*, pp. 3–7, 2013.

[8] N. Jing and L. Wang, "Dynamic Sparse Channel Estimation Using  $l_0$ -constrained Kalman Filter in OFDM Systems," in *International Conference on Big Data Computing and Communications*, pp. 28–42, 2015.

[9] R. Prasad, C. R. Murthy and B. D. Rao, "Joint Approximately Sparse Channel Estimation and Data Detection in OFDM Systems Using Sparse Bayesian Learning," *Signal Process. IEEE Trans.*, vol. 62, no. 14, pp. 3591–3603, 2014.

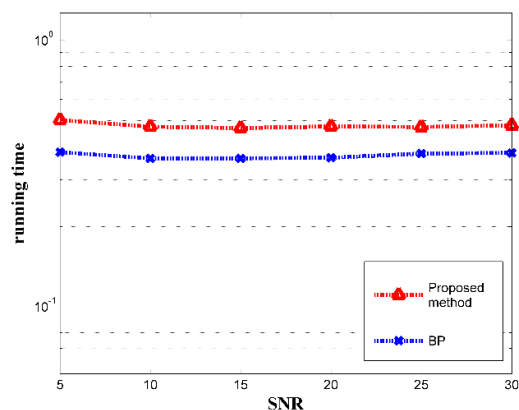
[10] S. Cotter and B. Rao, "The Adaptive Matching Pursuit Algorithm for Estimation and Equalization of Sparse Time-Varying Channels," In *Signals, Systems and Computers, Conference Record of the Thirty Fourth*

نرمالیز شده کمتری است. در واقع، با در دسترس بودن اطلاعات جانبی در نظریه بازیابی تنک، می‌توان با تعداد اندازه‌گیری‌های کمتر از کران اندازه‌گیری متداول به بازیابی موفق دست یافت.



شکل ۳: خطای میانگین مربع نرمالیزه شده در برابر اندازه‌گیری‌ها.

از طرفی، میزان پیچیدگی محاسباتی نیز یکی از معیارهای ارزیابی تخمین کانال می‌باشد. با افزایش پیچیدگی محاسباتی یک تخمین‌گر، پیاده‌سازی آن در عمل با مشکل مواجه خواهد شد. بنابراین، تخمین‌گری مؤثر واقع می‌شود که با وجود دقت بالا در تخمین، از پیچیدگی محاسباتی به نسبت کمتری بهره‌مند باشد. بنابراین در این قسمت از شبیه‌سازی‌ها اثر پیچیدگی محاسباتی با اضافه شدن اطلاعات جانبی در روش پیشنهادی و مقایسه می‌شود. شکل (۴) میزان پیچیدگی محاسباتی را با محاسبه زمان اجرای تخمین‌گر در برابر نسبت سیگنال به نویزهای مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، زمان اجرای تخمین‌گر با افزایش SNR تقریباً ثابت می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با وجود دقت بالای تخمین‌گر پیشنهادی، پیچیدگی محاسباتی آن اندکی افزایش می‌یابد. پیچیدگی در روش پیشنهادی در مقایسه با BP، به دلیل اضافه شدن قسمت دوم تابع هزینه بوده است که در واقع عمل ردگیری کانال تنک متغیر با زمان را بر عهده دارد. با این وجود می‌توان ادعا کرد که افزایش پیچیدگی روش پیشنهادی در مقایسه با BP، در مقابل افزایش دقت آن بسیار ناچیز و قابل اغماض می‌باشد.



- [18] H. Van Luong, J. Seiler, A. Kaup and S. Forchhammer, "Sparse signal reconstruction with multiple side information using adaptive weights for multiview sources," in *Image Processing (ICIP), IEEE International Conference*, pp. 2534-2538, 2016.
- [19] J. F. C. Mota, N. Deligiannis and M. R. D. Rodrigues, "Compressed Sensing with Prior Information: Optimal Strategies, Geometry, and Bounds," *IEEE Transaction on Information Theory*, no. 2, pp. 1-21, 2017.
- [20] S. Oymak, A. Jalali, M. Fazel, Y. C. Eldar, and B. Hassibi, "Simultaneously structured models with application to sparse and low-rank matrices," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2886-2908, 2015.
- [۲۱] هادی شگری و محمدحسین کهایبی، «حسگری فشرده تصاویر ابرطیفی و بازسازی با تنظیم‌کننده تغییرات کلی طیفی- مکانی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، پذیرفته شده برای چاپ.
- [22] D. Needell and R. Ward, "Near-optimal compressed sensing guarantees for total variation minimization," *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 22, no. 10, pp. 3941-3949, 2013.
- [23] D. Needell and R. Ward, "Stable image reconstruction using total variation minimization," in *SIAM Journal on Image Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 1035-1058, 2013.
- [24] J. Haupt, W. U. Bajwa, G. Raz and R. Nowak, "Toeplitz compressed sensing matrices with applications to sparse channel estimation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 11, pp. 5862-5875, 2010.
- [11] A. Yongac, "Estimation of Time-Varying Channels with Orthogonal Matching Pursuit Algorithm," *Advances in Wired and Wireless Communication, IEEE/Sarnoff Symposium*, no. 1, pp. 141-144, 2005.
- [12] X. Zhu, L. Dai, W. Dai, Z. Wang and M. Moonen, "Tracking a dynamic sparse channel via differential orthogonal matching pursuit," in *Military Communications Conference, MILCOM IEEE*, pp. 792-797, 2015.
- [13] X. Zhu, L. Dai, G. Gui, W. Dai, Z. Wang, and F. Adachi, "Structured matching pursuit for reconstruction of dynamic sparse channels," in *IEEE Global Communications Conference, (GLOBECOM)*, pp. 1-5, 2015.
- [14] S. C. S. Chen and D. Donoho, "Basis pursuit," *Proc. 28th Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput.*, vol. 1, pp. 41-44, 1994.
- [15] W. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. 1974.
- [16] M. L. Jakobsen, K. Laugesen, C. N. Manchón, G. E. Kirkelund, C. Rom and B. Fleury, "Parametric modeling and pilot-aided estimation of the wireless multipath channel in OFDM systems," in *Communications (ICC), IEEE International Conference*, pp. 1-6, 2010.
- [17] E. Candes and T. Tao, "Near Optimal Signal Recovery From Random Projections: Universal Encoding Strategies," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no.12, pp. 5406-5425, 2006.

## زیرنویس‌ها

35 Active  
 36 Symbol  
 37 Poison  
 38 Uncorrelated  
 39 Markov  
 40 Auto-correlation  
 41 Bessel  
 42 Carrier frequency  
 43 Maximum Doppler frequency  
 44 Angle of arrival  
 45 Random partial Fourier matrix  
 46 Restricted Isometry Property (RIP)  
 47 Sensor  
 48 Norm  
 49 Nuclear norm  
 50 Low rank  
 51 Convex regulation  
 52 Basis Pursuit (BP)  
 53 Forgetting factor  
 54 Total Variation  
 55 Monte Carlo  
 56 Normalized Mean Square Error (NMSE)  
 57 Signal to Noise Ratio (SNR)  
 58 Least Square (LS)

1 Multipath  
 2 Frequency selective  
 3 Flat fading  
 4 Inter Symbol Interference (ISI)  
 5 Training sequence  
 6 Blind  
 7 Sparse  
 8 Compressed Sensing (CS)  
 9 Measurement  
 10 Channel Impulse Response (CIR)  
 11 Cellular network  
 12 Under water acoustic  
 13 Ultra-Wide Band (UWB)  
 14 Delay  
 15 Tracking  
 16 Kalman filter  
 17 Autoregressive  
 18 Kalman Filtering-Based Sparse Bayesian Learning (KSBL)  
 19 KF Smoothing  
 20 Gain path  
 21 Adaptive  
 22 Time slot  
 23 Polynomial Basis Expansion Model (P-BEM)  
 24 Greedy  
 25 Matching Pursuit (MP)  
 26 Adaptive Matching Pursuit (AMP)  
 27 Adaptive Orthogonal Matching Pursuit (AOMP)  
 28 Differential Orthogonal Matching Pursuit (DOMP)  
 29 Structured Matching Pursuit (SMP)  
 30 Common tap  
 31 Dynamic tap  
 32 Sparse Recovery with Side Information (SRSI)  
 33 Temporal correlation  
 34 Subcarrier