

Evaluation of Interpolation Methods for Estimating Fading Channels in Digital TV Broadcasting

Ali Pouladsade*, Mohammad Ali Sebghati**

*M.Sc., IRIB University, Faculty of Media Engineering and Technology, Tehran, Iran

**Faculty Member, IRIB University, Faculty of Media Engineering and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Variations in telecommunication channels is a challenge of the wireless communication which makes the channel estimation and equalization a noteworthy issue. In OFDM systems, some subcarriers can be considered as pilots for channel estimation. In the pilot-aided channel estimation procedure, interpolation is an essential step to achieve channel response in data subcarriers. Choosing the best interpolation method has been the subject of various researches, because there is no interpolator as the best method in all conditions, and their performance depends on the fading model, signal-to-noise ratio and pilot overhead ratio. In this paper, the effect of different interpolation methods on the quality of DVB-T2 broadcast links is evaluated. A simulation platform is prepared in which different channel models are defined according to the real-world measurements. The interpolation for different pilot ratios is performed by seven widely-used methods: nearest neighbor, linear, cubic, spline, makima, FFT and modified Lagrange. After channel equalization by the results of the interpolator, the bit error rate is calculated as the main criterion for evaluation and comparison. The rules of selecting the appropriate interpolator in different conditions is presented. It is generally concluded that for fading scenarios close to flat fading or high pilot overhead ratio, the simple and fast interpolators such as linear interpolator are proper choices. But in harsh conditions, i.e., severe frequency-selective fading channels or low pilot overhead ratio, the more complicated interpolators such as cubic, spline and makima methods yield better results. The number of improvements and differences are quantified in this study.

Keywords: Channel estimation, One-dimensional interpolation, Fading channels, DVB-T2 standard.

بررسی کارایی روش‌های درونیابی برای تخمین کانال‌های محوشونده در پخش تلویزیون

دیجیتال

علی پولادساده*، محمد علی سبقتی***

* کارشناس ارشد، دانشگاه صداوسیما، دانشکده فنی و مهندسی رسانه

** عضو هیات علمی، دانشگاه صداوسیما، دانشکده فنی و مهندسی رسانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱ تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

تغییرات کانال‌های مخابراتی یکی از چالش‌های ارتباطات بی‌سیم است که مسأله جبرانسازی اثر کانال به کمک تخمین مناسبی از پاسخ آن را مورد توجه قرار داده است. در سیستم پرکاربرد OFDM، می‌توان زیرحامل‌هایی را به عنوان پایلوت برای تخمین کانال لحاظ کرد. در روند تخمین کانال به کمک پایلوت، درونیابی برای دستیابی به پاسخ کانال در زیرحامل‌های داده ضروری است. با توجه به تنوع روش‌های درونیابی، یافتن بهترین روش موضوع تحقیقات مختلفی بوده است، زیرا یک روش درونیابی به عنوان بهترین درونیاب در تمام شرایط وجود ندارد و عملکرد درونیابی به محوشوندگی کانال، سیگنال به نویز و سربرار پایلوت وابسته است. در این مقاله تأثیر روش‌های مختلف درونیابی روی کیفیت پخش تلویزیون دیجیتال طبق استاندارد DVB-T2 ارزیابی شده است. یک بستر شبیه‌سازی آماده شده است که مدل‌های مختلف کانال طبق اندازه‌گیری‌های واقعی در آن تعریف می‌گردد. درونیابی به ازای نسبت‌های پایلوت مختلف با هفت روش درونیابی نزدیکترین همسایه، خطی، مکعبی، اسپلاین، ماکیما، FFT و لاگرانژ اصلاح شده انجام می‌شود. پس از جبرانسازی کانال با نتیجه درونیابی، نرخ خطای بیت که معیار اصلی برای ارزیابی و مقایسه است بدست می‌آید. با انجام آزمایش‌های مختلف، قواعدی برای انتخاب درونیاب مناسب در شرایط متفاوت ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد وقتی محوشوندگی کانال نزدیک محوشوندگی تخت و یا نسبت پایلوت زیاد است، استفاده از درونیاب‌های ساده و سریع مانند درونیابی خطی بهتر است؛ ولی در شرایط دشوار یعنی وقتی محوشوندگی کانال شدید و یا نسبت پایلوت کم است، استفاده از درونیاب‌های پیچیده‌تر مانند درونیابی مکعبی، اسپلاین و ماکیما نتیجه بهتری دارد. میزان بهبود و تفاوت درونیاب‌ها به طور کمی استخراج شده است.

واژگان کلیدی: تخمین کانال، درونیابی یک بعدی، کانال‌های محوشونده، استاندارد DVB-T2.

۱. مقدمه

در ارتباطات بی سیم امروزی تغییرات فرکانسی و زمانی کانال یکی از چالش‌های مهم است. برای حل این مشکل باید اثر کانال مخرب جبران شود. به منظور جبرانسازی کانال^۱، باید تخمین مناسبی از پاسخ آن به دست آید. روش‌های مختلف تخمین کانال به سه رویکرد کور، نیمه کور و مبتنی بر پایلوت طبقه‌بندی شوند. الگوریتم‌های کور به هیچ داده آموزشی نیاز ندارند و از ویژگی‌های آماری یا ساختاری سیگنال‌های ارتباطی استفاده می‌کنند، ولی دقت تخمین در آنها کمتر است. از سوی دیگر، روش‌های تخمین با کمک پایلوت به مجموعه‌ای از نمادهای شناخته‌شده که با داده‌ها درهم آمیخته شده‌است نیاز دارند و به خطای تخمین کمتری نیز منجر می‌شوند. روش‌های نیمه‌کور یک معیار کور را با مقدار محدودی از داده‌های پایلوت ترکیب می‌کنند که هم نرخ موثر داده و هم سرعت همگرایی را بهبود می‌بخشد. این روش‌ها همچنین از پشتیبانی نمونه گسترده‌تری بهره می‌برند زیرا هم پایلوت و هم داده برای تخمین کانال استفاده می‌شود [۱].

فرآیند تخمین کانال به کمک پایلوت شامل سه مرحله است. مرحله اول چینش پایلوت‌ها در صفحه زمان-فرکانس است که انواع بلوکی، شانهای و پراکنده دارد [۲]. در این مقاله چینش پایلوت‌های مد نظر است که تعدادی از زیرحامل‌های هر سمبل OFDM^۲ را به پایلوت اختصاص می‌دهد، از این‌رو برای کانال‌هایی با تغییرات سریع (گسترش داپلر زیاد) مناسب‌تر است و ظرفیت پشتیبانی از تحرک بیشتر سیستم را دارد. مرحله دوم تخمین کانال در زیرحامل‌های پایلوت است که می‌تواند بوسیله یکی از روش‌های حداقل مربعات (LS)، حداقل میانگین مربعات خطا (MMSE)، حداقل مربعات بازگشتی (RLS) یا فیلتر کالمن انجام شود. مرحله سوم درونیابی پاسخ کانال در زیرحامل‌های داده است که برای آن نیز الگوریتم‌های مختلفی وجود دارد. بنابراین انتخاب درونیاب مناسب یکی از اقدام‌های مؤثر در این روند است. هر چه روند

درونیابی بهتر انجام شود، به تخمین بهتری از پاسخ کانال در زیرحامل‌های داده دست می‌یابیم که جبرانسازی کانال را بهبود می‌دهد. در پایلوت‌های نوع بلوکی، درونیابی در حوزه زمان مورد نیاز است. روش‌های درونیابی به دو نوع یک بعدی و دو بعدی قابل تقسیم است.

هنگامی که کانال به طور همزمان در هر دو محور زمان و فرکانس مورد بررسی قرار می‌گیرد، ممکن است سربار نمادهای پایلوت به طور قابل توجهی کاهش یابد، زیرا پردازش دو بعدی به طور همزمان همبستگی تابع کانال را در زمان و فرکانس بکار می‌گیرد. این ویژگی مزیت درونیابی‌های دو بعدی مانند فیلتر وینر است. فیلتر دوبعدی وینر که از نظر خطای میانگین مربع بهینه است، بر اساس اطلاعات آماری کانال طراحی می‌شود. در سناریوهای واقعی که کانال مستقیماً قابل مشاهده نیست، اطلاعات آماری کانال را به راحتی در اختیار نداریم. همچنین درونیاب‌های دو بعدی حجم پردازش بیشتری نیاز دارد. به همین دلیل درونیاب‌های یک بعدی که به اطلاعات اولیه از کانال نیاز ندارند و عملیات پیاده‌سازی آنها ساده‌تر است، کاربرد زیادی دارند. انواع مختلفی از طرح‌های درونیابی یک بعدی وجود دارد، از جمله درونیابی قطعه‌ای-ثابت، درونیابی خطی، درونیابی اسپلاین-مکعبی، درونیابی پایین گذر و درونیابی مرتبه دوم. درونیابی تکه‌ای-خطی و قطعه‌ای-ثابت از جمله ساده‌ترین رویکردها هستند. درونیابی مرتبه بالاتر مانند درونیابی چند جمله‌ای مرتبه دوم تکه‌ای، روش‌های پایین گذر و اسپلاین مکعبی، درونیابی کانالی را بهبود می‌بخشد. در [۳] هر دو نوع درونیابی یک بعدی و دو بعدی در سیستم OFDM ارزیابی شده‌است. از گروه درونیاب‌های دو بعدی علاوه بر فیلتر وینر، درونیابی سینک پایین گذر قابل تفکیک دو بعدی با پنجره کایزر^۳، درونیابی Deslauriers-Dubuc (DD) و درونیابی تبدیل فوریه گسسته دو بعدی بررسی شده‌است. از میان درونیاب‌های یک بعدی نیز

¹Channel Equalization

² Orthogonal Frequency Division Multiplexing

³ Kaiser

درونیایی خطی، درونیایی چند جمله‌ای مرتبه دوم، درونیایی اسپیلاین و درونیایی پایین گذر برای پایلوت‌های شانه‌ای در [۴] مورد تحقیق قرار گرفته است.

کارایی درونیایی‌های مختلف در کانال‌های LTE در پژوهش‌های مختلف ارزیابی شده است [۵]-[۸]. در [۶] یک تکنیک درونیایی برای تخمین کانال سیستم OFDM در استاندارد LTE-A بر مبنای تبدیل فوریه گسسته پیشنهاد شده است. در این تکنیک از دو درونیایی FFT^۱ یک بعدی استفاده می‌شود. ابتدا تخمین پاسخ فرکانسی کانال (CFR^۲) در زیرحامل‌های پایلوت توسط تخمینگر LS بدست می‌آید و نتیجه آن برای حذف نویز به فیلتر وینر داده می‌شود. در ادامه، پاسخ فرکانسی کانال در زیرحامل‌های داده به کمک FFT درونیایی می‌شود. بدین منظور در خروجی FFT از داده، تعدادی صفر اضافه و روی دنباله جدید IFFT اعمال می‌شود. این کار معادل درونیایی در حوزه زمان است که با اضافه کردن صفر^۳ در حوزه فرکانس اجرا شده است. برای کانال LTE با محوشوندگی سریع، کارایی روش‌های مختلف درونیایی با آزمایش‌های عملی و اندازه‌گیری ارزیابی شده است [۷]. این بستر تست اجازه اندازه‌گیری تا سرعت ۴۰۰ کیلومتر در ساعت را داده است. این آزمایش‌ها با دو نوع درونیایی خطی و اسپیلاین روی تعداد پایلوت‌های مختلف اجرا شده است. روش‌های مورد مقایسه عبارت است از درونیایی خطی روی دو پایلوت در فریم جاری، درونیایی‌های خطی و اسپیلاین روی چهار پایلوت (دو پایلوت از فریم جاری و دو پایلوت از فریم‌های قبلی و بعدی)، و درونیایی اسپیلاین روی شش پایلوت (چهار پایلوت قبلی به اضافه دو پایلوت دیگر از فریم‌های قبلی و بعدی). استفاده از پایلوت‌های فریم‌های مجاور زمانی سودمند است که عواملی مانند تغییر کانال و تکنیک پرش فرکانسی^۴ نتیجه تخمین کانال در آن فریم‌ها را نامعتبر نکند. در [۸]، اثبات شده است که عملکرد تکنیک‌های تخمین کانال به کمک پایلوت نه تنها به SNR و نسبت پایلوت و شرایط کانال بستگی دارد، بلکه به انتخاب روش درونیایی برای استخراج پاسخ کانال در زیرحامل‌های غیرپایلوت نیز وابسته است. نرخ خطای بیت (BER) با روش‌های درونیایی مختلف شامل درونیایی چندجمله‌ای، چندجمله‌ای هرمیت مکعبی (PCHIP)، خطی، اسپیلاین و تکه‌ای مکعبی در تخمین سه پروفایل کانال توسعه‌یافته ITU برای LTE بدست آمده است. در این آزمایش‌ها از تخمینگر LS استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی مذکور نشان می‌دهد استفاده از روش

برخی از پروفایل‌های کانال محوشونده بستگی دارد. برای تخمین کانال‌های OFDM، روشی در [۹] پیشنهاد شده است که تخمین پاسخ کانال در پایلوت‌ها را با تخمینگر ML^۵ بدست می‌آورد و نتیجه را با چندجمله‌ای لاگرانژ درونیایی می‌کند. در [۱۰]، روش درونیایی لاگرانژ اصلاح‌شده^۶ با محدود کردن بازه‌های درونیایی پیشنهاد شده است. کارایی روش لاگرانژ اصلاح شده در کنار انواع درونیایی اسپیلاین، سینک، مکعبی و لاگرانژ روی تخمین کانال با محوشوندگی دوگانه گزین^۷ بررسی و مقایسه شده است. برای کاهش پیچیدگی، پاسخ کانال با بسط توابع پایه (BEM^۸) مدلسازی شده است.

در [۱۱] یک ساختار درونیایی دو بعدی با ترکیب دو درونیایی یک بعدی با روش حداقل میانگین مربعات خطا پیشنهاد شده است. کارایی این روش در استاندارد DVB-H^۹ که گیرنده‌های آن تحرک دارند ارزیابی شده است. علیرغم نسخه‌های زمینی و ماهواره‌ای استاندارد DVB برای پخش تلویزیون دیجیتال که با موفقیت در کشورهای مختلف دنیا در حال به کارگیری است، نسخه این استاندارد برای ادوات دستی شکست خورد و وارد کاربرد گسترده نشد.

در [۱۲] عملکرد سیستم OFDM روی یک کانال چندمسیره با محوشوندگی رایلی بر اساس معیار BER ارزیابی شده است. برای تخمین کانال در زیر حامل‌های پایلوت از روش LS استفاده می‌شود و برای یافتن پاسخ کانال در زیرحامل‌های داده روش‌های مختلف درونیایی شامل درونیایی اسپیلاین، درونیایی مکعبی، درونیایی پایین گذر، درونیایی FFT و درونیایی خطی بکار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده است. علاوه بر مقایسه این تکنیک‌های درونیایی، یک تکنیک درونیایی موثر برای تخمین پاسخ فرکانسی کانال در زیر حامل‌های داده بر اساس طرح پایلوت شانه‌ای ارائه شده است. روش درونیایی پیشنهادی بر اساس کاهش خطای درونیایی و نویز کانال در تخمین LS است. در مرحله اول از روش درونیایی، پاسخ فرکانسی کانال با استفاده از تکنیک‌های درونیایی یک بعدی محاسبه می‌شود. سپس، پاسخ کانال تخمینی به کمک تبدیل IFFT از حوزه فرکانس به حوزه زمان منتقل می‌شود و در زمان‌هایی که انرژی کمی وجود دارد، یعنی فقط اثر نویز دیده

درونیایی چند جمله‌ای مرتبه دوم، درونیایی اسپیلاین و درونیایی پایین گذر برای پایلوت‌های شانه‌ای در [۴] مورد تحقیق قرار گرفته است.

کارایی درونیایی‌های مختلف در کانال‌های LTE در پژوهش‌های مختلف ارزیابی شده است [۵]-[۸]. در [۶] یک تکنیک درونیایی برای تخمین کانال سیستم OFDM در استاندارد LTE-A بر مبنای تبدیل فوریه گسسته پیشنهاد شده است. در این تکنیک از دو درونیایی FFT^۱ یک بعدی استفاده می‌شود. ابتدا تخمین پاسخ فرکانسی کانال (CFR^۲) در زیرحامل‌های پایلوت توسط تخمینگر LS بدست می‌آید و نتیجه آن برای حذف نویز به فیلتر وینر داده می‌شود. در ادامه، پاسخ فرکانسی کانال در زیرحامل‌های داده به کمک FFT درونیایی می‌شود. بدین منظور در خروجی FFT از داده، تعدادی صفر اضافه و روی دنباله جدید IFFT اعمال می‌شود. این کار معادل درونیایی در حوزه زمان است که با اضافه کردن صفر^۳ در حوزه فرکانس اجرا شده است. برای کانال LTE با محوشوندگی سریع، کارایی روش‌های مختلف درونیایی با آزمایش‌های عملی و اندازه‌گیری ارزیابی شده است [۷]. این بستر تست اجازه اندازه‌گیری تا سرعت ۴۰۰ کیلومتر در ساعت را داده است. این آزمایش‌ها با دو نوع درونیایی خطی و اسپیلاین روی تعداد پایلوت‌های مختلف اجرا شده است. روش‌های مورد مقایسه عبارت است از درونیایی خطی روی دو پایلوت در فریم جاری، درونیایی‌های خطی و اسپیلاین روی چهار پایلوت (دو پایلوت از فریم جاری و دو پایلوت از فریم‌های قبلی و بعدی)، و درونیایی اسپیلاین روی شش پایلوت (چهار پایلوت قبلی به اضافه دو پایلوت دیگر از فریم‌های قبلی و بعدی). استفاده از پایلوت‌های فریم‌های مجاور زمانی سودمند است که عواملی مانند تغییر کانال و تکنیک پرش فرکانسی^۴ نتیجه تخمین کانال در آن فریم‌ها را نامعتبر نکند. در [۸]، اثبات شده است که عملکرد تکنیک‌های تخمین کانال به کمک پایلوت نه تنها به SNR و نسبت پایلوت و شرایط کانال بستگی دارد، بلکه به انتخاب روش درونیایی برای استخراج پاسخ کانال در زیرحامل‌های غیرپایلوت نیز وابسته است. نرخ خطای بیت (BER) با روش‌های درونیایی مختلف شامل درونیایی چندجمله‌ای، چندجمله‌ای هرمیت مکعبی (PCHIP)، خطی، اسپیلاین و تکه‌ای مکعبی در تخمین سه پروفایل کانال توسعه‌یافته ITU برای LTE بدست آمده است. در این آزمایش‌ها از تخمینگر LS استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی مذکور نشان می‌دهد استفاده از روش

⁶ Modified Lagrange

⁷ Doubly-selective

⁸ Basis Expansion Model

⁹ Digital Video Broadcasting-Hand-held

¹ Fast Fourier Transform

² Channel Frequency Response

³ Zero-padding

⁴ Frequency hopping

⁵ Maximum Likelihood

کانال‌های محوشونده در استاندارد DVB-T2⁶ انجام نشده است [۱۶]. در این مقاله، با تهیه یک بستر شبیه‌سازی و انجام آزمایش‌های مختلف، به دنبال ارزیابی عملکرد درونیاب‌های یک بعدی مختلف روی کانال‌های محوشونده در پخش زمینی تلویزیون دیجیتال منطبق با استاندارد DVB-T2 هستیم. چون استاندارد DVB-T2 در پخش زمینی صداوسیما جمهوری اسلامی ایران در حال بکارگیری و توسعه است، این استاندارد انتخاب شده است. با چنین پژوهشی می‌توان بهترین روش درونیابی را در شرایط مختلف این نوع ارتباطات تعیین کرد. معیار ارزیابی، نرخ خطای بیت (BER) است که معیاری متداول در سنجش کیفیت تبادل داده در یک لینک محسوب می‌شود. روش‌های درونیابی مورد مقایسه در بخش ۲ معرفی می‌شوند. در بخش ۳ بستر شبیه‌سازی تشریح می‌گردد. توضیح آزمایش‌ها و نتایج آنها در فصل ۴ آمده است. در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در فصل ۵ انجام می‌شود.

۲. معرفی روش‌های درونیابی

در این فصل روش‌های درونیابی که برای پاسخ کانال‌های محوشونده قابل استفاده است به طور اجمالی معرفی می‌گردد.

۲-۱ درونیابی خطی

درونیابی خطی انطباق بهترین خط راست بین دو نقطه داده است. فرض می‌کنیم $f(x)$ تابع اصلی باشد که مقادیر آن تنها در تعدادی نقطه گسسته معلوم است و $g(x)$ نیز تقریب درونیابی شده از آن تابع باشد. نقاطه x_0 و x_1 داده‌های هستند که به آن‌ها نقاط یا گره‌های درونیابی می‌گویند. برای عبور دادن خط از نقاط $(x_0, f(x_0))$ و $(x_1, f(x_1))$ رابطه زیر وجود دارد.

$$g(x) = f(x_0) \frac{(x_1 - x)}{(x_1 - x_0)} + f(x_1) \frac{(x - x_0)}{(x_1 - x_0)} \quad (1)$$

با محاسبه خط بین هر دو نقطه داده، درونیابی تکه‌ای-خطی بدست می‌آید.

۲-۲ درونیابی مکعبی کانولوشنی^۷

درونیابی براساس کانولوشن از داده‌های نمونه‌برداری شده یکنواخت به درونیابی هسته کرنل^۸ 1^h شاره دارد. $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ که وزن‌های تعیین شده $f_k = f(kT)$ را به نمونه‌های تابع اصلی $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ نسبت می‌دهد. برای سهولت در علامت‌گذاری

می‌شود، صفر قرار می‌گیرد. در نهایت، پاسخ ضربه کانال در حوزه زمان از طریق عملیات تبدیل فوری سریع (FFT) به پاسخ فرکانسی کانال تبدیل می‌شود.

در [۱۳] مسأله درونیابی به صورت یک مسأله تجزیه ماتریس^۱ تعریف و حل شده است. یک ماتریس مرتبه پایین^۲ می‌تواند با تکنیک تجزیه ماتریس درونیابی شود. در این تکنیک پاسخ کانال در سمبل‌های OFDM و زیرحامل‌های مختلف به صورت یک ماتریس دوبعدی ثبت و با حل یک بهینه‌سازی مقید تجزیه می‌شود. چون حل این مسأله به طور مستقیم پیچیده است، الگوریتمی تکراری با استفاده از SVD^۳ ارائه شده است. البته اجرای این الگوریتم نیز زمان‌بر است. همچنین کارایی این نوع درونیابی برای کانال‌هایی با شیفته داپلر کم (۵ تا ۷۰ هرتز) نسبت به روش‌های گذشته بهبود یافته است و در شیفته داپلرهای بالا ضعیف است. این تکنیک روی کل ماتریس پاسخ کانال اجرا می‌شود، لذا در زمره روش‌های درونیابی دوبعدی است که در مقایسه با آنها نیز حجم محاسبات و زمان بیشتری نیاز دارد.

در راستای بهبود دقت درونیابی خطی که روشی ساده و کم هزینه ولی با خطای زیاد است، تکنیک‌هایی جهت بهینه‌سازی مبدأ مؤثر و زاویه خط به کارگرفته شده است [۱۴]. این روش گرچه نسبت به روش خطی عملکرد بهتری دارد ولی پیچیدگی آن حتی نسبت به درونیابی‌های غیرخطی نیز افزایش می‌یابد.

برای بهبود تخمین کانال در گیرنده‌های MIMO، روشی بر مبنای جستجوی مؤلفه‌های کانال با رویکرد بیزین^۴ و کاهش نویز در [۱۵] ارائه شده است. این روش که در سناریوهای بدون دید مستقیم (NLOS^۵) شبکه 5G شبیه‌سازی شده است، گرچه به نام درونیابی بیزین شناخته می‌شود، ولی در واقع روشی برای تخمین کانال البته در زیرحامل‌های بدون پایلوت است که به اطلاعات کانال مانند توزیع آماری مؤلفه‌ها نیاز دارد.

تحقیقات گذشته نشان می‌دهد عملکرد روش‌های مختلف درونیابی به پاسخ کانال وابسته است، چون رفتار تابعی که به دنبال درونیابی آن هستیم روی نتیجه درونیابی تأثیر دارد. پس به دلیل تنوع توابع، درونیاب‌های مختلف نیز جهت پاسخگویی به این تنوع ارائه شده است. در کانال‌های ارتباطی متفاوت، الگوی رفتار پاسخ کانال متفاوت است که مدل‌های مختلفی برای توصیف آنها ارائه شده است. در پژوهش‌های پیشین، کارایی درونیابی‌های مختلف در کانال‌هایی مانند استانداردهای شبکه‌های موبایل ارزیابی شده است. تاکنون چنین پژوهشی درباره کارایی روش‌های درونیابی برای انواع

⁵ Non-line of sight

⁶ Digital Video Broadcasting-Terrestrial

⁷ Cubic Convolutional Interpolation

⁸ kernel

¹ Matrix factorization

² Low-rank

³ Singular Value Decomposition

⁴ Bayesian

$$\alpha_0 = \frac{3l^2}{N_F^2} - \frac{2l^3}{N_F^3} \quad (7)$$

۴-۲ درونیابی نزدیکترین همسایه^۴

درونیابی نزدیکترین همسایه یا نمونه‌گیری نقطه‌ای یا درونیابی نقطه نزدیک مرکز یک روش ساده درونیابی برای توابع چندمتغیره در یک یا دو بعد است. الگوریتم نزدیکترین همسایه مقدار تابع در نزدیکترین نقطه را انتخاب کرده و به نقاط همسایگی دیگر نیازی ندارد. بدین ترتیب الگوریتم نزدیکترین همسایه یک تخمین موثر به صورت قطعه قطعه تولید می‌کند. اجرای این الگوریتم بسیار ساده است زیرا به محاسبات خاصی نیاز ندارد.

۵-۲ درونیابی آکیما^۵

روش آکیما برای هر بازه $[x_i, x_{i+1}]$ از مجموعه داده‌های ورودی گره‌های x و مقادیر v ، به طور جداگانه درونیابی هر میت چندجمله‌ای مکعبی پیدا می‌کند که هم مقادیر داده شده v_i و v_{i+1} را در گره‌های فاصله x_i و x_{i+1} درونیابی می‌کند و هم دارای مشتقات خاص d_i و d_{i+1} در x_i و x_{i+1} است. نکته کلیدی درونیابی هرمیت مکعبی، انتخاب مشتقات d_i است. آکیما در [۱۸] فرمولی برای مشتق ارائه داد که از نوسان محلی بیش از حد جلوگیری می‌کند. فرض کنید شیب در بازه $[x_i, x_{i+1}]$ عبارت است از

$$\delta_i = (v_{i+1} - v_i) / (x_{i+1} - x_i)$$

مشتق آکیما در x_i به این صورت تعریف می‌شود:

$$d_i = \frac{|\delta_{i+1} - \delta_i| \delta_{i-1} + |\delta_{i-1} - \delta_{i-2}| \delta_i}{|\delta_{i+1} - \delta_i| + |\delta_{i-1} - \delta_{i-2}|} \quad (8)$$

این کمیت نشان دهنده یک میانگین وزنی بین دامنه δ_{i-1} و δ_i فواصل $[x_{i-1}, x_i]$ و $[x_i, x_{i+1}]$ است.

$$d_i = \frac{w_1}{w_1 + w_2} \delta_{i-1} + \frac{w_2}{w_1 + w_2} \delta_i \quad (9)$$

$$w_1 = |\delta_{i+1} - \delta_i| \quad (10)$$

$$w_2 = |\delta_{i-1} - \delta_{i-2}| \quad (11)$$

توجه داشته باشید که مشتق آکیما در x_i به طور محلی از پنج نقطه $x_{i-2}, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, x_{i+2}$ محاسبه می‌شود. برای نقاط پایانی x_1 و x_n به شیب‌های $\delta_0, \delta_{n-1}, \delta_n$ و δ_{n+1} نیاز دارد. از آنجا که این شیب‌ها در داده‌های ورودی موجود نیستند، آکیما پیشنهاد کرد با استفاده از درونیابی درجه دوم محاسبه آنها به صورت زیر انجام گیرد:

$$\delta_0 = 2\delta_1 \delta_2 \quad (12)$$

و بدون از دست دادن کلیت، فرض $T = 1$ لحاظ می‌گردد. در این صورت، فرآیند با رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$f(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} f_k \varphi(x - k) \quad (2)$$

کرنل (هسته) باید شرایط زیر را داشته‌باشد.

$$\varphi(0) = 1 \quad (3)$$

$$\varphi(k) = 0 \quad \forall k \neq 0 \quad (4)$$

۳-۲ درونیابی اسپلاین^۱

درونیابی اسپلاین، یک روش درونیابی است که در آن، نوع خاصی از یک چندجمله‌ای تکه‌ای با نام اسپلاین به کار می‌رود. درونیابی اسپلاین اغلب نسبت به درونیابی چندجمله‌ای ترجیح داده می‌شود، زیرا حتی وقتی از چندجمله‌ای‌هایی با درجه پایین برای اسپلاین استفاده می‌شود، می‌توان به خطای درونیابی کمتری دست یافت. درونیابی اسپلاین از مسئله پدیده رونگه^۲ جلوگیری می‌کند [۱۷]. در پدیده رونگه، هنگام استفاده از چندجمله‌ای‌های مرتبه بالا در درونیابی، ممکن است بین نقاط نوسان رخ دهد.

روش کلاسیک برای استفاده از چندجمله‌ای درجه ۳، اسپلاین مکعبی^۳ نامیده می‌شود که در آن، مشتق اول پیوسته است، اما مشتق دوم پیوسته نیست. درونیابی مکعبی اسپلاین یک چندجمله‌ای ساده و پیوسته متناسب با نقاط داده تولید می‌کند. ایده اصلی در مورد درونیابی مکعبی اسپلاین به رسم منحنی‌های هموار از طریق تعدادی از نقاط است. روش درونیابی مکعبی اسپلاین دقت درونیابی هموار و بهتری ارائه می‌دهد. اگر $\hat{H}(k)$ پاسخ کانال در زیر حامل k ، اندیس پابلوت‌ها و N_p تعداد نقاط موجود برای درونیابی یا همان تعداد پابلوت‌ها باشد، رابطه درونیابی اسپلاین بصورت زیر است،

$$\begin{aligned} \hat{H}(k) &= \hat{H}(kN_F + l) \\ &= \alpha_1 \hat{H}_p(m+1) + \alpha_0 \hat{H}_p(m) \\ &\quad + N_F \alpha_1 \hat{H}'_p(m+1) \\ &\quad - N_F \alpha_0 \hat{H}'_p(m) \end{aligned} \quad (5)$$

$$m = 0, 1, \dots, N_p - 1$$

$\hat{H}'_p(m)$ مشتق مرتبه اول $\hat{H}_p(m)$ است. α_0 و α_1 نیز

بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\alpha_1 = \frac{3(N_F - 1)^2}{N_p^2} - \frac{2(N_F - 1)^3}{N_p^3} \quad (6)$$

⁴ Nearest-neighbor interpolation

⁵ Akima

¹ Spline

² Runge

³ Cubic Spline

درونیایی لاگرانژ بر مبنای ساخت تابع پایه چندجمله‌ای از روی فاصله میان نقطه درونیایی با نقطه مرجع است. تابع پایه lm به صورت زیر ساخته می‌شود،

$$f_m(x) = \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq m}}^{N_p} \frac{x - p_m}{p_m - p_m} \quad (16)$$

در این رابطه، p_m نقطه مرجع lm است که در مسأله ما پایلوت lm محسوب می‌شود. هر پایلوت یک تابع پایه مربوط به خود را دارد و در مجموع باید N_p پایه ساخته شود. ترکیب خطی این توابع پایه نتیجه درونیایی لاگرانژ را بدست می‌دهد. هر چه مرتبه چندجمله‌ای بیشتر باشد، نتیجه درونیایی بهتر است ولی پیچیدگی الگوریتم به شدت افزایش می‌یابد. همچنین پدیده رونگه موجب می‌شود درونیایی در نقاط مرزی از مقدار واقعی دورتر باشد و افت محسوس در کارایی درونیایی ایجاد می‌نماید [۹]. دلیل نیاز به مرتبه بالاتر، بزرگ بودن بازه‌های درونیایی است. در [۱۰] روش درونیایی لاگرانژ اصلاح شده بر اساس ایده تغییر این بازه‌ها پیشنهاد شده است. در این روش، بازه‌های پایلوت‌ها برای درونیایی متفاوت است. بدین منظور کل بازه شامل N_p نقطه مرجع (پایلوت‌ها) به تعدادی زیر بازه کوچکتر با همپوشانی تقسیم می‌گردد. پایه‌های درونیایی برای هر زیربازه جداگانه بدست می‌آید. پس از درونیایی تمام زیربازه‌ها، خروجی مجدداً با همپوشانی جمع می‌گردد تا از قسمت‌های تکراری میانگین‌گیری شود. این روش دقت بیشتری در درونیایی دارد و خطای تخمین کانال را کاهش می‌دهد [۱۰].

۳. روش پیشنهادی

هدف این پژوهش، ارزیابی تأثیر روش‌های درونیایی مختلف در تخمین کانال پخش زمینی تلویزیون دیجیتال است که بر اساس آن چارچوبی جهت انتخاب درونیاب مناسب پیشنهاد شده است. در طرح پیشنهادی از یک درونیاب ثابت استفاده نمی‌شود، بلکه درونیاب را باید متناسب با شرایط کانال و در صد سربرابر پایلوت تغییر داد. به عبارت دیگر، به جای استفاده از یک درونیاب ثابت که در استانداردهایی مانند DVB-T2 معمول است، بهتر است درونیاب به صورت وفقی باشد و متناسب با شرایط تغییر کند.

اولین عامل مؤثر در انتخاب درونیاب، پاسخ کانال محو شونده است. برای کانال‌های محوشونده، دو عامل گسترش تأخیر^۱ (معکوس پهنای باند همدوسی^۲) و گسترش داپلر^۳ (معکوس زمان همدوسی^۴) وجود دارد. با توجه به این که درونیایی

$$\delta - 1 = 2\delta_0 - \delta_1 \quad (13)$$

$$\delta_n = 2\delta_{n-1} - \delta_{n-2} \quad (14)$$

$$\delta_{n+1} = 2\delta_n - \delta_{n-1} \quad (15)$$

۲-۶ درونیایی ماکیما

درونیایی ماکیما بهبود یافته روش اکیما است پس از نوع هرمیت مکعبی قطعه‌ای است. در روش اکیما نقاط دو طرف یک بازه وزن‌های برابر دارند ولی در روش ماکیما سمتی که به حالت افقی نزدیکتر است اولویت دارد تا از بالازدگی در درونیایی اجتناب شود. این بهبود موجب شده است که روش ماکیما ویژگی‌های زیر را داشته‌باشد.

- نوسان‌هایی ایجاد می‌کند که حد وسط خوبی بین درونیاب "اسپلاین" و "چندجمله‌ای هرمیت مکعبی" قرار می‌گیرد.
- یک درونیاب مکعبی محلی است که به شبکه‌های دو بعدی و شبکه‌های با ابعاد بالاتر تعمیم می‌یابد.
- مقاومت فرمول اکیما را در لوب‌های فرعی برابر افزایش می‌دهد.
- هنگامی که داده‌ها برای بیش از دو گره متوالی ثابت باشند، نوع خاصی از بالازدگی را از بین می‌برد.

۲-۷ درونیایی با FFT

مبنای روش درونیایی با FFT افزودن صفر به انتهای دنباله داده در ناحیه تبدیل است. با اعمال IFFT روی دنباله جدید که بزرگتر شده است، دنباله درونیایی شده بدست می‌آید. این روند روی ماتریس پاسخ کانال قابل پیاده‌سازی است. فرض کنید نتیجه تخمین کانال در N_p زیرحامل پایلوت برای l_p سمبل OFDM در ماتریسی با ابعاد $N_p \times l_p$ ذخیره شده باشد. ابتدا N_p -FFT برای یک بعدی روی ستون‌های ماتریس (محور فرکانس) برای تمام l_p سمبل اعمال می‌شود. در انتهای خروجی هر FFT که برداری با N_p درایه است، به تعداد زیرحامل‌های داده صفر اضافه می‌شود تا درایه‌های آن به N ، یعنی تعداد کل زیرحامل‌های OFDM (مجموع زیرحامل‌های پایلوت و داده) افزایش یابد. اکنون روی تمام ستون‌ها N -IFFT اعمال می‌شود. روند مشابهی روی سطرها تکرار می‌شود تا از روی l_p سمبل پایلوت، تخمین کانال برای تمام سمبل‌های OFDM بدست آید [۷].

۲-۸ درونیایی لاگرانژ و لاگرانژ اصلاح شده

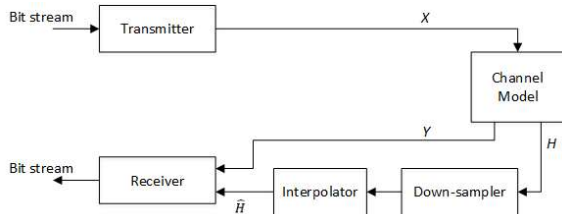
³ Doppler spread

⁴ Coherence time

¹ Delay spread

² Coherence bandwidth

در این رابطه Y_k خروجی کانال و \hat{H}_k تخمینی از پاسخ کانال در زیر حامل k است. نتیجه این جبران سازی یعنی \hat{X} تخمینی از ورودی کانال در آن زیر حامل است. دنباله خروجی گیرنده با دنباله اصلی مقایسه و BER بدست می آید. بلوک دیاگرام این شبیه سازی در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. بلوک دیاگرام شبیه سازی

برای مدل سازی کانال از پارامترهای گزارش شده در [۱۹] استفاده شده است که برای کانالهای DVB-T2 ارائه شده است. این مدل ها با انجام آزمایش هایی در منطقه شهری زاگرب بدست آمده است. در این اندازه گیری ها سه نوع مدل مسیر بلند، متوسط و کوتاه برای کانال DVB-T2 معرفی شده است. هر سه مدل محوشوندگی رابلی با ۶ مسیر است که تأخیرها و افت های مسیرهایشان تفاوت دارد. کانال بلند نشان دهنده شرایطی است که در آن یک مسیر سیگنال مستقیم است و مسیرهای دیگر بسیار تضعیف شده و حداکثر تأخیر آن به ۷۵ میکروثانیه می رسد. کانال متوسط مشابه بلند است ولی با تأخیر سیگنال تا ۲۱ میکروثانیه. کانال کوتاه تأخیرهای بسیار کمتری دارد و حداکثر تأخیر به ۲٫۸ میکروثانیه می رسد، اما سیگنال ها ضعیف می شوند که دریافت را سخت تر می کند. پروفایل این سه نوع کانال در جدول های زیر آمده است.

جدول ۱. تضعیف مسیرها بر حسب dB برای سه مدل کانال

مسیر	کانال کوتاه	کانال متوسط	کانال بلند
۱	۲٫۸	۰	۰
۲	۰	۸٫۶	۹
۳	۳٫۸	۱۲٫۶	۲۲
۴	۰٫۱	۱۸	۲۵
۵	۲٫۶	۲۰٫۷	۲۷
۶	۱٫۳	۲۲٫۲	۲۸

جدول ۲. تأخیر مسیرها بر حسب میکروثانیه برای سه مدل

مسیر	کانال کوتاه	کانال متوسط	کانال بلند
۱	۰	۰	۰
۲	۰٫۰۵	۱	۵

یک بعدی در محور فرکانس مد نظر است، مشخصه اول یعنی گسترش تأخیر که به میزان فرکانس گزینی پاسخ کانال مرتبط است به عنوان معیار بررسی وضعیت کانال لحاظ می شود. درونیایی کانال در محور زمان که از همبستگی زمانی پاسخ کانال استفاده می کند تحت تأثیر گسترش داپلر است و در مطالعه فعلی تأثیر ندارد. یکی دیگر از مشخصه های کانال میزان نویز است که با پارامتر SNR نمایندگی می شود. ارزیابی این پژوهش نشان می دهد تأثیر SNR روی انتخاب درونیاب کمتر از عامل قبلی است.

علاوه بر تأثیر پاسخ کانال روی عملکرد درونیایی که در پژوهش های گذشته نیز مورد توجه بوده است، درصد سربار پیلوت نیز در انتخاب درونیاب تأثیر دارد. به عبارت دیگر، میزان نمونه های موجود از تابع، روی خطای درونیایی از آن مؤثر است. ممکن است با تعداد کمی نمونه از یک تابع، درونیاب پیچیده ای مانند مکعبی یا ماکیما بهتر از درونیاب ساده خطی عمل کند؛ ولی با افزایش تعداد نمونه ها از همان تابع، پاسخ درونیایی خطی حتی از درونیایی مکعبی یا ماکیما نیز بهتر شود. در این شرایط انتخاب درونیاب مکعبی تحمیل پیچیدگی و هزینه بی فایده و حتی مضر است، چون نوسان ها به خصوص در نقاط مرزی که تعدادشان بیشتر شده است باعث افزایش خطا می شود، در حالی که این تعداد نمونه برای درونیایی خطی کفایت می کند و خطای کمتری دارد.

در روش پیشنهادی، گسترش تأخیر کانال و درصد سربار پیلوت دو معیار انتخاب درونیاب یک بعدی مناسب است. قواعد و چارچوب انتخاب درونیاب مناسب با آزمایش های مختلفی حاصل شده است. به منظور ارزیابی عملکرد درونیاب های مختلف، یک لینک مخابراتی با مدولاسیون 4-QAM و OFDM با ۱۰۲۴ زیرحامل در محیط MATLAB شبیه سازی شده است. در این شبیه سازی، پارامترهای مدل های مختلف کانال برای تولید پاسخ آن وارد می شود. تنها نسبت مشخصی از نمونه های پاسخ کانال که به طور منظم انتخاب می شوند وارد بخش درونیاب می گردند. بدین منظور پاسخ کانال (H) وارد بخش Down-sampler می شود که نرخ آن متناسب با درصد سربار پیلوت تعیین می گردد. نمونه هایی که حذف می شوند نقش پاسخ کانال در زیرحامل های داده را دارند که مقدارشان نامعلوم است. نمونه های باقیمانده نقش مقدار پاسخ کانال در پیلوت ها را دارند که وارد درونیاب می شوند و از روی آنها تخمین پاسخ کانال در تمام زیرحامل ها (\hat{H}) بدست می آید. از نتیجه درونیایی برای جبران سازی به روش LS استفاده می گردد که رابطه آن به صورت زیر است.

$$\hat{X}_k = \frac{Y_k}{\hat{H}_k} \quad (17)$$

شکل ۲. نمونه‌ای از دامنه پاسخ فرکانسی کانال محوشونده (الف) مدل کوتاه (ب) مدل متوسط (ج) مدل بلند

۳	۰,۴	۵	۱۴
۴	۱,۴۵	۸	۳۵
۵	۲,۳	۱۲	۵۴
۶	۲,۸	۲۱	۷۵

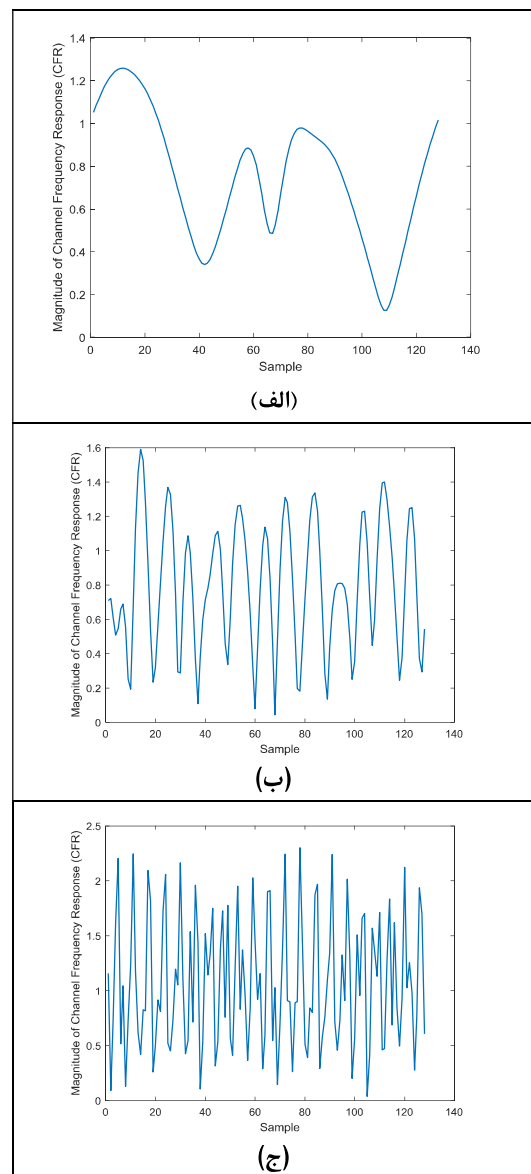
۴. نتایج آزمایش‌ها

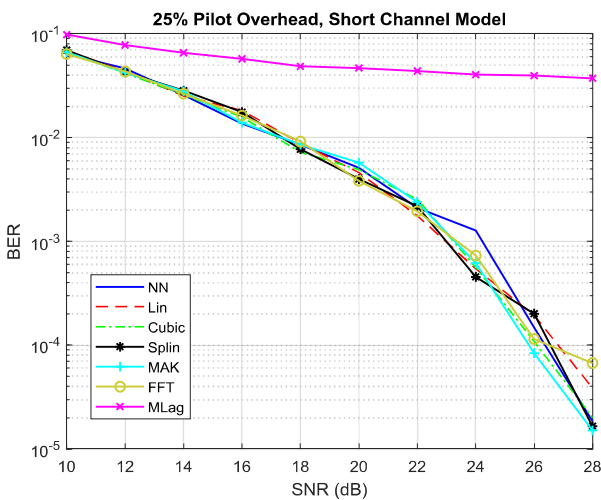
برای ارزیابی تأثیر درونیاب‌های مختلف روی مدل‌های متفاوت کانال، آزمایش‌های مختلفی در بستر شبیه‌سازی انجام شده‌است. به ازای هر یک از سه مدل معرفی شده از کانال DVB-T2، درونیابی با سه نسبت پایلوت ۵ درصد، ۱۰ درصد و ۲۵ درصد ارزیابی شده‌است. نسبت پایلوت ۲۵ درصد نسبت بالایی است و در استانداردهای پخش تلویزیون دیجیتال استفاده نمی‌شود، بلکه در ارتباطات بی‌سیم که تغییرات فرکانسی و زمانی کانال شدیدتر است (مانند شبکه‌های ad hoc با گره‌های متحرک) به کار می‌رود. در این آزمایش‌ها نسبت بالا برای مقایسه انتخاب شده‌است. نسبت پایلوت ۱۰ درصد نسبتی معمول است که در الگوی پایلوت استاندارد DVB-T نیز تعریف شده‌است. نسبت پایلوت ۵ درصد هم نماینده نسبت پایلوت کم است. البته در استاندارد DVB-T2 که چندین الگوی پایلوت قابل استفاده است، میانگین نسبت پایلوت تا این مقدار یا حتی ۲ درصد نیز قابل کاهش است (متناسب با شرایط کانال). با ترکیب سه نسبت پایلوت برای سه مدل کانال، ۹ آزمایش انجام شده‌است که نتایج آنها در سه زیرفصل مجزا (به تفکیک نوع کانال) آمده‌است. در هر آزمایش ۷ نوع درونیاب نزدیکترین همسایه (NN)، خطی (Lin)، مکعبی (Cubic)، اسپلاین (Splin) ماکیما (MAK)، و لاگرانژ اصلاح شده (MLag) با یکدیگر مقایسه گردیده‌است. بنابراین در مجموع این آزمایش‌ها، ۶۳ منحنی BER استخراج و در قالب ۹ شکل ترسیم شده‌است. برای محاسبه BER در هر SNR، بیش از ۱۰ هزار بیت آزمایش شد که در قالب ۱۰ بلوک ۱۰۲۴ بیتی وارد کانال شدند. برای هر بلوک، یک پاسخ کانال جدید از مدل مورد نظر استخراج گردید تا با پاسخ کانال بلوک‌های دیگر متفاوت باشد.

۴-۱ کانال کوتاه

نتایج درونیابی مدل کانال کوتاه با ۵ درصد سربرار پایلوت در شکل ۳ نمایش داده شده‌است. عملکرد درونیاب‌های مکعبی و اسپلاین و FFT نزدیک به یکدیگر و از سایر درونیاب‌ها بهتر است. پس از بین این سه درونیاب، بهتر است درونیاب با زمان و هزینه پردازش کمتر انتخاب شود. درونیاب لاگرانژ اصلاح شده گرچه پیچیده‌تر از درونیاب خطی و نزدیکترین همسایه است، ولی به خطای کمتری منجر نمی‌شود. با افزایش نسبت پایلوت‌ها به ۱۰ درصد، نرخ خطا کاهش می‌یابد که طبق انتظار است (شکل ۴). در این حالت خطای روش‌های نزدیکترین همسایه و ماکیما نیز به روش‌های مکعبی و اسپلاین نزدیک می‌شود. در آزمایش بعد که با

درباره حداکثر شیفت داپلر، با توجه به سکون یا تحرک کم فرستنده و گیرنده‌های تلویزیون دیجیتال، اثر داپلر بسیار کم است. تنها به جهت جابجایی‌های ناشی از عوامل طبیعی یا غیرعمدی مانند باد و با توجه به اطلاعات موجود در شرایط آزمایش، سرعت نسبی ۰,۴ کیلومتر بر ساعت لحاظ شده‌است که در باند فرکانسی UHF معادل ۰,۲۵ هرتز شیفت فرکانس داپلر می‌شود. نمونه‌های دامنه‌ی پاسخ فرکانسی از این سه مدل کانال محوشونده در شکل زیر نمایش داده شده‌است. تغییرات پاسخ فرکانسی کانال تحت تأثیر پدیده محوشوندگی کاملاً واضح است و این رفتار در مدل‌ها تفاوت دارد.





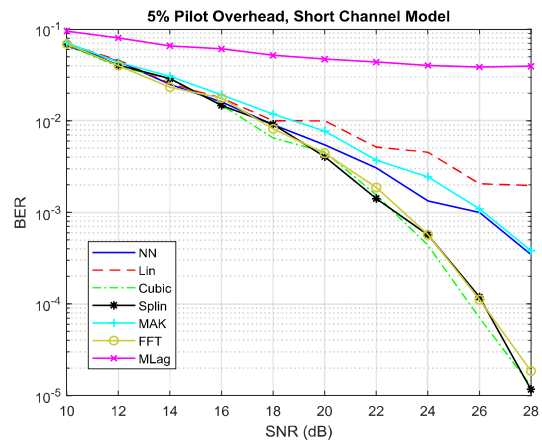
شکل ۵. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سربار پایلوت ۲۵ درصد در مدل کانال کوتاه

در آزمایشی که در صد سربار ۲۵ درصد و عملکرد روش‌ها از نظر BER نزدیک یکدیگر است، زمان لازم برای اجرای درونیاب‌های مختلف در جدول ۳ به طور صعودی ارائه شده است. این زمان‌ها با PC یکسان که CPU آن از نوع Core i7 است برای پردازش تمام ۱۰۲۴۰ بیت تحت آزمایش اندازه‌گیری شده است. از روی این زمان‌ها مشاهده می‌شود کمترین زمان اجرا مربوط به روش نزدیکترین همسایه یعنی ساده‌ترین روش درونیابی است. بیشترین زمان اجرا برای روش مکعبی است. این رتبه‌بندی روش‌های درونیابی بر اساس زمان اجرا به نوع کانال وابسته نیست، لذا در آزمایش‌های دیگر تکرار نمی‌شود.

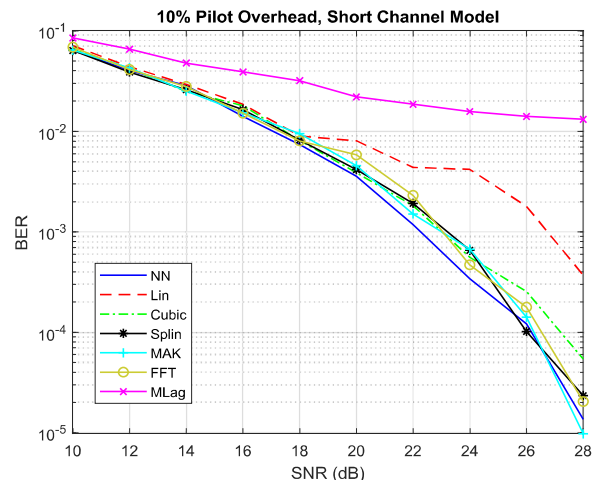
۲-۴ کانال متوسط

در کانال متوسط نیز با نسبت پایلوت کم، روش‌های مکعبی و اسپلاین بهترین نتیجه را دارند. درونیاب‌های ساده‌ای مانند نزدیکترین همسایه و خطی پاسخ خوبی ندارند و افت آنها کند می‌شود، یعنی به نظر می‌رسد حتی با افزایش SNR خطا از یک حدی پایین‌تر نمی‌آید (شکل ۶). با افزایش تعداد پایلوت‌ها در مدل کانال متوسط، پاسخ درونیاب‌های ساده و خطی بهبود محسوس‌تری می‌یابند. خطای درونیاب خطی حتی از درونیاب اسپلاین نیز کمتر می‌شود (شکل ۷). با نسبت پایلوت ۲۵ درصد در مدل کانال متوسط، نتیجه درونیاب خطی به طور محسوسی از سایر درونیاب‌ها بهتر می‌شود و کمترین خطا را دارد، در حالی که خطای درونیاب‌های پیچیده‌تر مانند مکعبی و اسپلاین پاسخ بهتری نسبت به آزمایش قبل ندارد و خطا در همان مرتبه باقی‌مانده است (شکل ۸). این نتیجه جالبی است، زیرا نشان می‌دهد در این شرایط انتخاب درونیاب پیچیده بهتر نیست. پس ترجیح درونیاب مکعبی به درونیاب خطی موجب ضرر از هر دو دیدگاه دقت درونیابی و زمان اجرا می‌شود، چون این درونیاب هم پیچیده‌تر و کندتر است و هم خطا با آن افزایش یافته است. چنین

۲۵ درصد سربار پایلوت انجام شده است و اطلاعات زیادی برای درونیابی وجود دارد، نتیجه همه روش‌های درونیابی به جز لاگرانژ اصلاح شده به یکدیگر نزدیک می‌شود (شکل ۵). در این شرایط انتخاب درونیاب ساده و سریعی مانند درونیاب خطی توجیه پذیرتر است. در SNR بالا، خطای روش ماکیما از خطای روش‌های مکعبی و اسپلاین نیز کمتر می‌شود، ولی این بهبود خیلی چشمگیر نیست. بنابراین از روی این نمودارها می‌توان درونیاب مناسب را بدون حساسیت روی مقدار SNR انتخاب کرد.



شکل ۳. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سربار پایلوت ۵ درصد در مدل کانال کوتاه

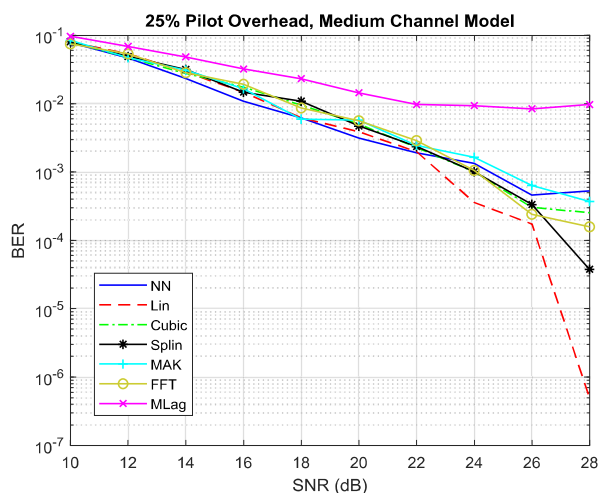


شکل ۴. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سربار پایلوت ۱۰ درصد در مدل کانال کوتاه

تعبیری درباره سایر درونیاب‌های پیچیده‌تر از خطی نیز صادق است.

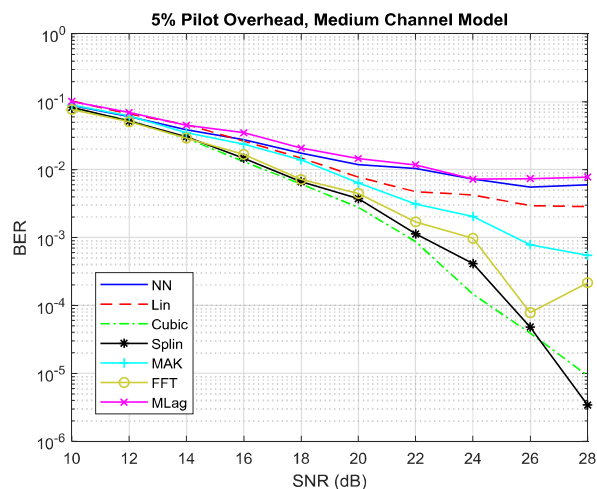
جدول ۳. زمان اجرای برنامه شبیه‌سازی

روش درونیابی	زمان اجرا (ثانیه)
نزدیکترین همسایه (NN)	۳۲۹,۶
اسپلاین (Splin)	۳۳۰,۰۴
خطی (Lin)	۳۳۰,۳
تبدیل فوریه سریع (FFT)	۳۳۴,۳۸
لاگرانژ اصلاح شده (MLag)	۳۴۵,۱۶
ماکیما (MAK)	۳۴۹,۴
مکعبی (Cubic)	۳۶۴,۳

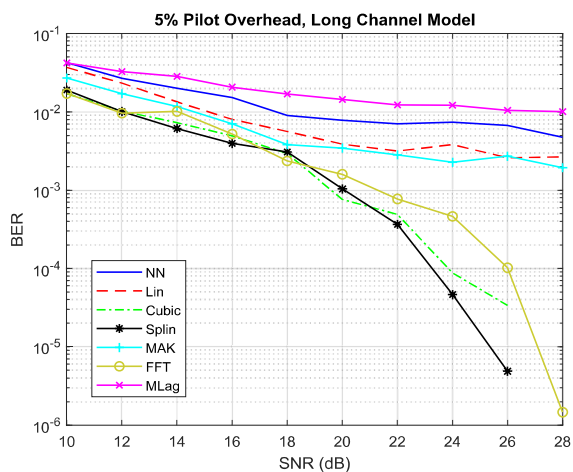


شکل ۸. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سربار پایلوت ۲۵ درصد در مدل کانال متوسط

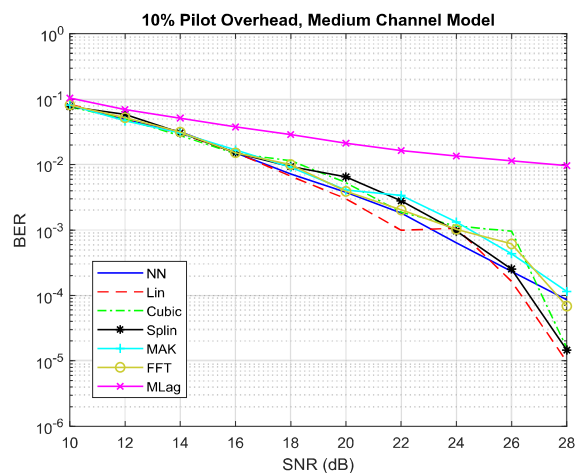
در مدل کانال بلند، درونیابی با نسبت پایلوت‌های کم با روش‌های اسپلاین و مکعبی نتیجه بهتری دارد (شکل ۹) که مشابه نتیجه‌گیری در مدل‌های قبلی کانال است. با افزایش نسبت پایلوت‌ها به ۱۰ درصد، پاسخ درونیاب خطی بهبود می‌یابد و به درونیاب مکعبی نزدیک می‌شود (شکل ۱۰). با نسبت پایلوت ۲۵ درصد در مدل کانال بلند، درونیاب مکعبی همچنان بهترین نتیجه را دارد، گرچه اختلاف آن با درونیاب‌های اسپلاین، ماکیما، FFT و حتی خطی کمتر است (شکل ۱۱). درونیاب‌های نزدیکترین همسایه و لاگرانژ اصلاح شده در این مدل کانال نتیجه مطلوبی ندارد و حتی در نسبت پایلوت بالا خطای آن به طور محسوسی از سایر روش‌ها بیشتر است.



شکل ۶. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سربار پایلوت ۵ درصد در مدل کانال متوسط



شکل ۹. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سربار پایلوت ۵ درصد در مدل کانال بلند



شکل ۷. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سربار پایلوت ۱۰ درصد در مدل کانال متوسط

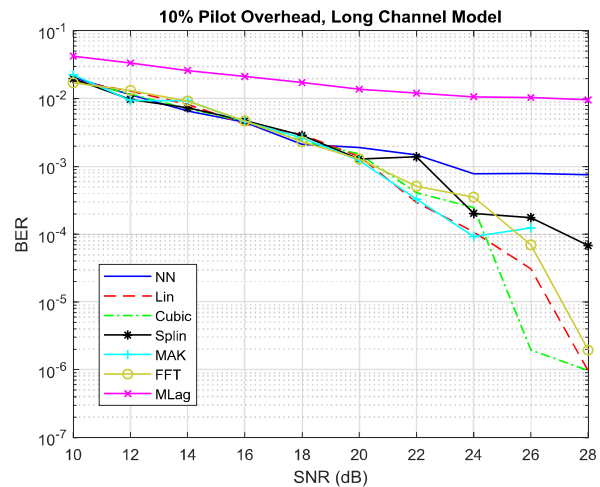
۵. نتیجه گیری

در این پژوهش اثر درونیابی روی تخمین و جبران سازی کانال و در نتیجه کیفیت یک لینک DVB-T2 ارزیابی شد. برای این ارزیابی آزمایش های مختلفی انجام گرفت که پارامترهای آن از جمله مدل کانال بر اساس مقادیر استاندارد و اندازه گیری های واقعی انتخاب شده است. از مجموع این بررسی ها نتایج زیر حاصل می شود.

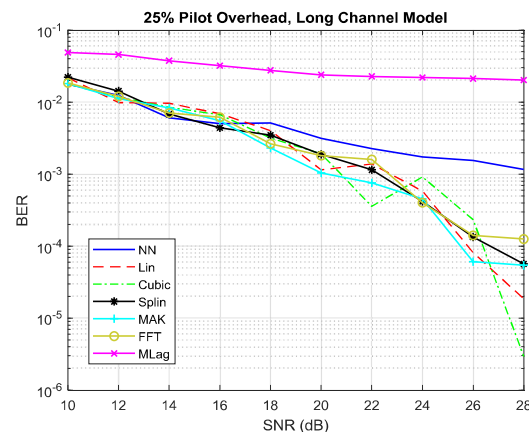
- تحلیل اثر نسبت پایلوت: با افزایش در صد سر بار پایلوت، خطا در همه روش ها و مدل های کانال کاهش می یابد. البته با افزایش این نسبت که به معنای بهبود شرایط است، اختلاف میان کارایی روش های درونیابی کمتر می گردد. در این شرایط بین یک روش ساده مانند نزدیکترین همسایه و یک روش پیچیده تفاوت زیادی نیست، بنابراین استفاده از درونیاب های پیچیده تر توجیه ضعیف تری دارد و با یک درونیاب ساده نیز می توان به نتایج مشابه یا حتی بهتر رسید (به خصوص برای کانال هایی با محو شونگی ضعیف تر). به عبارت دیگر وقتی به تعداد کافی پایلوت وجود دارد، تقریب های ساده نتایج بهتری دارد در حالی که نتیجه تقریب های پیچیده ممکن است از مقادیر واقعی دور تر شود. اهمیت درونیاب ها در نسبت پایلوت های کمتر مشهود است و در چنین شرایطی بهتر است از پایلوت های پیچیده تر مانند مکعبی و اسپلاین استفاده کرد. در کل پیچیده تر شدن درونیابی همواره منجر به بهتر شدن نتیجه نمی شود.

- تحلیل اثر مدل کانال: به ازای یک نسبت پایلوت برابر در مدل های کانال متفاوت، نتیجه درونیاب ها متفاوت است. این مشاهده نشان می دهد نتیجه درونیابی به رفتار کانال نیز وابسته است. مثلاً برای نسبت پایلوت بالا (۱۰ و ۲۵ در صد) بهترین درونیاب برای مدل کانال متوسط درونیاب خطی است، در حالی که برای مدل بلند درونیاب مکعبی در برخی مقادیر SNR نتیجه بهتری دارد. در این مقایسه SNR نیز می تواند تا حدی مؤثر باشد.

در مجموع می توان نتیجه گرفت که انتخاب روش درونیابی باید متناسب با شرایط طراحی (نسبت سر بار پایلوت) و مدل کانال باشد و یک روش درونیابی همواره بهترین روش نیست. در این انتخاب هم باید به دقت حاصل (با معیار BER) توجه داشت و هم به پیچیدگی الگوریتم که با زمان پیاده سازی آن ارتباط دارد و برای سیستم های بلادرنگ مهم است. چنین تحلیلی و نتیجه گیری های مشابه برای برخی ارتباطات مانند شبکه های موبایل انجام شده است ولی برای کانال های پخش تلویزیون دیجیتال انجام نشده بود که این پژوهش با هدف پاسخگویی به این خلأ و یافتن بهترین درونیاب برای کانال های DVB-T2 انجام



شکل ۱۰. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سر بار پایلوت ۱۰ درصد در مدل کانال بلند



شکل ۱۱. منحنی BER بر حسب SNR به ازای سر بار پایلوت ۲۵ درصد در مدل کانال بلند

۳-۴ کانال بلند

چارچوب پیشنهادی برای انتخاب درونیاب کانال پخش زمینی تلویزیون دیجیتال بر اساس آزمایش های متنوع و تحلیلی که ارائه شد بدست می آید. بر اساس این چارچوب، وقتی تعداد پایلوت ها کم و گسترش تأخیر کانال کم است (شرایط خوب کانال)، درونیابی اسپلاین انتخاب خوبی است. با افزایش گسترش تأخیر کانال که به معنای افزایش فرکانس گرینی است، پرداخت هزینه پردازش بیشتر برای درونیاب مکعبی توجیه پذیر می شود. وقتی سر بار پایلوت زیاد و شرایط کانال خوب است، درونیابی خطی انتخاب مناسبی است، زیرا با زمان و هزینه پردازش کمتر به نتایج مشابه درونیاب های ماکیما و مکعبی می رسد. با بدتر شدن وضعیت کانال (افزایش گسترش تأخیر)، درونیاب های ماکیما و مکعبی که به خصوص در برخی SNR ها پاسخشان بهتر می شود، قابل انتخاب هستند. انتخاب درونیاب نزدیکترین همسایه که کمترین زمان و هزینه پردازش را دارد و درونیاب لاگرانژ اصلاح شده به طور کلی توصیه نمی شود.

- [10] L. Yong, S. Guodong, S. Xuanfan *et al.* "BEM-based Channel Estimation and Interpolation Methods for Doubly-selective OFDM Channel", in *IEEE International Conference on Smart Internet of Things*, Aug. 2018, China.
- [11] G. Liu, L. Zeng, H. Li, *et al.*, "Adaptive Interpolation for Pilot-Aided Channel Estimator in OFDM System," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 60, no. 3, Sep. 2014.
- [12] K. Hariprasad, S. Sandeep and C. Manikanta, "An Interpolation Technique for Channel Estimation in OFDM Systems," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4, August 2015.
- [13] N. Suga, R. Sasaki, T. Furukawa, "Channel Estimation Using Matrix Factorization Based Interpolation for OFDM Systems," in *IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019)*, USA, Sep. 2019.
- [14] X. Chen, M. Jiang, "Enhanced Adaptive Polar-Linear Interpolation Aided Channel Estimation," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, 2019.
- [15] A. Osinsky, A. Ivanov, D. Yarotsky, "Bayesian Approach to Channel Interpolation, in Massive MIMO Receiver," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 12, 2020.
- [16] *EN 302755 - V1.3.1 - Digital Video Broadcasting (DVB)*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2012.
- [17] C. Hall and W. Meyer, "Optimal Error Bounds for Cubic Spline Interpolation," *Journal of Approximation Theory*, vol. 16, Issue 2, February 1976.
- [18] H. Akima, "A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures," *Journal of the Association for Computing Machinery*, vol. 17, no. 4, pp. 589-602, 1970.
- [19] D. Tralic, E. Domic, J. Vukovic and S. Grgic, "Simulation and Measurement of DVB-T2 Channel Characteristics," in *International Symposium on Electronics in Marine (ELMAR)*, Croatia, 12-14 Sept. 2012.

شد. این انتخاب منحصر به یک درونیاب نیست، بلکه چارچوبی برای انتخاب وقتی روش درونیابی ارائه و ارزیابی شد.

مراجع

- [1] H. M. Mahmoud, A. S. Mousa and R. Saleem, "Channel Estimation Based in Comb-Type Pilots Arrangement for OFDM System over Time Varying Channel," *Journal of Networks*, vol. 5, no. 7, 2010.
- [2] Y. Liu, Z. Tan, H. Hu, L. J. Cimini, and G. Y. Li, "Channel Estimation for OFDM," *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 1891–1908, 2014.
- [3] X. Dong, Wu-Sheng Lu and A. Soong, "Linear Interpolation in Pilot Symbol Assisted Channel Estimation for OFDM," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 5, 2007.
- [4] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems," *IEEE Transaction on Broadcasting*, vol. 48, no. 3, pp. 223-229, 2002.
- [5] S. Adegbite, B. G. Stewart and S. G. McMeekin, "Least Squares Interpolation Methods for LTE System Channel Estimation over Extended ITU Channels," *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 3, no. 4, 2013.
- [6] M. Lerch, "Experimental Comparison of Fast-Fading Channel Interpolation Methods for the LTE Uplink," in *57th International Symposium ELMAR*, Croatia, Sep. 2015.
- [7] M. Zourob, R. Rao, "2×1-D Fast Fourier Transform Interpolation for LTE-A OFDM Pilot-Based Channel Estimation," in *International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, United Arab Emirates, Nov. 2017.
- [8] R. Makkar, S. Soni, A. Kalpesh Bachkaniwala, D. Rawal and N. Sharma, "Pilot Interpolation Based Channel Estimation for LTE Systems," *Procedia Computer Science*, vol. 171, pp. 2261–2266, 2020.
- [9] E. Chen, J. Zhang, X. Mu and S. Yang, "An novel ML estimator based on the Lagrange interpolation for the OFDM systems," in *IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, Jan. 2009, pp: 529 - 532.