



ارائه روش‌های جدید الگوی چینش پایلوت

به منظور بهبود عملکرد سامانه DVB-T

بهاره خسروانی و سعید قاضی مغربی*

دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران

چکیده

یکی از بلوک‌های مهم در سامانه DVB-T، بلوک OFDM است. در بلوک OFDM، پایلوت‌ها، تخمین کانال و روش‌های درون‌یابی نقش کلیدی دارند. تعداد پایلوت‌ها در هر سبب OFDM در الگوهای مختلف پایلوت‌ها متفاوت است. در این مقاله روش‌های الگوی چینش پایلوتی جدیدی ارائه شده تا با استفاده از سه پارامتر احتمال خطا، زمان محاسباتی و تعداد پایلوت‌ها عملکرد سامانه DVB-T بهبود یابد. در این پژوهش بهبود عملکرد با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی دوبعدی بررسی شده است. بدیهی است تمام اهداف موردنظر در یک الگو برآورده نمی‌شود؛ یعنی به طور مثال ممکن است، خطا کمتر، اما تعداد پایلوت بیشتر شده باشد؛ بنابراین الگویی را باید پذیرفت که مطابق با هدف مورد نظر باشد. در این پژوهش شش روش درون‌یابی دوبعدی *linear*، *Nearest-neighbor*، *spline*، *Cubic Hermite*، *cosine* و *low pass* استفاده شده و سه الگوی جدید برای پایلوت‌ها پیشنهاد شده که این سه الگو با الگوهای متداول DVB-T برای چهار کانال مختلف بررسی و برای هر کانال سی روش درون‌یابی آزمایش شده است. چهار کانال استفاده شده عبارتند از کانال سامانه OFDM با نوفه AWGN و سامانه OFDM با نوفه AWGN و محوشدگی، سامانه DVB-T با نوفه AWGN و سامانه DVB-T با نوفه AWGN و محوشدگی. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که در بیشتر حالات، روش‌های درون‌یابی خطی و کسینوسی در بعد دوم بهترین عملکرد را دارند و درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایگی در بعد دوم بدترین عملکرد را دارد. در نهایت الگوهای پایلوت پیشنهادی با الگوی مرسوم سامانه DVB-T مقایسه و ملاحظه شد الگوهای پایلوت پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به الگوی پایلوت مرسوم سیستم DVB-T دارند. از آن جا که در DVB-T جابه‌جایی و سرعت مطرح است، در مرحله دوم این پژوهش روش‌های درون‌یابی دوبعدی در چند فرکانس داپلر مختلف در سامانه DVB-T با استفاده از الگوی پایلوت آن بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در سه فرکانس داپلر صفر، سی و ۱۵۰ هرتز الگوهای پیشنهادی پایلوت در حالی که یکی از درون‌یابی‌ها خطی باشد، عملکرد بهتری نسبت به روش متداول در DVB-T دارند.

واژگان کلیدی: DVB-T، OFDM، پایلوت و درون‌یابی

Proposed Pilot Pattern Methods for Improvement DVB-T System Performance

Bahareh Khosravani & Saeed Ghazi-Maghrebi*

Faculty of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH)
shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Recently, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) has been extensively used in communications systems to resist channel impairments in frequency selective channels. OFDM is a multicarrier transmission technology in wireless environment that use a large number of orthogonal subcarriers to transmit information. OFDM is one of the most important blocks in digital video broadcast-terrestrial (DVB-T)

* Corresponding author

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات

سال ۱۳۹۹ شماره ۲ پیاپی ۴۴

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸ • تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۱۳ • تاریخ انتشار: ۱۳۹۹/۰۶/۲۴ • نوع مطالعه: پژوهشی

فصلنامه



system. The goal of this paper is comparing the methods of interpolation in OFDM system that not used channel statistics information. Therefore, we used pilots for obtaining the information of channel, and by the method of estimation without use of channel statistics information, the channel primary frequency response estimated in pilot's frequencies. Pilots, channel estimation and interpolation methods are key roles in the OFDM block. The number of pilots are different in the OFDM symbol for different pilot patterns. In this article, we proposed three pilot patterns to improve DVB-T system performance. Our criteria for this purpose are error probability, calculation time, and the number of pilots. We have tested the performance improvement by using two-dimensional (2D) interpolation methods. Obviously, we do not obtain all of our requests and requirements via one pilot pattern. For example, the error may be decreases, but the number of pilots is increased. Therefore, we must select the pilot pattern that achieve the most important goal for us. We have applied six interpolation methods, for 2D interpolation, such as linear, nearest-neighbor, spline, cubic Hermite, cosine and low pass interpolations. We have compared three proposed pilot patterns with the conventional DVB-T pilot pattern in four different channels. In each channel, we have tested 30 interpolation methods. The applied channels are OFDM system with AWGN noise, OFDM system with AWGN noise and Rayleigh fading, DVB-T system with AWGN noise and DVB-T system with AWGN noise and Rayleigh fading. We observed that the best performance happens when we use linear interpolation in the first dimension and cosine interpolation in the second dimension of 2D interpolation. In addition, the worst performance will be happened when Nearest-neighbor interpolation is used in the second dimension of 2D interpolation. In the last step, we compared the proposed pilot patterns with the conventional DVB-T pilot pattern in 2D interpolation method that it leads to better performance in DVB-T system. We observed that the proposed pilot patterns have better performance than the conventional DVB-T pilot pattern. In the DVB-T, movement and velocity are very important and considered in this research. In the second step using DVB-T pilot pattern, we compared 2D interpolation methods in some different Doppler frequencies. Simulation results show that at 3 Doppler frequencies, i.e. 0, 30, 150Hz, the proposed schemes with a linear interpolation has better performance than the conventional method in the DVB-T systems.

Keywords: DVB-T, Interpolation, OFDM, Pilot

کدگذاری دیجیتال و روش‌های انتقال، اجازه بازبازی کامل سیگنال در تمام مناطق تحت پوشش را می‌دهد. سامانه DVB-T برای ارسال یک رشته حامل MPEG-2 با طول ثابت، طراحی شده است.

در استاندارد DVB-T، برای بهبود توانایی ضدتداخل چند مسیری و بازده طیفی سامانه از مدولاسیون تقسیم فرکانس چندگانه متعامد کدشده (COFDM⁵) استفاده شده است. هدف از کدگذاری کانال مقابله با خطاهای پیش‌آمده در فرایند انتشار و دریافت دنباله دیجیتال ارسالی و ایجاد قابلیت کشف و جبران خطا در سامانه است. سامانه COFDM دارای مدهای (K=۱۰۲۴) 2K و 8K و سه روش مدولاسیون QPSK، 16QAM یا 64QAM است. یک قاب OFDM شامل سلول‌های داده، سلول‌های پایلوت پراکنده، سلول‌های پایلوت پیوسته و حامل‌های سیگنالینگ پارامتر انتقال (TPS⁶) است. سامانه OFDM در نمودار جعبه‌ای سامانه DVB-T دارای کدگذاری و لایه‌گذاری است. به همین دلیل از مدولاسیون COFDM در استاندارد DVB-T استفاده می‌شود. پارامترهای مختلف ارسال به‌ازای دو مد با پهنای باند هشت مگاهرتز در جدول (۱) ارائه شده است [1] و [2] و [3] و [4] و [5].

۱- مقدمه

با گسترش روزافزون نرخ انتقال اطلاعات و محدودیت پهنای باند به‌دنبال روش‌هایی هستیم که بتوان استفاده بهتری از پهنای باند داشت. سامانه تقسیم فرکانسی چندگانه متعامد (OFDM¹) یک روش انتقال چندحاملی در محیط‌های بی‌سیم است که در آن از تعداد زیادی زیرحامل‌های متعامد برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود. در این سامانه اطلاعات با نرخ بیت بالا بر روی چندین زیرحامل با نرخ بیت پایین‌تر به‌صورت موازی ارسال می‌شود. OFDM در استانداردهای بی‌سیم زیادی مانند انتشار ویدیوی دیجیتال زمینی (DVB-T²، DVB-T²)، انتشار صدای دیجیتال (DAB³)، شبکه بی‌سیم محلی (WLAN⁴) و... پذیرفته شده است.

DVB-T سامانه‌ای برای پخش زمینی تصاویر دیجیتال بر اساس استاندارد ETSI-EN300 744 است که در سال ۱۹۹۷ آغاز شد. امروزه علاقه زیادی به DVB-T وجود دارد؛ زیرا تلویزیون دیجیتال می‌تواند اطلاعات زیادی را با هزینه کم به تعداد زیادی بیننده تحویل دهد. استفاده از

¹ Orthogonal Frequency division Multiplexing

² Digital Video Broadcasting Terrestrial

³ Digital Audio Broadcasting

⁴ Wireless Local Area Network

⁵ Coded Orthogonal Frequency division Multiple

⁶ Transmission Parameter Signaling

(جدول-۱): پارامترهای مدولاسیون در دو حالت 2k و 8k و به ازای

کانال با پهنای باند ۸ مگاهرتز [6]

(Table-1): Modulation parameters in 2k and 8k modes for 8 MHz bandwidth

پارامتر	مد 8k	مد 2k
تعداد حامل‌های k	6817	1705
کمترین شماره حامل (k_{min})	0	0
بیشترین شماره حامل (k_{max})	6816	1704
فاصله حامل‌های k_{min} و k_{max}	761MHz	761MHz

در این سامانه، کانال به صورت مدلی از کانال بی‌سیم و به صورت فرکانس گزین فرض می‌شود که اغلب براساس محوشدگی رایلی به همراه نوفه سفید گوسی جمع‌شونده مدل‌سازی می‌شود [7]. وقتی سیگنال حاوی اطلاعات در کانال ارسال می‌شود، اگر پهنای باند هم‌دوسی کانال در مقایسه با پهنای باند سیگنال ارسال کوچک باشد، کانال را فرکانس گزین گویند؛ در این حالت، کانال موجب بروز اعوجاج شدید در سیگنال ارسال خواهد شد [8].

دو پارامتر محوشدگی و نوفه جمع‌شونده در کانال‌ها باعث می‌شوند که سیگنال به دست‌آمده در خروجی کانال نسبت به سیگنال ورودی اعوجاج زیادی داشته باشد و در نتیجه خطای به وجود آمده افزایش بیشتری داشته باشد؛ لذا برای کاهش این اثرات لازم است که درگیرنده متعادل‌کننده‌ای براساس مشخصات معلوم کانال طراحی شود. با توجه به این که مشخصات کانال با زمان تغییر می‌کنند، لذا ضرورت دارد که مشخصه کانال به طور متناوب تخمین زده شود و متناظر با تخمین به دست‌آمده سیگنال خروجی متعادل شود تا اعوجاج ایجادشده در سیگنال خروجی هرچه بیشتر کاهش یابد. در تخمین کانال، ابتدا پاسخ فرکانسی کانال در زیرحامل‌های پایلوت توسط روش‌های تخمین و سپس پاسخ فرکانسی کلی کانال توسط روش‌های درون‌یابی به دست می‌آید [9].

یکی از مشکلات درون‌یابی، تخمین یک تابع پیچیده توسط یک تابع ساده است. با تعداد کمی نقاط داده معلوم از تابع اصلی می‌توان برای تولید یک درون‌یابی بر مبنای یک تابع ساده‌تر استفاده کرد. روش‌های درون‌یابی متفاوتی در ریاضیات وجود دارد. وقتی یک روش خاص انتخاب می‌شود، چند مسأله مطرح می‌شود؛ از جمله کدام روش صحیح‌تر است؟ کدام روش گران‌تر است؟ کدام روش اشکال کمتری دارد؟ به چند تا نقطه داده نیاز است؟ با توجه به این که چه چیزی برای ما با اهمیت‌تر است، روش درون‌یابی مناسب انتخاب می‌شود. گاهی افزایش سادگی با ارزش‌تر از کاهش دقت است [10].

در ادامه این مقاله، ابتدا در بخش ۲ به معرفی سیگنال‌های پایلوت پرداخته شده است. سپس در بخش ۳ انواع روش‌های درون‌یابی توصیف شده و در ادامه در بخش‌های ۴ و ۵ روش‌های پیشنهادی و شبیه‌سازی مطرح و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- سیگنال‌های پایلوت

پایلوت‌ها داده‌های آموزشی هستند که به منظور به دست آوردن اطلاعات کانال، توسط فرستنده در میان داده‌های اصلی در مکان ثابتی قرار می‌گیرند. پایلوت‌ها هم برای فرستنده و هم برای گیرنده شناخته شده و معلوم هستند. پایلوت‌های ارسال توسط فرستنده، باعث ایجاد توان مصرفی کمتر همراه با واکنش سریع به تغییرات کانال می‌شوند. برای قراردادن پایلوت‌ها در سمبل‌های OFDM، دو روش اصلی به نام‌های روش بلوکی و روش شانه‌ای وجود دارد.

در سامانه DVB-T از هر دو نوع سیگنال‌های پایلوت پیوسته و گسسته استفاده شده است. در اینجا "پیوسته" به این معنی است که پایلوت‌ها در تمام سمبل‌ها هستند. پایلوت‌های گسسته یا پراکنده ترکیبی از هر دو نوع پایلوت‌های بلوکی و شانه‌ای هستند و در تمام سمبل‌ها قرار نمی‌گیرند. سمبل‌های پایلوت گسسته در قاب OFDM دارای مکان و موقعیت ثابت هستند و برای تخمین مشخصات کانال استفاده می‌شوند. پایلوت پیوسته برای زمان‌بندی و هم‌زمان‌سازی استفاده می‌شود. مقدار یا ارزش اطلاعات پایلوت پیوسته یا پراکنده از یک دنباله دودویی شبه سلول‌های پایلوت پراکنده در هر سمبل ارسال می‌شوند. اطلاعات مرجع در سلول‌های پایلوت پراکنده و پیوسته همیشه در یک سطح توان "افزایش یافته" ارسال می‌شوند تا توان روی سمبل‌های پایلوت بیشتر از سمبل‌های داده باشد. در کل، این توان افزایش یافته به دلیل این که می‌تواند مقاومت بیشتری در برابر نوفه داشته باشد، به ردیابی و تخمین بهتر کمک می‌کند [5] و [9] و [11] و [12] و [13] و [14].

• الگوی پایلوت سامانه DVB-T

سامانه DVB-T در مد 2k، تعداد ۱۷۰۵ زیرحامل و ۶۸ سمبل OFDM دارد. مجموع کل تعداد سلول‌ها به ازای ۶۸ سمبل OFDM و ۱۷۰۵ زیرحامل، برابر با $۶۸ \times ۱۷۰۵ = ۱۱۵۹۴۰$ است که تعداد ۱۱۹۶۸ سلول یا

۱۰/۳۲٪ از آن‌ها پایلوت‌های پیوسته و گسسته هستند. شماره زیرحامل‌هایی که پایلوت پیوسته دارند، در استاندارد DVB-T مشخص شده است. رابطه بین سمبل‌ها و زیرحامل‌ها برای پایلوت‌های گسسته در سامانه DVB-T براساس رابطه (۱) است.

$$k=12p+3(n-1)+1$$

$$p=0, 1, \dots, 142 \quad n=1, \dots, 4 \quad (1)$$

که در آن p شماره پایلوت‌ها در هر سمبل OFDM، k شماره زیرحامل در هر سمبل OFDM و n شماره سمبل OFDM است. n به جای این که از یک تا ۶۸ باشد، از یک تا چهار انتخاب می‌شود، زیرا الگوی پایلوت‌های هر چهار سمبل یکبار تکرار می‌شود. شکل (۱) سمبل‌های یک تا هفت و زیرحامل‌های یک تا ۲۸ سامانه DVB-T را نشان می‌دهد [14, 15].

۳- درون‌یابی به منظور تخمین کانال

تخمین کانال یکی از بلوک‌های سامانه OFDM [16]، [17]، [18]، [19]، [21]، [22] و در نتیجه یکی از بلوک‌های سامانه DVB-T است. در بلوک تخمین کانال، ابتدا پاسخ فرکانسی زیرحامل‌های پایلوت توسط روش‌های تخمین مانند DFT، LS، ... تخمین زده و سپس از درون‌یابی [23]، [24]، [25] برای به‌دست‌آوردن تخمین نهایی کانال استفاده می‌شود.

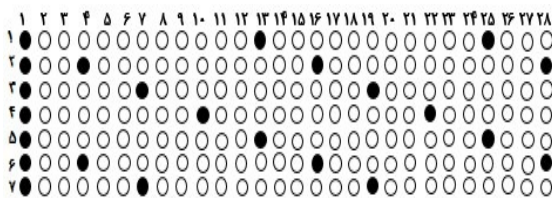
به‌دلیل این‌که در سامانه DVB-T، پایلوت‌ها در هر دو بعد زمان و فرکانس توزیع شده‌اند، درون‌یابی باید در دو بعد انجام شود. درون‌یابی دو‌بعدی را می‌توان ابتدا در حوزه زمان و سپس در حوزه فرکانس انجام داد (درون‌یابی زمان-فرکانس) یا این‌که ابتدا در حوزه فرکانس و سپس در حوزه زمان انجام داد (درون‌یابی فرکانس-زمان). استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی یک‌بعدی در هر یک از بعدهای درون‌یابی دو‌بعدی مجاز است و می‌توان از یک روش درون‌یابی یکسان در هر دو بعد یا از دو روش درون‌یابی متفاوت برای دو بعد درون‌یابی دو‌بعدی استفاده کرد [12]. روش‌های مختلفی مانند درون‌یابی‌های نزدیک‌ترین همسایگی، خطی، مرتبه دوم، اسپیلین، اسپیلین هرمیت مکعبی، پایین‌گذر، کسینوسی، خم چندجمله‌ای، خم کسری گویا و فیلتر هموارساز ساویتسکی-گولی وجود دارد. در ادامه مختصری در خصوص روش‌های مختلف درون‌یابی که در این پژوهش استفاده شده، توضیح داده می‌شود.

۱-۳- درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایگی

این روش، ساده‌ترین روش درون‌یابی در یک یا چند بعد است. این روش، برای درون‌یابی مقدار یک نقطه، نزدیک‌ترین نقطه همسایه نسبت به نقطه مورد نظر را پیدا می‌کند و مقدار آن را برای نقطه مورد نظر محاسبه می‌کند و به مقادیر دیگر نقاط همسایه توجه نمی‌کند. در مسائل ساده، این روش خیلی خوب نیست، اما برای ابعاد بالاتر که مسائل پیچیده‌تر می‌شوند، مناسب است. این روش هم از لحاظ سرعت و هم از لحاظ سادگی، انتخاب خوبی است [26].

۲-۳- درون‌یابی خطی

یکی از روش‌های ساده درون‌یابی، درون‌یابی خطی است. به‌طورعمومی در درون‌یابی خطی از دو نقطه داده استفاده می‌شود که در واقع یک خط مستقیم ما بین این دو نقطه است. در این مقاله برای تخمین کانال با استفاده از درون‌یابی خطی براساس رابطه (۲)، از دو پایلوت مجاور استفاده شده است [28].



(شکل-۱): الگوی پایلوت سامانه DVB-T
(Figure-1): Pilot pattern in DVB-T system

$$\hat{H}(k) = \hat{H}(m N_f + L) = (\hat{H}_p(m+1) - \hat{H}_p(m)) \frac{1}{N_f} + \hat{H}_p(m)$$

$$m=0, 1, \dots, N_p-1 \quad (2)$$

که در آن \hat{H}_p پاسخ فرکانسی پایلوت و $\hat{H}(k)$ پاسخ فرکانسی کانال است. N_p تعداد سیگنال‌های پایلوت و N_f فاصله فرکانسی پایلوت‌ها است؛ یعنی به‌ازای N زیرحامل و N_p پایلوت در فاصله فرکانسی یکسان از یکدیگر قرار دارد. در این صورت داریم:

$$N_f = \frac{N}{N_p}$$

۳-۳- درون‌یابی مرتبه دوم

درون‌یابی مرتبه دوم بهتر از درون‌یابی خطی است. تخمین کانال با استفاده از درون‌یابی مرتبه دوم با استفاده از ترکیب خطی سه پایلوت متوالی انجام می‌شود. به همین دلیل نسبت به درون‌یابی خطی عملکرد بهتری، اما پیچیدگی

بیشتری به واسطه افزایش مرتبه دارد. این درون‌یابی براساس رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$\hat{I}(k) = \hat{I}(m N_f + L) = c_1 \hat{I}_p(m-1) + c_0 \hat{I}_p(m) + c_{-1} \hat{I}_p(m+1) \quad m=0, 1, \dots, N_p-1 \quad (3)$$

که در آن ضرایب درون‌یابی مرتبه دوم براساس رابطه (۴) تعریف شده‌اند [27]:

$$c_1 = \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} \quad c_0 = -(\alpha-1)(\alpha+1) \\ c_{-1} = \frac{\alpha(\alpha+1)}{2} \quad \alpha = \frac{1}{N_f} \quad (4)$$

۳-۴- درون‌یابی اسپیلاین

تابع درون‌یابی اسپیلاین درجه n ام در بازه $[a, b]$ با نقاط گره‌ای x_0, x_1, \dots, x_n تابعی نظیر $S(x)$ است. در این تابع بازه $[a, b]$ به n تا زیربازه $[x_i, x_{i-1}]$ تقسیم می‌شود که در آن $a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ در ضمن $S(x)$ برای هر زیربازه برابر با $f_i(x)$ است $(S(x) = f_i(x))$. نکته دیگر این که $S(x)$ و مشتقات آن تا مرتبه $(n-1)$ در بازه $[a, b]$ پیوسته هستند.

رایج‌ترین اسپیلاین، اسپیلاین مکعبی است که مرتبه آن سه است. این درون‌یابی بر اساس رابطه (۵) است که در آن x_i و x_{i-1} دو پیلوت متوالی هستند. M_i و M_{i-1} مقدار مشتق دوم تابع در این دو پیلوت هستند [28] و [29]:

$$S(x) = (x_i - x) \left[\frac{(x_i - x)^2 - h_i^2}{6h_i} \right] M_{i-1} + (x - x_{i-1}) \left[\frac{(x - x_{i-1})^2 - h_i^2}{6h_i} \right] M_i + \frac{1}{h_i} (x_i - x) f_{i-1} + \frac{1}{h_i} (x - x_{i-1}) f_i \quad (5)$$

که در آن h_i به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h_i = x_i - x_{i-1} \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

۳-۵- درون‌یابی اسپیلاین هرمیت مکعبی

اسپیلاین هرمیت مکعبی نوعی اسپیلاین است که هر قسمت آن یک چندجمله‌ای درجه سه به صورت هرمیت است. اسپیلاین هرمیت مکعبی به‌طور معمول برای درون‌یابی داده‌های عددی معلوم x_0, x_1, \dots, x_n استفاده می‌شود تا بتوان یک تابع پیوسته و یک‌نواخت را به دست آورد. داده‌ها باید در هر x_k شامل مقدار تابع مورد نظر و مشتق آن باشند. فرمول هرمیت به‌طور جداگانه به هر بازه $[x_k, x_{k+1}]$ اعمال می‌شود. نتیجه این اسپیلاین پیوسته خواهد بود و همچنین

مشتق نخست آن هم پیوسته است. این درون‌یابی بر اساس رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$P(x) = h_{00}(t)p_0 + h_{10}(t)m_0 + h_{01}(t)p_1 + h_{11}(t)m_1 \quad (7) \\ t = \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k}$$

که در آن h ها توابع پایه هرمیت هستند و می‌توانند به روش‌های مختلفی نوشته شوند که هر روش ویژگی متفاوتی دارد. چند نمونه از روش‌های به دست آوردن توابع پایه هرمیت در جدول (۲) نشان داده شده است. p_1 و p_0 برابر با مقدار تابع در نقاط پیلوت x_k و x_{k+1} هستند و m_0 و m_1 هم برابر با مقدار مشتق مرتبه نخست تابع در نقاط پیلوت x_k و x_{k+1} هستند. این مقادیر از روش‌های مختلفی مانند تفاضل محدود، اسپیلاین کاردینال و اسپیلاین Catmull - Rom قابل دستیابی هستند [30]. در جدول (۲) چند جمله‌ای‌های Bernstein مرتبه ۳ بر اساس رابطه (۸) هستند.

$$B_k(t) = \binom{3}{k} \cdot t^k \cdot (1-t)^{3-k} \quad (8)$$

(جدول-۲): توابع پایه هرمیت

(Table-2): Hermit basic functions

	تعمیم یافته	فاکتورگیری	Bernstein
$h_{00}(t)$	$2t^3 - 3t^2 + 1$	$(1+2t)(1-t)^2$	$B_0(t) + B_1(t)$
$H_{10}(t)$	$t^3 - 2t^2 + 1$	$t(1-t)^2$	$\frac{1}{3} \cdot B_1(t)$
$h_{01}(t)$	$-2t^3 - 3t^2$	$t^2(3-2t)$	$B_2(t) + B_3(t)$
$H_{11}(t)$	$t^3 - t^2$	$t^2(t-1)$	$-\frac{1}{3} \cdot B_2(t)$

۳-۶- درون‌یابی پایین‌گذر

درون‌یابی پایین‌گذر به دنباله داده‌های اصلی L تا صفر اضافه می‌کند و در نتیجه نرخ نمونه‌برداری افزایش می‌یابد؛ سپس از یک فیلتر پایین‌گذر FIR با فرکانس قطع π/L استفاده می‌شود تا بدین واسطه داده‌های اصلی بدون تغییر عبور کنند و درون‌یابی شوند. درون‌یابی پایین‌گذر، مقدار MSE را به‌ازای نقاط درون‌یابی شده و مقادیر ایده‌آل آن‌ها، کمینه می‌کند [31].

۳-۷- درون‌یابی کسینوسی

درون‌یابی کسینوسی تعریفی مشابه درون‌یابی خطی دارد، اما به جای استفاده از خط مشترک بین دو نقطه، از منحنی کسینوس بین دو نقطه استفاده می‌کند. اگر دو نقطه معلوم (x_0, y_0) و (x_1, y_1) را داشته باشیم و نقطه مجهول و

است. در این پژوهش بهبود عملکرد با سه پارامتر احتمال خطا، زمان محاسباتی و تعداد پایلوت اندازه‌گیری شده است. بدیهی است تمام اهداف موردنظر توسط یک الگو برآورده نمی‌شود؛ یعنی برای مثال ممکن است، خطا کمتر ولی تعداد پایلوت بیشتر شده باشد. این موضوع هم از نظر تئوری قابل اثبات و هم نتایج شبیه‌سازی مؤید این موضوع است.

• الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک

نخستین الگوی پیشنهادی برای قراردادن پایلوت‌ها به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$k=6p+3(n-1)+1$$

$$p=0, 1, \dots, 284 \quad n=1, 2 \quad (12)$$

که در آن n دارای مقادیر یک و دو است، زیرا الگوی پایلوت‌ها هر دو سمبل یک‌بار تکرار می‌شود. مجموع تعداد سلول‌های ۶۸ سمبلی OFDM با ۱۷۰۵ زیرحامل برابر $68 \times 1705 = 115940$ است که ۲۰۸۷۶ سلول یا ۱۸٪ از آن‌ها پایلوت‌های پیوسته و گسسته هستند. تعداد پایلوت‌های الگوی پیشنهادی شماره یک به اندازه ۸۹۰۸ سلول یا ۷/۶۹٪ از الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T بیشتر است. شکل (۴) سمبل‌های یک تا هفت و زیرحامل‌های ۱ تا ۲۸ الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک را نشان می‌دهد.

مورد نظر برای درون‌یابی که در فاصله بین x_0 و x_1 قرار دارد، x باشد، درون‌یابی کسینوسی نقطه x برابر با y است و به صورت زیر تعریف می‌شود [32]:

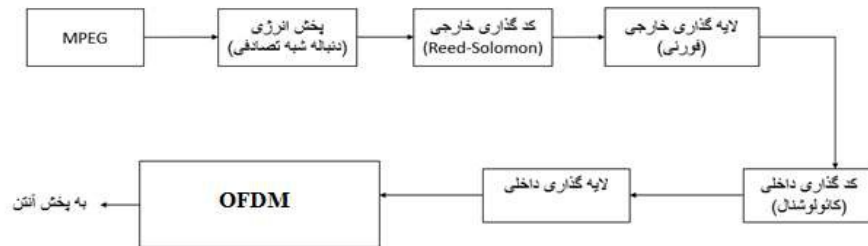
$$f = \frac{x-x_0}{x_1-x_0} \quad (9)$$

$$g = (1 - \cos(f\pi)) \times 0.5 \quad (10)$$

$$y = y_0 + g \times (y_1 - y_0) \quad (11)$$

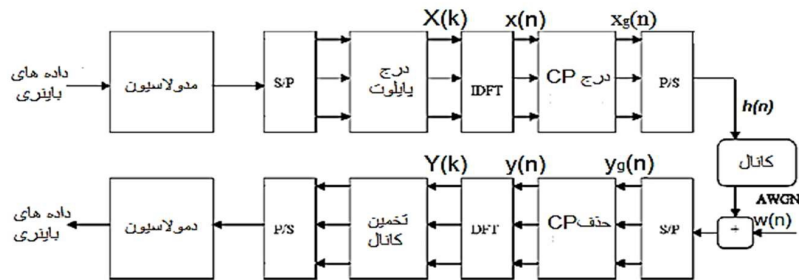
۴- روش پیشنهادی

در این پژوهش ابتدا سامانه‌های OFDM و DVB-T مطابق شکل‌های (۲ و ۳) توسط نرم افزار MATLAB پیاده‌سازی می‌شود. برای بهبود عملکرد سامانه OFDM و DVB-T، به دنبال روش‌های الگوی چینش پایلوت هستیم. با تغییرات زیادی که در ضرایب و پارامترهای الگوی پایلوت سامانه DVB-T انجام داده شد، در نهایت سه روش الگوی چینش پایلوت انتخاب شد که نسبت به بقیه عملکرد بهتری را در سامانه DVB-T باعث می‌شوند. در الگوهای پیشنهادی، تعداد و نحوه چینش پایلوت‌ها با الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T متفاوت است. در الگوهای پیشنهادی شماره یک و دو تعداد پایلوت‌ها بیشتر از الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T است. در الگوی پیشنهادی شماره سه تعداد پایلوت‌ها کمتر از الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T



شکل (۲)- نمودار جریان فرستنده DVB-T [2]

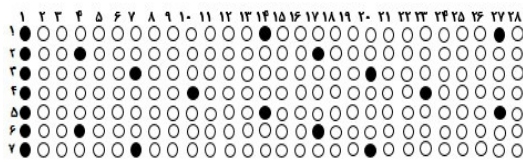
(Figure-2): DVB-T transmitter block diagram [2]



شکل (۳)- نمودار جریان سیستم OFDM [1]

(Figure-3): OFDM system block diagram [1]

زیرحامل‌های یک تا ۲۸ الگوی پیلوت پیشنهادی شماره سه را نشان می‌دهد.



(شکل-۶): الگوی پیلوت پیشنهادی شماره سه
(Figure-6): The proposed pilot pattern No. 3

۵- شبیه‌سازی

برای نشان‌دادن مزایای الگوهای پیشنهادی در مرحله نخست، سه الگوی پیلوت پیشنهادی را با الگوی پیلوت متداول سامانه DVB-T در چهار حالت زیر مقایسه کرده‌ایم:

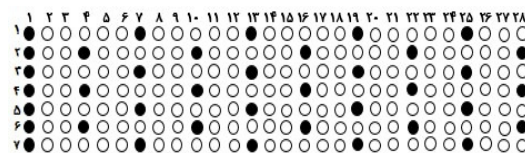
- ۱- سامانه OFDM به همراه نوفه AWGN
- ۲- سامانه OFDM با نوفه AWGN و محوشدگی رایلی
- ۳- سامانه DVB-T به همراه نوفه AWGN
- ۴- سامانه DVB-T با نوفه AWGN و محوشدگی رایلی

برای هر حالت، سی روش درون‌یابی دوبعدی پیاده‌سازی شده است. یعنی در مجموع ۱۲۰ روش شبیه‌سازی شده است. این سی روش شامل روش‌های درون‌یابی خطی، نزدیک‌ترین همسایگی، اسپیلاین، هرمیت مکعبی، کسینوسی و پایین‌گذر است. هر کدام از این روش‌ها را در یکی از بعدها درون‌یابی دوبعدی قرار داده و با هم ترکیب شده‌اند تا در نهایت سی روش به‌دست آمد. زمان محاسباتی هر سه روش پیشنهادی به‌طور تقریبی نزدیک به روش الگوی پیلوت متداول سیستم DVB-T به‌دست آمد که به‌صورت درصد در جداول بیان شده و نتایج هر حالت در شکل‌های (۷ تا ۱۰) نشان داده شده است. شرایط شبیه‌سازی مطابق جدول (۳) است. اکنون هر یک از این چهار حالت شبیه‌سازی شده بررسی می‌شوند.

(جدول-۳): شرایط شبیه‌سازی

(Table-3): Simulation conditions

مد	2k
تعداد زیرحامل	1705
CP	100
مدولاسیون	QPSK
محوشدگی	رایلی
فرکانس داپلر	30هرتز
پهنای باند	8مگاهرتز
کانال	SUI
تعداد تپ	3
تأخیر (میکرو ثانیه)	0, 5/0, 1
توان	0, 5-, 10-



(شکل-۴): الگوی پیلوت پیشنهادی شماره یک
(Figure-4): The proposed pilot pattern No. 1

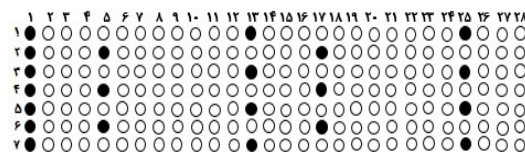
• الگوی پیلوت پیشنهادی شماره دو

دومین الگوی پیشنهادی برای قراردادن پیلوت‌ها به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$k=12p+4(n-1)+1$$

$$p=0, 1, \dots, 142 \quad n=1, 2 \quad (13)$$

به جای این‌که به n از یک تا ۶۸ اختصاص داده شود، یک و دو قرار داده شده است، زیرا الگوی پیلوت‌ها هر دو سمبل یک‌بار تکرار می‌شود. مجموع کل تعداد سلول‌های ۶۸ سمبلی به‌همراه ۱۷۰۵ زیرحامل آن‌ها، برابر با $68 \times 1705 = 115940$ است که تعداد ۱۲۳۴۲ سلول یا 10.65% از آن‌ها پیلوت‌های پیوسته و گسسته هستند. تعداد پیلوت‌های الگوی پیلوت پیشنهادی شماره دو به اندازه ۳۷۴ سلول یا 0.33% از الگوی پیلوت متداول سامانه DVB-T بیشتر است. شکل (۵) سمبل‌های یک تا هفت و زیرحامل‌های یک تا ۲۸ الگوی پیلوت پیشنهادی شماره دو را نشان می‌دهد.



(شکل-۵): الگوی پیلوت پیشنهادی شماره دو
(Figure-5): The proposed pilot pattern No. 2

• الگوی پیلوت پیشنهادی شماره سه

سومین الگوی پیشنهادی برای قرار دادن پیلوت‌ها به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$k=13p+3(n-1)+1$$

$$p=0, 1, \dots, 131 \quad n=1, \dots, 4 \quad (14)$$

که در آن n به جای مقادیر یک تا ۶۸، مقادیر یک تا چهار را دارد، زیرا الگوی پیلوت‌ها هر چهار سمبل یک‌بار تکرار می‌شود. مجموع تعداد سلول‌های ۶۸ سمبلی OFDM با ۱۷۰۵ زیرحامل برابر $68 \times 1705 = 115940$ است که ۱۱۶۹۶ سلول یا 10.09% از آن‌ها پیلوت‌های پیوسته و گسسته هستند. تعداد پیلوت‌های الگوی پیلوت پیشنهادی شماره سه به اندازه ۲۷۲ سلول یا 0.23% از الگوی پیلوت متداول DVB-T کمتر است. شکل (۶) سمبل‌های یک تا هفت و

• حالت یک: سامانه OFDM به همراه نوفه AWGN

در ابتدا الگوهای پایلوت پیشنهادی با سی روش درون‌یابی دو بعدی مختلف برای "سیستم OFDM به همراه نوفه AWGN"، بررسی و مقایسه شده‌اند. در جدول چهار سه پارامتر مورد سنجش احتمال خطا، مدت زمان و تعداد پایلوت‌ها برای این حالت ارائه شده است. در این حالت سامانه OFDM فقط دارای نوفه AWGN است.

با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود، الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک میزان خطای کمتر در بیشتر روش‌های درون‌یابی، ۶۹٪/۷ تعداد پایلوت بیشتر و ۴٪/۸ زمان محاسباتی بیشتر نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T دارد.

الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو دارای میزان خطای کمتر در چندین روش درون‌یابی، ۳۳٪/۰ تعداد پایلوت بیشتر و زمان محاسباتی برابر نسبت به الگوی پایلوت متداول سیستم DVB-T است.

الگوی پایلوت پیشنهادی شماره ۳ دارای میزان خطای کمتر در چندین روش درون‌یابی، ۲۳٪/۰ تعداد

پایلوت کمتر و ۱٪/۲ زمان محاسباتی بیشتر نسبت به الگوی پایلوت DVB-T است.

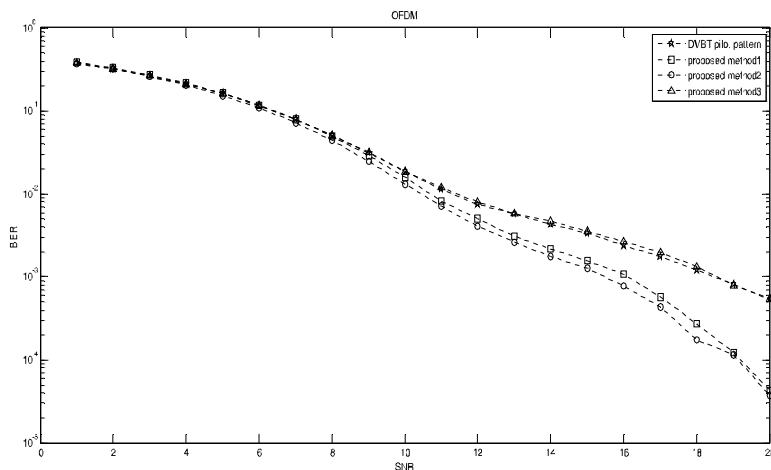
به عنوان مثال، یک آزمایش از سی آزمایش انجام شده در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، برای درون‌یابی اسپیلاین-نزدیکترین همسایگی، در SNRهای کم خطای هر چهار الگو به‌طور تقریبی برابر است و در SNRهای زیاد فاصله نمودارها برای الگوهای پیشنهادی او ۲ با نمودار الگوی پایلوت سیستم DVB-T زیاد می‌شود؛ اما برای الگوی پیشنهادی شماره ۳، فاصله نمودارها خیلی کم است.

به عنوان مثال در SNR=20dB خطای الگوی پیشنهادی شماره ۱ در سیستم DVB-T، به میزان ۱۰/۷۳dB کمتر شده است و خطای الگوی پیشنهادی شماره ۲ از الگوی سیستم DVB-T، به میزان ۱۴/۲dB کمتر شده است و خطای الگوی پیشنهادی شماره ۳ از الگوی سیستم DVB-T، به میزان ۰/۲۷dB کمتر شده است. بنابراین هر ۳ الگوی پیشنهادی عملکرد مناسبی از لحاظ احتمال خطا دارند.

(جدول-۴): سیستم OFDM به همراه نوفه AWGN

(Table-4): OFDM system with AWGN noise

الگوها	زمان محاسباتی	تعداد پایلوت	میزان خطا
الگوی پایلوت پیشنهادی شماره ۱	بیشتر از الگوی پایلوت سیستم DVB-T	بیشتر از الگوی پایلوت سیستم DVB-T	خطا کمتر از الگوی پایلوت سیستم DVB-T در بیشتر روش‌های درون‌یابی
الگوی پایلوت پیشنهادی شماره ۲	برابر با الگوی پایلوت سیستم DVBT	بیشتر از الگوی پایلوت سیستم DVB-T	خطا کمتر از الگوی پایلوت سیستم DVB-T در چندین روش درون‌یابی
الگوی پایلوت پیشنهادی شماره ۳	بیشتر از الگوی پایلوت سیستم DVB-T	کمتر از الگوی پایلوت سیستم DVB-T	خطا کمتر از الگوی پایلوت سیستم DVB-T در چندین روش درون‌یابی



(شکل-۷): درون‌یابی اسپیلاین-نزدیکترین همسایگی در سیستم OFDM به همراه نوفه AWGN

(Figure-7): Spline-Nearest neighbor interpolation in OFDM system with AWGN noise

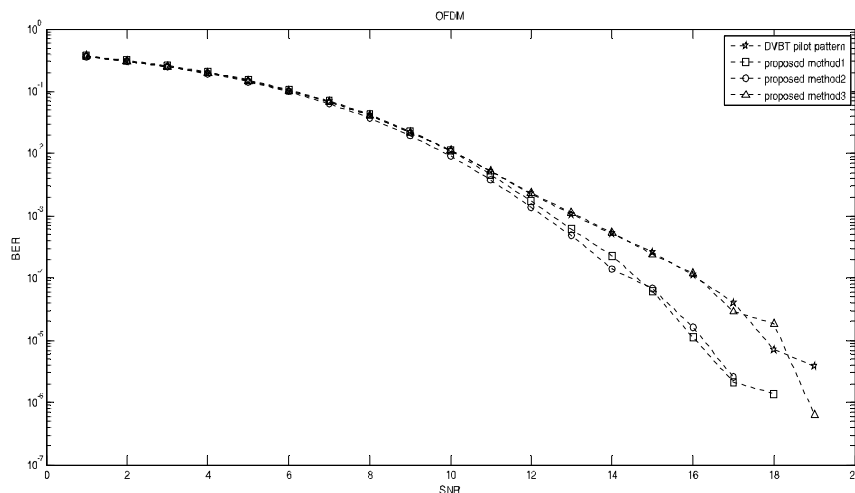
پایلوت کمتر و $1/5$ زمان محاسباتی کمتر نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T دارد. به‌عنوان مثال، یک آزمایش از سی آزمایش انجام شده در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خطای روش الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک به‌ازای SNR های بیشتر از ۱۹dB و خطای روش الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو به‌ازای SNR های بیشتر از ۱۸dB صفر شده‌اند؛ در ضمن خطای الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه به‌ازای SNR های بیشتر از ۲۰dB صفر شده است. در SNR پایین خطای هر چهار الگو به‌طور تقریبی برابر است و در SNR زیاد فاصله‌ی نمودارها با نمودار الگوی پایلوت سامانه DVB-T زیاده‌تر می‌شود. به‌عنوان مثال به‌ازای SNR=19dB، خطای الگوهای پیشنهادی شماره ۱ و ۲ صفر شده است و خطای الگوی پیشنهادی شماره سه از الگوی سامانه DVB-T، به میزان ۳/۹۹dB کمتر شده است. بنابراین هر سه الگوی پیشنهادی عملکرد مناسبی از لحاظ احتمال خطا دارند.

• حالت دو: سیستم OFDM به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی

در این حالت الگوهای پایلوت پیشنهادی با سی روش درون‌یابی دوبعدی مختلف برای "سیستم OFDM به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی"، مقایسه شده‌اند. جدول (۵) سه پارامتر مورد سنجش احتمال خطا، مدت زمان و تعداد پایلوت‌ها برای سامانه OFDM با نوفه AWGN و محوشدگی رایلی را نشان می‌دهد. براساس این جدول ملاحظه می‌شود، الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک دارای میزان خطای کمتر در بیشتر روش‌های درون‌یابی، $7/69\%$ تعداد پایلوت بیشتر و $14/9\%$ زمان محاسباتی بیشتر نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T است. الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو دارای میزان خطای کمتر در نصف روش‌های درون‌یابی، $0/33\%$ تعداد پایلوت بیشتر و $4/6\%$ زمان محاسباتی کمتر نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T است. الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه دارای میزان خطای کمتر در چندین روش درون‌یابی است، $0/23\%$ تعداد

(جدول-۵): سامانه OFDM به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی
(Table-5): OFDM system with AWGN noise and Rayleigh fading

میزان خطا	تعداد پایلوت	زمان محاسباتی	الگوها
خطای کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T در بیشتر روش‌ها	$7/69\%$ بیشتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	$14/9\%$ بیشتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک
خطای کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T در نصف روش‌ها	$0/33\%$ بیشتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	$4/6\%$ کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو
خطای کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T در چندین روش	$0/23\%$ کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	$1/5\%$ کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه



(شکل-۸): درون‌یابی هرمیت مکعبی-نزدیک‌ترین همسایگی در سامانه OFDM به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی
(Figure-8): Cubic hermit-Nearest neighbor interpolation in OFDM system with AWGN noise and Rayleigh fading

• **حالت سه: سامانه DVB-T به همراه نوفه AWGN**

در این حالت الگوهای پایلوت پیشنهادی با سی روش درون‌یابی دوبعدی مختلف برای سامانه DVB-T به همراه نوفه AWGN، مقایسه شده‌اند. جدول (۶) سه پارامتر احتمال خطا، مدت زمان و تعداد پایلوت‌ها در سامانه DVB-T با نوفه AWGN را نشان می‌دهد. براساس این جدول، الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک در بیشتر روش‌های درون‌یابی میزان خطای کمتری دارد، $7/69\%$ تعداد پایلوت بیشتر و زمان محاسباتی برابر، نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T دارد.

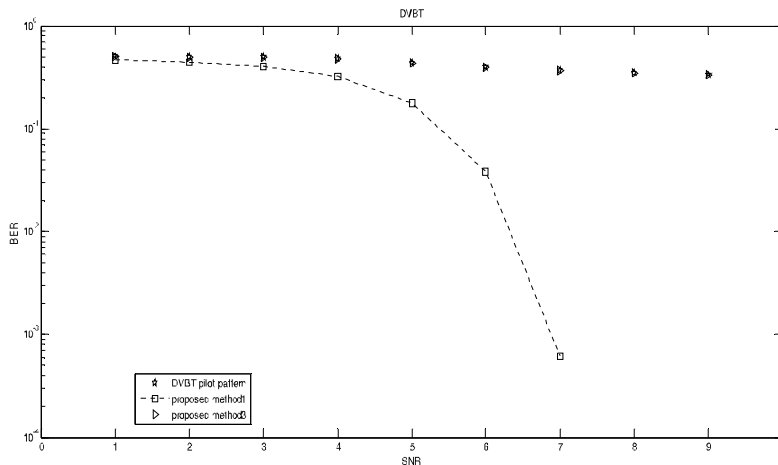
الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه دارای میزان خطای برابر در تمام روش‌های درون‌یابی است و $0/23\%$ تعداد پایلوت کمتر و زمان محاسباتی برابر نسبت به الگوی پایلوت متداول DVB-T دارد. به‌عنوان مثال، یک آزمایش از سی

آزمایش انجام‌شده در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خطای روش الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک برای SNR بیشتر از 8dB صفر شده است. الگوی پیشنهادی شماره سه با الگوی پایلوت سامانه DVB-T رفتاری به‌طور کامل مشابه دارد و نمودارهای آن‌ها روی هم قرار دارد. در SNRهای کم، خطای الگوی پیشنهادی شماره یک با الگوی پایلوت سامانه DVB-T به‌طور تقریبی برابر است و در SNRهای زیاد فاصله نمودار الگوی پیشنهادی شماره یک با نمودار الگوی پایلوت سامانه DVB-T خیلی زیاد می‌شود. به‌عنوان مثال در $\text{SNR}=7\text{dB}$ ، خطای الگوی پیشنهادی شماره سه از الگوی سامانه DVB-T، به میزان $28/08\text{dB}$ کمتر شده است. بنابراین هر دو الگوی پیشنهادی عملکرد مناسبی از لحاظ احتمال خطا دارند.

(جدول-۶): سامانه DVB-T به همراه نوفه AWGN

(Table -6): DVB-T system with AWGN noise

میزان خطا	تعداد پایلوت	زمان محاسباتی	الگوها
خطای کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T در بیشتر روش‌ها	$7/69\%$ بیشتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	تقریباً برابر با الگوی پایلوت سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک
خطای برابر با الگوی پایلوت سامانه DVB-T در تمام روش‌ها	$0/23\%$ کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	تقریباً برابر با الگوی پایلوت سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه



(شکل-۹): درون‌یابی اسپیلین-پایین‌گذر در سامانه DVB-T به همراه نوفه AWGN

(Figure-9): Spline-Low pass interpolation in DVB-T system with AWGN noise

تعداد پایلوت‌ها برای سامانه DVB-T با نوفه و محوشدگی رایلی را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک دارای میزان خطای کمتر در بیشتر روش‌های درون‌یابی است و $7/69\%$ تعداد پایلوت بیشتر و زمان محاسباتی برابر، نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T دارد.

• **حالت چهار: سامانه DVB-T به همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی**

در این حالت الگوهای پایلوت پیشنهادی توسط سی روش درون‌یابی دوبعدی مختلف برای "سامانه DVB-T به همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی"، مقایسه شده‌اند. جدول (۷) سه پارامتر مورد سنجش احتمال خطا، مدت زمان و

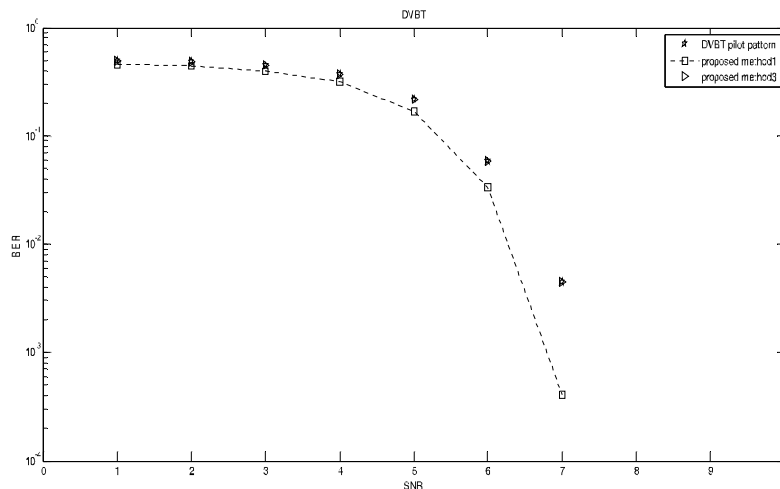
الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه دارای میزان خطای برابر در تمام روش‌های درون‌یابی است و 0.23% تعداد پایلوت کمتر و زمان محاسباتی برابر، نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T دارد. به‌عنوان مثال، یک آزمایش از سی آزمایش انجام‌شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود، خطای روش الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک به‌زای SNRهای بیشتر از 8dB صفر شده است. الگوی پیشنهادی شماره سه با الگوی پایلوت سامانه DVB-T رفتاری

به‌طور کامل مشابه دارد و نمودارهای آن‌ها روی هم قرار دارد. در SNRهای کم خطای الگوی پیشنهادی شماره یک با الگوی پایلوت سامانه DVB-T به‌طور تقریبی برابر است و در SNRهای زیاد فاصله نمودار الگوی پیشنهادی شماره یک با نمودار الگوی پایلوت سامانه DVB-T زیادتر می‌شود. به‌عنوان مثال در $\text{SNR}=7\text{dB}$ خطای الگوی پیشنهادی شماره سه از الگوی سامانه DVB-T به میزان 7dB کمتر شده است. بنابراین هر دو الگوی پیشنهادی عملکرد مناسبی از لحاظ احتمال خطا دارند.

(جدول-۷): سامانه DVB-T به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی

(Table-7): DVB-T system with AWGN noise and Rayleigh fading

میزان خطا	تعداد پایلوت	زمان محاسباتی	الگوها
خطا کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T در بیشتر روش‌ها	$7/69\%$ بیشتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	برابر با الگوی پایلوت سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک
خطا برابر با الگوی پایلوت سامانه DVB-T در تمام روش‌ها	0.23% کمتر از الگوی پایلوت سامانه DVB-T	برابر با الگوی پایلوت سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه



(شکل-۱۰): درون‌یابی اسپیلاین-اسپیلاین در سامانه DVB-T به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی

(Figure-10): Spline-Spline interpolation in DVB-T system with AWGN noise and Rayleigh fading

• مقایسه روش‌های درون‌یابی دوبعدی در چند

فرکانس داپلر مختلف در DVB-T

پدیده داپلر در اثر سرعت نسبی فرستنده و گیرنده به وجود می‌آید و باعث ایجاد انتقال فرکانسی در فرکانس حامل در گیرنده می‌شود و در نتیجه باعث تغییر پهنای باند سیگنال ارسالی می‌شود. در صورتی که این تغییر در گیرنده خنثی نشود، باعث اعوجاج سیگنال شده و در نتیجه بازده طیف رادیویی را کاهش خواهد داد. محدوده فرکانس داپلر در سامانه DVB-T در حدود صفر تا 243 هرتز است. در مرحله دوم شبیه‌سازی در این مقاله، برای ارزیابی روش‌های پیشنهادی در حضور پدیده داپلر، برای هر یک از حالت‌های

چهارتایی مذکور، از سه فرکانس داپلر صفر و 30 و 150 هرتز استفاده می‌شود؛ از این‌رو، در مرحله دوم شبیه‌سازی، روش‌های درون‌یابی خطی، نزدیک‌ترین همسایگی، اسپیلاین، هرمیت مکعبی، کسینوسی و پایین‌گذر را در بعدهای درون‌یابی دوبعدی قرار داده و با هم ترکیب کرده و سه فرکانس داپلر 0 ، 30 و 150 هرتز در سامانه DVB-T برای الگوی پایلوت سامانه DVB-T پیاده‌سازی شد. شبیه‌سازی حاصل نشان می‌دهد که در بیشتر روش‌ها درون‌یابی‌های خطی و کسینوسی در بُعد دوم بهترین عملکرد را دارند و درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایگی در بُعد دوم بدترین عملکرد را دارد. در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)

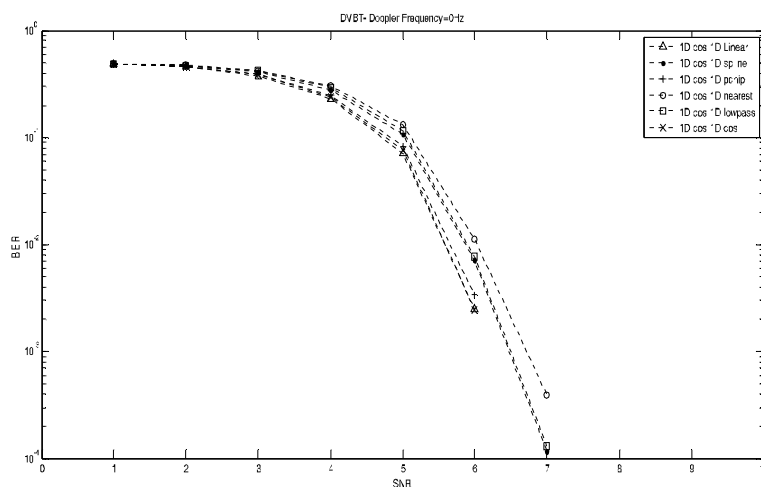
نتیجه حاصل از شش آزمایش در سه فرکانس داپلر مختلف که بعد نخست تمام آن‌ها درون‌یابی کسینوسی است، نمایش داده شده است.

در شکل (۱۱) شش روش درون‌یابی دوبعدی با یکدیگر در فرکانس داپلر صفر هرتز در سیستم DVB-T مقایسه شده‌اند. بعد نخست کلیه این شش روش، درون‌یابی کسینوسی و در بعد دوم درون‌یابی‌های خطی، اسپیلاین، هرمیت مکعبی، نزدیکترین همسایگی، پایین‌گذر و کسینوسی استفاده شده است.

در شکل (۱۲) شش روش درون‌یابی دوبعدی با یکدیگر در فرکانس داپلر سی هرتز در سامانه DVB-T مقایسه شده‌اند. بعد نخست کلیه این شش روش، درون‌یابی کسینوسی و در بعد دوم درون‌یابی‌های خطی، اسپیلاین، هرمیت مکعبی، نزدیکترین همسایگی، پایین‌گذر و کسینوسی استفاده شده است.

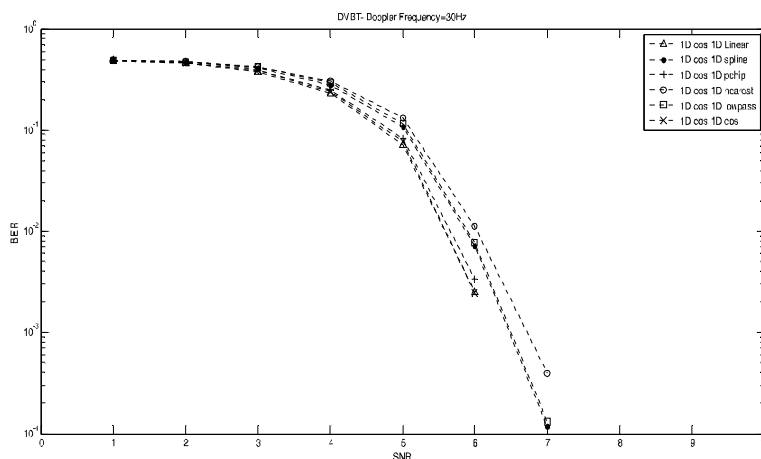
در شکل (۱۳) شش روش درون‌یابی دوبعدی با یکدیگر در فرکانس داپلر ۱۵۰ هرتز در سامانه DVB-T مقایسه شده‌اند. بعد نخست کلیه این شش روش، درون‌یابی کسینوسی و در بعد دوم درون‌یابی‌های خطی، اسپیلاین، هرمیت مکعبی، نزدیکترین همسایگی، پایین‌گذر و کسینوسی استفاده شدند.

بر اساس شکل‌های (۱۱، ۱۲ و ۱۳) ملاحظه می‌شود زمانی که بعد نخست درون‌یابی کسینوسی باشد، در SNRهای کم درون‌یابی کسینوسی-خطی بهترین عملکرد و درون‌یابی کسینوسی-نزدیکترین همسایگی بدترین عملکرد را دارد. در SNRهای زیاد درون‌یابی کسینوسی-خطی و کسینوسی-کسینوسی بهترین عملکرد و درون‌یابی کسینوسی-نزدیکترین همسایگی بدترین عملکرد را دارند.



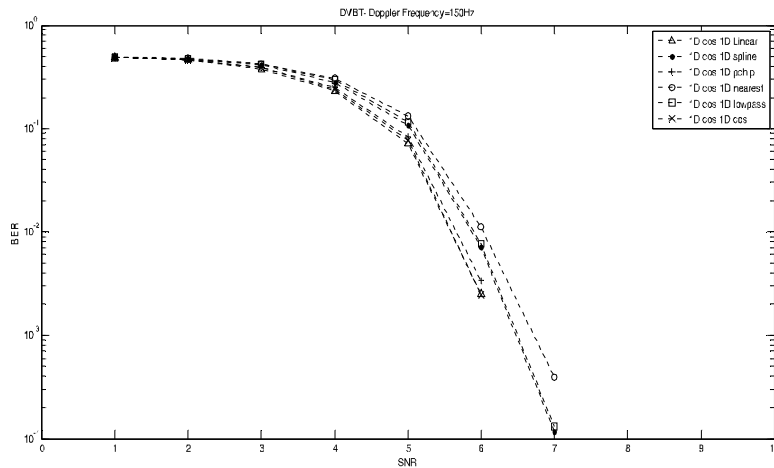
(شکل-۱۱): بعد نخست درون‌یابی کسینوسی در فرکانس داپلر ۰ Hz

(Figure-11): Cosine interpolation in the first dimension with Doppler frequency= 0HZ



(شکل-۱۲): بعد نخست درون‌یابی کسینوسی در فرکانس داپلر ۳۰ Hz

(Figure-12): Cosine interpolation in the first dimension with Doppler frequency= 30HZ



(شکل-۱۳): بعد نخست درون‌یابی کسینوسی-فرکانس داپلر ۱۵۰ Hz
(Figure-13): Cosine interpolation in the first dimension with Doppler frequency= 150HZ

پیشنهادی شماره یک به مقدار جزئی عملکرد بهتری نسبت به نمودار الگوی پایلوت سامانه DVB-T دارد. برای مثال در $SNR=5dB$ به اندازه $0.34 dB$ خطای کمتری نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T دارد.

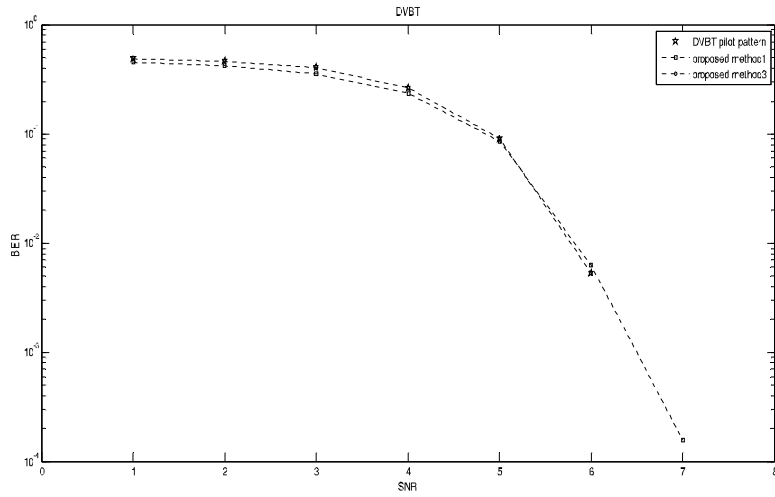
شکل (۱۵) مقایسه الگوهای پایلوت را در سامانه DVB-T به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی، در فرکانس داپلر سی هرتز و برای درون‌یابی هرمیت مکعبی-خطی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه با الگوی پایلوت سامانه DVB-T عملکرد به‌طور کامل مشابهی دارند. نمودار الگوی پیشنهادی شماره یک به مقدار جزئی عملکرد بهتری نسبت به نمودار الگوی پایلوت متداول سیستم DVB-T دارد. برای مثال در $SNR=6dB$ به‌اندازه $0.33 dB$ خطای کمتری نسبت به الگوی پایلوت سامانه DVB-T دارد. شکل (۱۶) مقایسه الگوهای پایلوت را در سامانه DVB-T به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی، در فرکانس داپلر ۱۵۰ هرتز و برای درون‌یابی هرمیت مکعبی-خطی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه با الگوی پایلوت سامانه DVB-T عملکرد به‌طور کامل مشابهی دارند. الگوی پیشنهادی شماره یک به مقدار جزئی عملکرد بهتری نسبت به الگوی پایلوت سیستم DVB-T دارد. به‌طور مثال در $SNR=6dB$ به‌اندازه $0.33 dB$ خطای کمتری نسبت به الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T دارد. بنابراین در هر سه فرکانس داپلر ملاحظه می‌شود الگوهای پایلوت پیشنهادی در درون‌یابی هرمیت مکعبی-خطی عملکرد بهتری دارد.

• مقایسه الگوهای پایلوت پیشنهادی با الگوی پایلوت DVB-T توسط روش درون‌یابی مطلوب در سه فرکانس داپلر

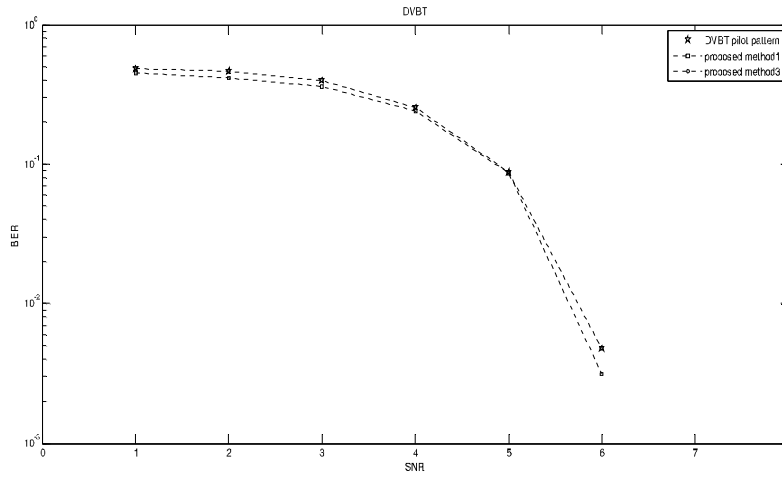
در مرحله دوم شبیه‌سازی این پژوهش، روش‌های درون‌یابی مختلف برای الگوی پایلوت سامانه DVB-T در سه فرکانس داپلر مختلف مقایسه شد. ملاحظه می‌شود که در بیش‌تر روش‌ها، بهترین عملکرد یا کمترین خطای زمانی اتفاق می‌افتد که بعد دوم درون‌یابی دوبعدی، درون‌یابی خطی باشد.

در مرحله سوم شبیه‌سازی از روش درون‌یابی دوبعدی استفاده می‌شود که باعث عملکرد خوب و خطای کم در الگوی پایلوت سامانه DVB-T می‌شود. در این حالت نشان داده می‌شود که الگوهای پایلوت پیشنهادی از الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T در سه فرکانس داپلر مختلف، عملکرد بهتری دارند؛ از این‌رو، روش درون‌یابی مطلوب آن است که بعد دوم آن درون‌یابی خطی باشد.

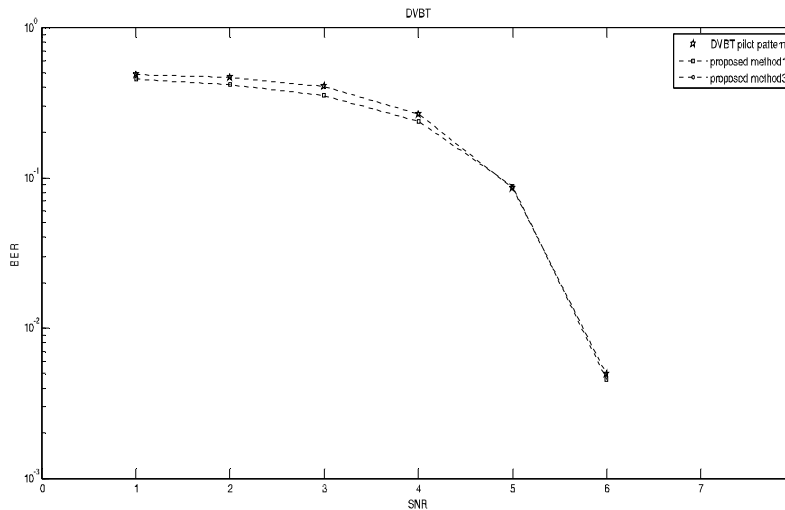
در شکل‌های (۱۴، ۱۵ و ۱۶) روش درون‌یابی دوبعدی هرمیت مکعبی-خطی برای مقایسه الگوهای پایلوت پیشنهادی با الگوی پایلوت سامانه DVB-T در سه فرکانس داپلر مختلف نشان داده شده است. شکل (۱۴) مقایسه الگوهای پایلوت را در سامانه DVB-T به‌همراه نوفه AWGN و محوشدگی رایلی، در فرکانس داپلر صفر هرتز و برای درون‌یابی هرمیت مکعبی-خطی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه با الگوی پایلوت سامانه عملکرد به‌طور کامل مشابهی دارند و نمودارهای آن‌ها یکی هستند. نمودار الگوی



(شکل-۱۴): درون‌یابی هرमित مکعبی-خطی در فرکانس داپلر ۰ Hz
 (Figure-14): Cubic hermit- Linear interpolation in Doppler frequency= 0 Hz



(شکل-۱۵): درون‌یابی هرमित مکعبی-خطی در فرکانس داپلر ۳۰ Hz
 (Figure-15): Cubic hermit- Linear interpolation in Doppler frequency= 30 Hz



(شکل-۱۶): درون‌یابی هرमित مکعبی-خطی در فرکانس داپلر ۱۵۰ Hz
 (Figure-16): Cubic hermit- Linear interpolation in Doppler frequency= 150 Hz

۶- نتیجه‌گیری

به دلیل این که برای درون‌یابی دوبعدی استفاده از هر یک از روش‌های درون‌یابی یک‌بعدی در دو بُعد، مجاز است و می‌توان از یک روش یکسان در دو بُعد و یا دو روش متفاوت در دو بُعد استفاده کرد؛ بنابراین باید در انتخاب روش درون‌یابی یک‌بعدی براساس اولویت‌ها عمل کرد. در این پژوهش پارامترهای دقت، پیچیدگی محاسباتی و زمان مصرفی به‌عنوان معیارهای با اولویت در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان با در نظر گرفتن اولویت‌های زمان محاسباتی، هزینه و خطا، یکی از چهار روش الگوی پایلوت را انتخاب کرد. برای انتخاب روش درون‌یابی دوبعدی در هر یک از چهار روش الگوی پایلوت، با توجه به اولویت‌های دقت بیشتر یا کمتر، پیچیدگی محاسباتی بیشتر یا کمتر، زمان بیشتر یا کمتر، روش مورد نظر انتخاب شود؛ بنابراین نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این پژوهش اگر اولویت هزینه یا همان تعداد پایلوت باشد، الگوی پایلوت با تعداد پایلوت کمتر ارجح‌تر و ترتیب ارجحیت به‌صورت زیر است:

۱- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه

۲- الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T

۳- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو

۴- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک

بنابر نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش اگر اولویت میزان خطا باشد، الگوی پایلوت شماره یک و سه در بیشتر آزمایش‌ها خطای کمتری از الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T دارند و در آزمایش‌های که هر سه الگوی پیشنهادی میزان خطای کمتری از الگوی پایلوت سامانه DVB-T دارند، ترتیب ارجحیت به‌صورت زیر است:

۱- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو

۲- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک

۳- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه

۴- الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T

اگر اولویت زمان محاسباتی باشد، ترتیب ارجحیت به‌صورت زیر است:

۱- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو

۲- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه

۳- الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T

۴- الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک

نتایج ذکر شده، به اختصار در جدول (۸) نشان داده

شده است.

(جدول-۸): نتیجه‌گیری

(Table-8): Conclusion

اولویت / روش‌ها	تعداد پایلوت کمتر	میزان خطای کمتر	زمان محاسباتی کمتر
نخستین روش ارجح	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو
دومین روش ارجح	الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه
سومین روش ارجح	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره دو	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره سه	الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T
چهارمین روش ارجح	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک	الگوی پایلوت متداول سامانه DVB-T	الگوی پایلوت پیشنهادی شماره یک

Department of Radio Electronics, Brno University of Technology, 2012.

[4] M. Elsharief, M. Abouelatta, Zekry, "Implementing a Standard DVB-T System using MATLAB Simulink", *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), Vol. 98, No.5, pp.27-32, July 2014.

[۵] سعید قاضی مغربی* و فریبان خردادپور دیلمانی، "استفاده از تبدیل بسته موجک در بهبود عملکرد OFDM به جای روش مرسوم مبتنی بر FFT"، نشریه

7- References

۷- مراجع

- [1] F. Sanzi and J. Speidel, "An adaptive two-dimensional channel estimator for wireless OFDM with application to mobile DVB-T", *IEEE Transactions Broadcasting*, Vol. 46, No. 2, pp. 128-133, Jun. 2000.
- [2] K. Fazl and J. Kaiser, *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems*. John Wiley & Sons: England, 2013.
- [3] H. Onderj and T. Kratochvil, "DVBT channel coding implementation in MATLAB",

- [17] P. P. Sure, Ch. M. Bhuma, "A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising Filter," *International Journal of Electronics & Communication*, Vol. 5, No. 5, May 2017.
- [18] A. N. Uwaechia and N. M. Mahyuddin, "A Review on Sparse Channel Estimation in OFDM System Using Compressed Sensing," *IETE Technical Review*, Vol. 34, No. 5, pp. 514-531, 2017.
- [19] V. Mathai, K. M. Sagayam, "Comparison and Analysis of channel estimation algorithms in OFDM systems," *International Journal of Scientific & technology research*, Vol. 2, No. 3, Mar. 2013.
- [20] B. Kamislioglu, A. AKBAL, "LSE Channel Estimation and Performance Analysis of OFDM Systems," *Turkish Journal of Science & Technology*. Vol. 12, No. 2, pp. 53-57, 2017.
- [21] A. N. Uwaechia, N. M. Mahyuddin, "A Review on Sparse channel estimation in OFDM system using compressed sensing," *IETE Technical Review*. Aug. 2016.
- [22] P. Sure, Ch. M. Bhuma, "A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising strategies," *Engineering Science and Technology*, Elsevier, Feb. 2017
- [23] سیده زهره سیدصالحی، علی مطیع نصرآبادی، وحید ابوطالبی، "به‌کارگیری تحلیل زمان-فرکانس و ماشین همیار در تشخیص خودکار مؤلفه‌ی P ۳۰۰ جهت ارتباط مغز با رایانه"، نشریه پردازش علائم و داده‌ها، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۵۷-۷۰، سال ۱۳۸۷.
- [23] S.Z. Seyedsalehi, A.M.Nasrabadi, V.Aboutalebi, "Quadratic b-spline wavelet and committee machine for the p300 detection in Brain computer interacc", *signal and data processing*, Vol.5, No. 2, pp.70-75, 2009.
- [24] Y. Asai, J.u. MashinoI, T. SugiyamaI, and M. Katayama, "simple channel tracking scheme using deductive combining for MIMO-OFDM WLANs," *IEICE Communications Express*, Vol. 6, No.7, pp. 429-434, Jul. 2017.
- [25] Y.Kao, H. Chiu, "The Analysis of Scattered Pilot OFDM System and the Discussion of Channel Estimation Based on Two Dimensional Interpolation strategies," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 20, No. 2, pp. 629-636, Apr. 2017.
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Nearest-neighbor_Interpolation.
- [27] J. Kim, D. Kim, M. Niamat, "Pilot-based channel estimation in OFDM system", University of Toledo, 2011.
- پردازش علائم و داده‌ها، دوره ۱۶، شماره ۲، صفحه ۱۲۱-۱۳۶، سال ۱۳۹۸.
- [5] F. Kh. Deylamani and S. Gh. Maghrebi, "Using WPT as a New Method Instead of FFT for Improving the Performance of OFDM Modulation", *Journal of Signal and Data Processing*, Vol. 16, No. 2, pp. 121-136, 1398.
- [6] ETSI EN 300 744, "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", 2009.
- [7] F. Wang, "Pilot-based channel estimation in OFDM system," University of Toledo, pp. 1-95, May 2011.
- [8] J. G. Prokis and M. salchi, "Digital communication," 5th edition 2007, Mc Graw-Hill.
- [9] علی اسدی و بهزاد مظفری تازه کند، "تخمین کانال در سیستم‌های مبتنی بر OFDM با استفاده از تبدیل ویولت"، نشریه سامانه‌های غیر خطی در مهندسی برق، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۲۲-۴۱، تابستان ۱۳۹۲.
- [9] A. Asadi and B. Mozaffari. T, "Channel estimation in OFDM-based systems using wavelet transform", *Journal of nonlinear systems in electrical engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 22-41, 2013.
- [10] <https://en.wikipedia.org/Interpolation>.
- [11] R. Pulikkoonattu, "Channel estimation in DVB-T and OFDM systems", Mar. 2007.
- [12] Zh. Huaqing and L. Jianbo, "Two-dimension interpolation for channel of DVBT system", *International Conference on Computer, Control Engineering*, pp.253-256, 2012.
- [13] Y .Lee, H. Kim, M. Sung, I. Park, S. Lee, " Noise reduction for channel estimation based on pilot-block averaging in DVB-T receivers ", *IEEE*, pp. 51-58, Jan. 2006.
- [14] P. Dhok, A. Dhanvijay, "A review on digital video broadcasting terrestrial (DVB-T) based OFDM system", *International Journal of Engineering and Techniques*, Vol. 1, No. 2, Mar - Apr 2015.
- [15] A. W. Abobaker, "Study and simulation of DVB-T2 IRD performance for different types of channels", M.S. thesis, Faculty of Electrical and Electronic Engineering University Tun Hussein Onn Malaysia, Jun. 2015.
- [16] S. Pathak and H. M. Markandeshwar, "Channel estimation in OFDM systems," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering Research Paper*, Vol. 3, No. 3, Mar. 2013.

- [28] <http://rozup.ir/up/stcomputer/studownload/dif-antegral.pdf>.
- [29] [https://en.wikipedia.org/wiki/Spline_\(mathematics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Spline_(mathematics)).
- [30] https://en.wikipedia.org/wiki/Cubic_Hermite_spline.
- [31] A.Z.M. Touhidul Islam, I. Misra, "Performance of wireless OFDM system with LS-interpolation-based channel estimation in multipath fading channel", *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*, Vol. 2, No.5, Oct. 2012 .
- [32] https://www.pctesqbsite.com/scctions /zincs/qb-on_acid /zip/index.html
- [33] SA. Hosseini, H. Ghassemian, "Hyperspectral data feature extraction using rational function curve fitting," *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol. 30, No. 01, 1650001, 2016.
- [34] M. Beitollahi, SA. Hosseini, "Using Savitsky-Golay filter and interval curve fitting in order to hyperspectral data compression," *Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp.1967-1972, 2017.



بهاره خسروانی مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۵ در رشته برق مخابرات در دانشگاه آزاد اسلامی یادگار امام خمینی (ره) واحد شهرری گرفت.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

Bahareh.khosravani@yahoo.com



سعید قاضی مغربی. ایشان مهندسی الکترونیک خود را در سال ۱۳۶۸ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و کارشناسی ارشد مخابرات را در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و در سال ۱۳۸۸

دکترای تخصصی خود را در مخابرات سیستم از واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی گرفتند. نامبرده از سال ۱۳۶۸ عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری است. هم‌اکنون ریاست این دانشگاه را برعهده دارند. ایشان در سال ۱۳۹۵ موفق به اخذ رتبه سوم پژوهش‌های کاربردی جشنواره بین‌المللی خوارزمی شدند و تاکنون ترجمه و تألیف پنج کتاب دانشگاهی را انجام داده‌اند و تخصص ایشان در حوزه مخابرات دیجیتال، فیلترهای وقتی و مخابرات طیف گسترده است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

ghazimaghrebi@jdnasir.ac.ir

