

Automatic modulation classification of DVB-S2X in terms of GEO channel interferences and destructive effects of hardware based on the integration of conventional and evolutionary approaches

Seyed Mohammad Sabbagh Jafary¹, HamidReza Khodadadi^{2*}, Hamed Amhadian Yazdy³

¹ PhD Student, Imam Hossein comprehensive University (AS), Tehran, Iran. s.sabagh@ihu.ac.ir

² Associate Professor, Imam Hossein comprehensive University (AS), Tehran, Iran. (Correspondence: hkhaddadi@ihu.ac.ir)

³ Assistant Professor, Imam Hossein comprehensive University (AS), Tehran, Iran. kphahmad@ihu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Receive: 06 June 2025

Revise: 29 August 2025

Accept: 14 October 2025

Available online: 23 October 2025

Keywords:

Automatic Modulation Classification

DVB-S2X

GEO

Transponder

Genetic Algorithm

NSGAI

deep learning

Convolutional Neural Network

feature extraction

Spectral feature

Statistics feature

Moment

Cumulant.

ABSTRACT

The classification modulation is an operation between signal detection and demodulation in the physical layer and has been considered in the field of cognitive radio. So far, no comprehensive research has been conducted on DVB-S2X satellite signal modulation classification in the presence of GEO satellite channel effects. In this article, the conventional automatic modulation classification approach based on artificial features is combined with the evolutionary automatic modulation classification approach based on deep learning. Hidden and meaningful features of artificial features are automatically extracted by convolutional neural network. Also, the selection and optimization of artificial features are achieved by NSGAI multi-objective genetic algorithm. The proposed algorithm performs automatic modulation classification of nine similar and nested modulations, including high-order APSK modulations of the DVB-S2X signal. The proposed automatic modulation classification is evaluated in the presence of channel impairments. The channel impairments are the effects of non-linear and non-ideal equipments, including the satellite transponder, ground station transmitter, and the ground receiver terminal. The performance of our manner is compared with two other methods. Using optimal artificial features, despite the use of a lightweight convolutional neural network is strong performance in automatic modulation classification. At a signal-to-noise ratio above 5 dB, the overall accuracy is 100% in AWGN channel and 97% in GEO satellite channel. Also 100% classification accuracy was achieved for signal-to-noise ratio values lower than the DVB-S2X standard requirement.

Cite this article: Sabbagh, M., Khodadadi, H. R., & Amhadian, H. (2025). Automatic modulation classification of DVB-S2X in terms of GEO channel interferences and destructive effects of hardware based on the integration of conventional and evolutionary approaches. *Electronic and Cyber Defense*, 13(3), 131-147. DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.2.1.4>



OPEN  ACCESS

© The Author(s). retain the copyright and full publishing rights
Publisher: Imam Hossein University

تشخیص خودکار مدولاسیون DVB-S2X با لحاظ تداخل ها و اثرات مخرب سخت افزار کانال GEO مبتنی بر تلفیق رویکردهای مرسوم و تحول گرا

سید محمد صباغ جعفری^۱، حمیدرضا خدادادی^{۲*}، حامد احمدیان یزدی^۳

^۱ دانشجوی دکتری دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: s.sabagh@ihu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). رایانامه: hkhdadi@ihu.ac.ir

^۳ استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: kphahmad@ihu.ac.ir

چکیده	مشخصات مقاله
دسته بندی مدولاسیون، عملیاتی بین تشخیص سیگنال و مدولاسیون در لایه فیزیکی است و در حوزه رادیویی شناختی مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون تحقیق جامعی در زمینه تشخیص مدولاسیون سیگنال های ماهواره ای DVB-S2X در حضور اثرات کانال ماهواره ای GEO انجام نشده است. در این مقاله رویکرد تشخیص خودکار مرسوم مبتنی بر ویژگی های دست ساز با رویکرد تشخیص خودکار تحول گرا مبتنی بر یادگیری عمیق تلفیق شده است. ویژگی های نهفته و معنی دار از ویژگی های دست ساز به طور خودکار توسط شبکه عصبی کانولوشنال استخراج می شود. همچنین انتخاب و بهینه سازی ویژگی های دست ساز توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGAII انجام می گردد. الگوریتم پیشنهادی دسته بندی نه عدد مدولاسیون چالشی تودرتو شامل مدولاسیون های مرتبه بالای APSK سیگنال DVB-S2X را انجام می دهد. دسته بندی مدولاسیون با حضور تداخل های سیگنالی، تأثیرات غیر خطی و غیر ایدئال فرستنده زمینی، ترانسپوندر ماهواره و گیرنده زمینی ارزیابی و عملکرد آن با دو روش دیگر مقایسه می گردد. به کارگیری ویژگی های دست ساز بهینه باوجود استفاده از شبکه عصبی کانولوشنال سبک، عملکردی قوی ارائه می کند. در سیگنال به نویز بالای ۵ dB، دقت کل ۱۰۰٪ در کانال نویز سفید گوسی و دقت کل ۹۷٪ در کانال ماهواره ای GEO، به دست آمد. همچنین دقت ۱۰۰٪ برای سیگنال به نویز پایین تر از سیگنال به نویز استاندارد DVB-S2X محقق گردید.	تاریخچه مقاله: نوع مقاله: علمی - پژوهشی دریافت: ۱۶ خرداد ۱۴۰۴ بازنگری: ۰۷ شهریور ۱۴۰۴ پذیرش: ۲۲ مهر ۱۴۰۴ ارائه آنلاین: ۰۱ آبان ۱۴۰۴ کلیدواژه ها: تشخیص خودکار مدولاسیون DVB-S2X GEO ترانسپوندر الگوریتم ژنتیک NSGAII یادگیری عمیق شبکه عصبی کانولوشنال ویژگی طیفی ویژگی آماری مومنت کمولنت

استناد: صباغ جعفری، سید محمد، خدادادی، حمیدرضا، & احمدیان یزدی، حامد. (۱۴۰۴). تشخیص خودکار مدولاسیون DVB-S2X با لحاظ تداخل ها و اثرات مخرب سخت افزار کانال GEO مبتنی بر تلفیق رویکردهای مرسوم و تحول گرا. پدافند الکترونیکی و سایبری، ۱۳(۳)، ص ۱۳۱-۱۴۶.

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224347.1402.11.2.1.4>

۱- مقدمه

امروزه ارتباطات ماهواره‌ای به دلیل پیشرفت‌ها و گسترش‌های روزافزون، جهت کاربردهای مختلف بسیار پرطرفدار شده است. کیفیت بالای سرویس‌های ارائه‌شده و افزایش ارتباطات فرا منطقه‌ای بدون زیرساخت از دلایل اقبال به ارتباطات ماهواره‌ای است. گسترش ارتباطات داده محور مدرن پرفریت، باعث ایجاد طیف فرکانسی شلوغ و متراکم شده است؛ لذا، هوشمند سازی تجهیزات ارتباطی، سرویس‌دهی بهینه را در شرایط مختلف فراهم می‌کند؛ بنابراین تمایل به تعبیه ویژگی‌های هوشمند مانند رادیو شناختی در سامانه‌های ارتباطی نوظهور مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی انطباق لینک، به عنوان مدولاسیون و کدگذاری وفقی شناخته می‌شود. نسخه پخش همگانی ویدئو دیجیتال ماهواره‌ای نسل دوم توسعه داده‌شده DVB-S2X مطابق بر این فناوری است [۱]. کاربران ثانویه بدون مجوز با استراتژی‌های هوشمند رادیو شناختی، می‌توانند به‌طور فرصت‌طلبانه باندهای طیف اشغال نشده را با کاربران اصلی به اشتراک بگذارند. رادیو شناختی نه تنها نیاز به انجام سنجش طیف در باندهای فرکانسی مورد نظر دارند، بلکه نیازمند به اطلاعات اضافی مانند نوع مدولاسیون، به منظور طراحی استراتژی‌های بهبودیافته دسترسی به طیف پویا هستند. نیاز تشخیص نوع مدولاسیون برای پایش و نظارت طیف فرکانسی به عنوان وظیفه ذاتی کنترل و مراقبت طیف توسط مالکین پهنای باند و اعمال حکمرانی حاکمان برای موضوعات امنیتی و نظامی مدنظر قرار گرفته است. تشخیص مدولاسیون سیگنال در جنگ الکترونیک برای نظارت و آنالیز تهدید لازم است. شناسایی واحدهای تشعشع کننده دشمن، آماده سازی سیگنال‌های جمینگ، شنود سیگنال و محافظت از سیگنال خودی نیازمند تشخیص نوع مدولاسیون است [۲].

ساختار مقاله به صورت زیر است:

در بخش دوم، روش تحقیق شامل سیر تحول موضوع و رویکردهای کلی و مقاله‌های مرتبط با موضوع شرح داده خواهد شد. در بخش سوم، مدل‌های سیگنال DVB-S2X، کانال ماهواره GEO، تعریف مسئله همراه با فرضیات و همچنین راهکار پیشنهادی و شبیه سازی آن ارائه شده است. در بخش سوم نیز نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته و سرانجام در بخش چهارم نتیجه گیری انجام شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- سیر تحول موضوع

روش‌های خودکار شناسایی مدولاسیون مبتنی بر الگوریتم‌های دسته بندی هستند. به طور کلی، سامانه‌های دسته بندی خودکار مدولاسیون مبتنی بر یکی از این دو رویکرد طراحی می‌شوند: (۱) رویکردهای تئوری تصمیم و (۲) رویکردهای تشخیص الگو. روش‌های تئوری تصمیم از استدلال‌های آزمون فرضیه احتمال برای

فرمول بندی مسائل تشخیص استفاده می‌کنند. در صورت دانستن مشخصات کانال مخابراتی این رویکرد عملکرد بهینه‌ای در تشخیص مدولاسیون دارد. پیچیدگی محاسبات روش‌های تخمین مشخصات کانال، عاملی برای توسعه دسته بندی کننده‌های با رویکرد تشخیص الگو شده است. روش‌های خودکار دسته بندی مدولاسیون با رویکرد تشخیص الگو مبتنی بر ویژگی هستند و به دو گروه تقسیم می‌شوند: (۱) روش‌های مرسوم و (۲) روش‌های تحول گرا. در روش‌های مرسوم ویژگی سیگنال‌ها به صورت دست ساز استخراج و به عنوان ورودی به الگوریتم‌های یادگیری ماشین داده می‌شود. شکل (۱) بلوک دیگرام کلی روش مرسوم مبتنی بر ویژگی دست ساز را نشان می‌دهد [۳].



شکل (۱): دسته بندی کننده مبتنی بر یادگیری عمیق [۳]

ویژگی‌های دست ساز به چهار دسته عمده تقسیم می‌شوند:

- (۱) ویژگی‌های طیفی یا لحظه‌ای که از مؤلفه‌های لحظه‌ای سیگنال شامل دامنه، فاز و فرکانس لحظه‌ای استفاده می‌کند. این ویژگی‌ها برای مدولاسیون‌های مختلف منحصر به فرد هستند.
- (۲) ویژگی‌های آماری که از مومنت‌ها و کمولنت‌های دامنه و فاز سیگنال استفاده می‌کند. شناسایی مدولاسیون‌های مرتبه بالا نیازمند استخراج کمولنت‌های مرتبه بالا است. آمارگان مرتبه بالا به دلیل مقاوم بودن در نویز و تداخل مورد توجه قرار گرفته‌اند.
- (۳) ویژگی‌های همبستگی که از همبستگی متقابل بین سیگنال‌ها و خصوصیت ایستا چرخشی سیگنال‌های دیجیتال استفاده می‌کنند.
- (۴) ویژگی‌های تبدیل که از تبدیل یافته سیگنال مانند تبدیل موجک به عنوان ویژگی استفاده می‌کنند [۳].

روش‌های تحول گرا مبتنی بر یادگیری عمیق هستند. شکل (۲) بلوک دیگرام رویکرد دسته بندی خودکار مدولاسیون مبتنی بر یادگیری عمیق را نشان می‌دهد. سیگنال خام به عنوان ورودی به شبکه عصبی عمیق داده می‌شود و شبکه توسط لایه‌های میانی ویژگی‌های سیگنال را استخراج می‌کند و در نهایت با کمک این ویژگی‌ها دسته بندی مدولاسیون انجام می‌شود. یادگیری عمیق در مقایسه با یادگیری ماشین، مزیت‌های اساسی استخراج خودکار ویژگی و ظرفیت یادگیری بالا را ارائه می‌دهد. این معماری‌ها دقت دسته بندی مدولاسیون‌های مرتبه بالا را در کانال مخرب افزایش می‌دهند. رویکردهای تشخیص الگو مبتنی بر ویژگی‌های دست ساز از فن‌های مهندسی ویژگی پیشرفته، استفاده می‌کند و دانش بالایی در حوزه مهندسی ویژگی نیاز است و در رویکرد تحول گرا مبتنی بر تشخیص خودکار ویژگی، محققان بر طراحی شبکه عصبی عمیق متمرکز می‌شوند؛ لذا نیازمند دانش بالایی در حوزه یادگیری عمیق است [۳]. کارهای اخیر بیشتر برافزایش دقت در شرایط مختلف کلانل، سیگنال به نویز پایین و جبران کمبود داده تمرکز دارد و شبکه

محوشدگی از KNN استفاده کرد. مدولاسیون‌های انتخاب‌شده چالشی نیستند و شبیه‌سازی در کانال‌های AWGN و رایلی ارائه شد. احمد و همکاران در [۱۷] از چهار ویژگی طیفی دامنه لحظه‌ای استفاده کرد و الگوریتم دسته‌بندی مبتنی بر شبکه پرسپترون چندلایه برای تشخیص مدولاسیون‌های 16/32/64-APSK پیشنهاد داد. چهار ویژگی طیفی مرتبه بالاتر سیگنال‌ها در کانال AWGN استخراج می‌شوند. عملکرد بالای دسته‌بندی با ترکیب ویژگی‌های پیشنهادی و شبکه عصبی پرسپترون چندلایه اثبات می‌شود. ویژگی‌های لحظه‌ای جدید شامل حداکثر مجذور قدر مطلق طیف توان کلام دامنه لحظه‌ای و نسبت آن با توان‌های مختلف ارائه‌شده است. این ویژگی‌ها جذاب هستند زیرا آن‌ها از نویز کانال تأثیر کمی می‌پذیرند.

آشا و همکاران در [۱۸] مطالعه عمیقی در زمینه کارایی یادگیری عمیق در دسته‌بندی سیگنال رادیویی برای سیگنال‌های ارتباطات رادیویی انجام دادند. دو روش در نظر گرفته می‌شود. روش اول، روش پایه با به‌کارگیری مومنت‌های مرتبه بالاتر و روش دوم، روش دسته‌بندی درختی گرادیان تقویت‌شده قوی است. دو رویکرد از نظر عملکرد تحت تخریب کانال مقایسه می‌شوند. اثرات انحراف فرکانس حامل، نرخ سیمبل و محوشدگی چندمسیره به‌صورت ساختگی و اندازه‌گیری در هوا لحاظ شد و عملکرد دسته‌بندی در آزمایشگاه با به‌کارگیری رادیو نرم‌افزار از نظر دقت و استراتژی آموزش مقایسه گردید.

۲-۳- نوآوری‌های مقاله

این کار تحقیقی جامع در زمینه تشخیص مدولاسیون‌های سیگنال DVB-S2X است. سبد مدولاسیون شامل تعداد و نوع مدولاسیون مطابق استاندارد DVB-S2X در نظر گرفته‌شده است. مقالات مشابه اثرات کانال GEO را مطرح نکردند. از نقاط قوت کار ما و نوآوری‌های اصلی این است که کانال به‌صورت واقعی در نظر گرفته‌شده و اثرات مخرب سخت‌افزار به‌صورت کامل و دقیق مطابق استاندارد مدل شده است. در سناریوی ماهواره‌ای GEO موضوع این مقاله، به دلایل مختلط اثرات سخت‌افزارها بسیار مهم است. این دلایل به‌طور کلی شامل این موارد است: (۱) بالا بودن فرکانس سیگنال‌های ماهواره GEO، (۲) به‌کارگیری تقویت‌کننده‌های توان بالا، (۳) بالا بودن مرتبه مدولاسیون‌های به‌کارگیری شده در DVB-S2X، (۴) تعدد سخت‌افزارها باوجود سخت‌افزار ماهواره، (۵) محدودیت‌های تغذیه، ابعاد و وزن ترانسپوندر که موجب افزایش عملکرد غیر خطی و غیر ایدئال اجزا می‌شود.

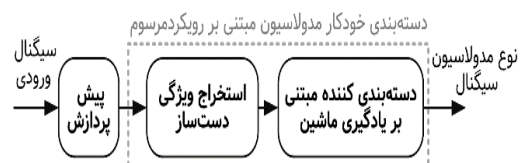
تلفیق رویکردهای مرسوم و تحول‌گرا در این مقاله انجام‌شده است. نوآوری استفاده از ویژگی‌های دست‌ساز به‌عنوان ورودی شبکه عصبی عمیق، موجب سبک شدن شبکه شد. تلفیق شبکه کانولوشنال با الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی ویژگی‌ها برای اولین بار در این طرح ارائه‌شده است و به معنای واقعی شناسایی

کانولوشنال در ترکیب با شبکه‌های جدید بیشترین اقبال را داشته است. ایده ترکیب ویژگی‌ها با شبکه ترانسفورمر [۴] و استفاده از پیش‌پردازش جهت افزایش دقت بیان‌شده است [۵]. شبکه توجه در حوزه زمان-فرکانس به‌عنوان کدگذار و کد بردار [۶] و شبکه متخاصم مولد برای تولید داده‌های جدید، حذف نویز و یا جایگزینی داده‌های از دست‌رفته به‌کارگیری شده است [۷]. ایده‌های جدید در ترکیب شبکه عصبی عمیق کانولوشنال و شبکه عصبی عمیق حافظه زمان کوتاه بلند [۸] و شبکه‌های کانولوشنال و ترانسفورمر خود توجه برای بهبود دقت دسته‌بندی مطرح‌شده است [۹]. شبکه کانولوشنال مختلط با لایه‌های منطبق بر دریافت و پردازش سیمبل‌های مختلط در [۱۰] ارائه شد. استفاده هم‌زمان از چند نوع ورودی و طراحی معماری شبکه مطابق با پذیرش این ورودی‌ها توسعه داده‌شده است [۱۱]، [۱۲].

۲-۲- کارهای مرتبط

در [۳]، بررسی فشرده رویکردهای مبتنی بر احتمال و ویژگی، همراه با خلاصه نتایج عددی و بحث در مورد روندهای تحقیق ارائه‌شده است. کار [۱۳] به‌طور خلاصه رویکردهای دسته‌بندی خودکار مدولاسیون مبتنی بر یادگیری عمیق را بررسی کرد. دو رویکرد در به‌کارگیری شبکه عصبی کانولوشنال در تشخیص خودکار مدولاسیون آورده است. این رویکردها شامل رویکرد دنباله‌ای مبتنی بر سیگنال با شبکه حافظه زمانی کوتاه بلند و رویکرد مبتنی بر تصویر با شبکه کانولوشنال است. لی و همکاران در [۱۴] بررسی مختصری از شناسایی سیگنال بی‌سیم و تشخیص مدولاسیون توسط یادگیری عمیق ارائه کردند. این فعالیت‌ها در حوزه‌های شبکه‌های نسل پنجم و اینترنت اشیاء برای نظارت و مدیریت هوشمند طیف انجام گرفته بود. بررسی انجام‌شده توسط جدید و همکاران در [۱۵] برای کاربرد یادگیری عمیق جهت دسته‌بندی خودکار مدولاسیون در سامانه‌های تک آنتنی و چند آنتنی از دیدگاه ارتباطی است.

اسد حسین و همکاران در [۱۶] به‌جای استفاده مستقیم از کمولنت‌های مرتبه بالا، ترکیب خطی وزن‌دار از ده کمولنت استفاده کردند. وزن‌های بهینه با الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید. مجموع فاصله اقلیدسی دویه‌دو سوپر ویژگی مدولاسیون‌های مختلف به‌عنوان تابع برازندگی استفاده می‌شود و جواب نهایی تابع برازندگی را بیشینه می‌کند. در [۱۶] برای دسته‌بندی پنج نوع مدولاسیون دیجیتال



شکل (۲): دسته‌بندی کننده مبتنی بر ویژگی دست‌ساز [۳].

شامل BPSK، QPSK، QAM، 16-QAM و 64-QAM در کانال‌های

ترانسپوندرهای ماهواره و فرستنده ایستگاه زمینی مزیت زیادی دارد. شکل (۳) منظومه این نه مدولاسیون را نشان می‌دهد. در حالت گسسته و باند پایه سیگنال دریافتی به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود [۱۳].

$$r[n] = s[n, h_k] + w[n] \quad (۴)$$

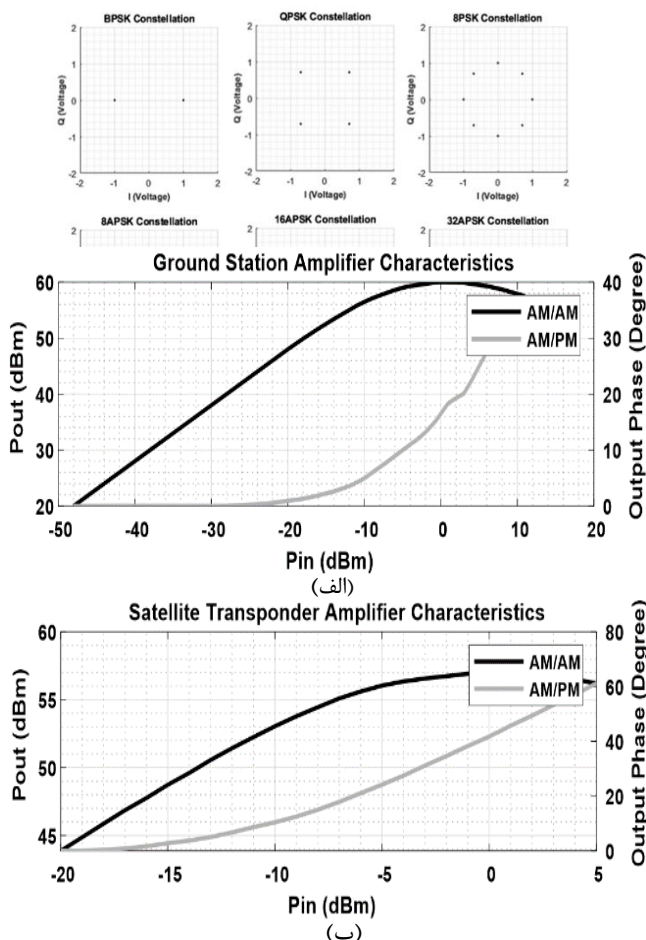
در اینجا $r[n]$ پوش مختلط سیگنال رادیویی دریافتی و $w[n]$ نویز سفید گوسی جمع‌شونده است. مدل سیگنال تحت تأثیر کانال به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود [۱۳].

$$s[n, h_k] = A_n e^{j(2\pi f_0 nT + \theta_n)} \sum_{k=-\infty}^{\infty} s[k] h(nT - kT) \quad (۵)$$

که در آن A_n دامنه سیگنال سیمبل h_n ، f_0 انحراف فرکانس حامل، θ_n انحراف فاز متغیر و T بازه سیمبل است. $h(\cdot)$ اثر ساختگی کانال در باند پایه را نشان می‌دهد. $s[k]$ دنباله سیمبل در فرستنده است. هدف دسته‌بندی خودکار مدولاسیون، تشخیص دقیق نوع مدولاسیون $r[n]$ است.

۲-۵- کانال ماهواره‌ای GEO

کانال مخابراتی سیگنال ماهواره‌ای DVB-S2X برای ایستگاه فرستنده



شکل (۴): AM/AM و AM/PM تقویت‌کننده (الف) زمینی، (ب) ماهواره [۱].

زمینی و ماهواره مطابق سرویس پخش همگانی مستقیم به خلنه

کور مدولاسیون DVB-S2X بدون دانستن اطلاعات اضافی محقق گشت. الگوریتم پیشنهادی حداکثر انطباق را بین توابع هزینه الگوریتم ژنتیک و یادگیری شبکه ایجاد کرد. ایده سوپر ویژگی ترکیب ضربی از کمولنت‌های به توان رسیده در این کار مطرح شد.

۲-۴- مدل سیگنال DVB-S2X

سیگنال DVB-S2X از نه نوع مدولاسیون پشتیبانی می‌کند. نوع مدولاسیون‌ها از انواع پیچیده و نوظهور هستند. مجموعه مدولاسیون‌ها از سه نوع مدولاسیون MPSK شامل مدولاسیون‌های BPSK، QPSK و 8PSK و شش نوع مدولاسیون MAPSK شامل 128APSK، 64APSK، 32APSK، 16APSK، 8APSK و 256APSK تشکیل شده است [۱۹].

انرژی متوسط سیمبل‌های همه مدولاسیون‌ها یکسان و مساوی واحد فرض می‌شود. در مدولاسیون MPSK دامنه سیمبل‌ها یکسان است. مدل سیگنال باند میانی مدولاسیون MPSK حول فرکانس مرکزی f_c مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود [۲۰].

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_m), \quad (۱)$$

$$\theta_m = \frac{2\pi}{M}(m-1),$$

$$m = 1, 2, \dots, M-1$$

در اینجا M مرتبه مدولاسیون است. مدولاسیون APSK از برهم‌نهی چند منظومه PSK هم‌مرکز با انرژی‌های متفاوت تشکیل شده است. مدل سیگنال باند میانی مدولاسیون MAPSK حول فرکانس مرکزی f_c مطابق رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۰].

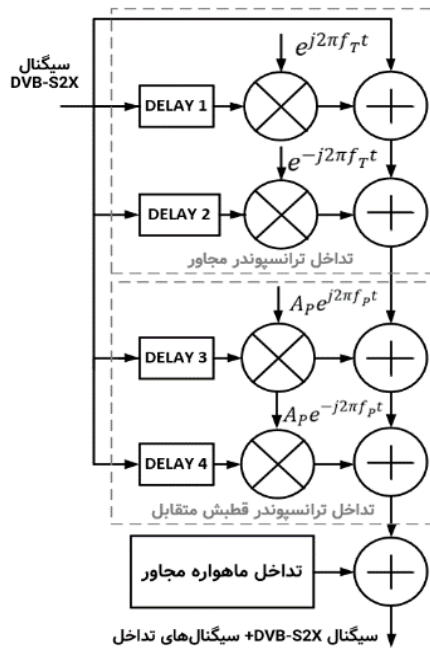
$$s(t) = u(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (۲)$$

$u(t)$ به صورت رابطه (۳) تعیین می‌شود [۲۰].

$$u(t) = \quad (۳)$$

$$\begin{cases} r_1 e^{j(\vartheta_1 + \frac{2\pi}{n_1}k)} & \text{for } k = 0, 1, \dots, n_1 - 1 \\ r_2 e^{j(\vartheta_2 + \frac{2\pi}{n_2}k)} & \text{for } k = 0, 1, \dots, n_2 - 1 \\ \vdots \\ r_N e^{j(\vartheta_N + \frac{2\pi}{n_N}k)} & \text{for } k = 0, 1, \dots, n_N - 1 \end{cases}$$

در اینجا N تعداد حلقه‌های هم‌مرکز است. $r_1, r_2, \dots, r_N$ سطوح دامنه‌ها یا شعاع حلقه‌ها است. در استاندارد DVB-S2X مقدار N برای مدولاسیون‌های 8APSK، 16APSK، 32APSK، 64APSK و 128APSK به ترتیب ۳، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸ است. همچنین n_i مرتبه مدولاسیون PSK تشکیل‌دهنده مدولاسیون APSK یا تعداد نقاط در حلقه i است و $i = 1, 2, \dots, N$ است. r_i^2 انرژی زیرمجموعه i ام سیگنال و ϑ_i انحراف فاز آن است. در مقایسه با مدولاسیون‌های QAM با تعداد سیمبل‌های یکسان، APSK تعداد سطوح دامنه کمتری دارد؛ لذا به نسبت بیشینه توان به متوسط توان کمتری نیاز است. این مشخصه در تقویت‌کننده‌های توان بالای



شکل (۶): مدل تداخل‌های سیگنال در سرویس پخش همگانی [۱].

$$\theta = -360 \int \tau_g df \quad (۶)$$

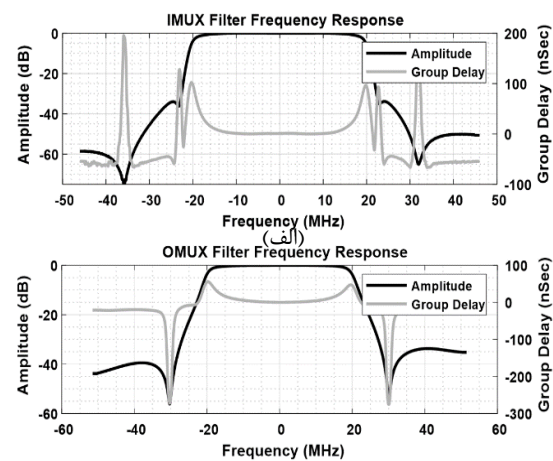
در اینجا f فرکانس برحسب هرتز، τ_g تأخیر گروهی برحسب ثانیه و θ فاز برحسب درجه است.

۳-۵-۲- تداخل‌ها

تداخل‌ها در مدل کانال ماهواره GEO شامل تداخل ترانسپوندرهای مجاور، تداخل با سیگنال قطبش متعام و تداخل ماهواره‌های مجاور است. تداخل‌ها به‌طور هم‌زمان دامنه و فاز سیمبل‌ها را تخریب می‌کنند. تداخل ترانسپوندر مجاور در حوزه زمان همپوشانی دارد؛ اما در حوزه فرکانس از سیگنال اصلی جدا است و هم دامنه با دامنه سیگنال اصلی فرض می‌شود. تداخل قطبش متعام در حوزه زمان و فرکانس همپوشانی دارد و بسته به مقدار تضعیف در قطبش متعام، دامنه سیگنال قطبش متعام ضعیف‌تر از سیگنال اصلی است. تداخل ماهواره مجاور به‌طور معمول با نویز سفید گوسی مدل می‌شود. شکل (۶) بلوک دیاگرام مدل تداخل در سرویس پخش همگانی را نشان می‌دهد.

شکل موج تداخل باتوجه به نوع مدولاسیون و ماهیت تصادفی اطلاعات به مؤلفه‌های دامنه و فاز سیگنال تداخل نگاشته می‌شود؛ لذا سیگنال تداخل تصادفی است و مجموع این سیگنال‌های تصادفی به‌عنوان منبع تداخل‌ها استفاده شده است. برای شبیه‌سازی، از تأخیر یافته داده‌های سیگنال اصلی به‌عنوان سیگنال‌های تداخل استفاده می‌شود و در مرجع [۱] به‌منظور اطمینان از نا همبستگی بین حامل سیگنال اصلی و حامل سیگنال‌های تداخل و همچنین جلوگیری از سنکرون سازی زمانی کامل بین سیمبل‌های سیگنال اصلی و سیمبل‌های سیگنال‌های تداخل مقادیر ثابتی برای چهار تأخیر شکل (۶) پیشنهاد شده است.

است. اما در بخش گیرنده جنگ الکترونیک که تشخیص مدولاسیون در این بخش انجام می‌شود دارای تجهیزات حرفه‌ای‌تری نسبت به تجهیزات گیرنده خانگی مرسوم است. مشخصات بخش گیرنده مشابه مشخصات سرویس اشتراکی یا پایانه‌های VSAT است. به‌طور کلی اثرات مخرب کانال دارای دو منشأ هستند: (۱) تداخلات محیطی و (۲) غیر ایدئال بودن سخت‌افزارها. اعوجاج در دامنه و فاز سیمبل‌های مدولاسیون ناشی از این اثرات مخرب موجب کاهش دقت تشخیص مدولاسیون خواهد شد. این تخریب‌ها به ترتیب از ابتدای کانال در ایستگاه فرستنده زمینی شامل موارد ذیل است [۱]:



شکل (۵): مشخصات حوزه فرکانس دامنه و تأخیر گروهی فیلتر

مالتی‌پلکس ترانسپوندر ماهواره (الف) ورودی، (ب) خروجی [۱].

۱-۵-۲- مشخصات بدون حافظه تقویت‌کننده

مشخصات غیرخطی بدون حافظه تقویت‌کننده ایستگاه زمینی و تقویت‌کننده ترانسپوندر ماهواره، شامل اثرات ناشی از دو مشخصه AM/AM و AM/PM است. مشخصه AM/AM دامنه سیمبل‌های مدولاسیون و مشخصه AM/PM فاز سیمبل‌های مدولاسیون را تغییر می‌دهد. مقدار تغییرات دامنه و فاز سیمبل‌ها به مقدار عقب‌نشینی توان ورودی تقویت‌کننده از اشباع آن بستگی دارد. شکل (۴) (الف) و شکل (۴) (ب) به ترتیب این دو مشخصه را برای تقویت‌کننده ایستگاه فرستنده زمینی و تقویت‌کننده ترانسپوندر ماهواره نشان می‌دهند.

۲-۵-۲- اعوجاج دامنه و فاز پاسخ فرکانسی فیلترها

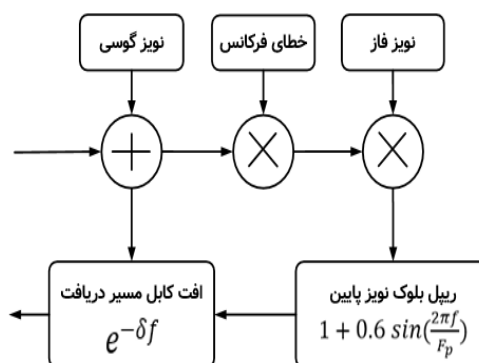
فیلترها شامل فیلتر مالتی پلکس ورودی و فیلتر مالتی پلکس خروجی ترانسپوندر ماهواره است. شکل‌های (۵) (الف) و (۵) (ب) به ترتیب پاسخ حوزه فرکانس دامنه و تأخیر گروهی فیلترهای مالتی پلکس ورودی و خروجی ترانسپوندر ماهواره را نشان می‌دهد. اعوجاج دامنه و فاز مؤلفه‌های فرکانسی با دور شدن از فرکانس مرکزی فیلتر تغییرات غیرخطی دارد. استخراج فاز پاسخ فرکانسی فیلتر از تأخیر گروهی مطابق رابطه (۶) است.

۴-۵-۲- نویز فاز

نویز فاز، فقط فاز سیمبل‌های مدولاسیون را تخریب می‌کند. سه منشأ نویز فاز در ارتباطات ماهواره‌ای شامل اسیلاتورهای فرستنده ایستگاه زمینی، ترانسپوندر ماهواره و گیرنده پایانه زمینی است. مجموع این سه نویز فاز سیمبل‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. جدول (۱) مطابق استاندارد [۱] سهم پوش نویز فاز فرستنده ایستگاه زمینی، ترانسپوندر ماهواره، گیرنده پایانه زمینی و مجموع کل تجهیزات را ارائه می‌دهد.

جدول (۱): پوش نویز فاز در اجزای مختلف (dBc/Hz) [۱].

انحراف فرکانس	فرستنده	ماهواره	گیرنده	کل تجهیزات
۱۰ Hz	-۴۲	-۳۳	-۴۲	-۳۲/۹۳
۱۰۰ Hz	-۷۲	-۶۲	-۷۲	-۶۱/۹۶
۱ KHz	-۸۲	-۸۱	-۸۲	-۷۹/۲۳
۱۰ KHz	-۹۲	-۹۱	-۹۲	-۸۹/۲۳
۱۰۰ KHz	-۱۰۲	-۱۰۰	-۱۰۲	-۹۸/۷۳
۱ MHz	-۱۱۲	-۱۱۰	-۱۱۲	-۱۰۸/۷۳
۱۰ MHz	-۱۲۲	-۱۲۰	-۱۲۲	-۱۱۸/۷۳
۵۰ MHz	-۱۲۴	-۱۲۱	-۱۲۴	-۱۲۰/۱۲



شکل (۷): مدل اثر نویز، خطای فاز و فرکانس و اعوجاج دامنه [۱].

۵-۵-۲- خطای فرکانس

خطای فرکانس ناشی از ناپایداری اسیلاتورهای محلی فرستنده، ترانسپوندر و گیرنده، اثر مخرب در تغییر فاز پیوسته سیمبل‌های مدولاسیون دارد. در استاندارد [۱]، خطاهای فرکانس در باند Ku، ± 3 MHz فرض می‌شود. برای حداکثر فرکانس باند پایه با پهنای باند ۳۶ MHz حداکثر خطای فرکانس $\pm 4/5$ KHz است.

۶-۵-۲- اعوجاج دامنه فرکانس گزین

اعوجاج دامنه فرکانس گزین در گیرنده پیلینه زمینی ناشی از بلوک نویز پایین و کابل فرکانس رادیویی رخ می‌دهد. بلوک نویز پایین، ریپل فرکانس گزین سینیوسی با دامنه قله تا قله ۱/۵ dB و دوره تناوب ۵۰ MHz در دامنه را ایجاد می‌کند. کابل فرکانس رادیویی، دامنه سیمبل‌ها را به‌صورت فرکانس گزین با تابع‌نمایی تضعیف

می‌نماید. اعوجاج دامنه فرکانس گزین، دامنه و فاز سیمبل‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

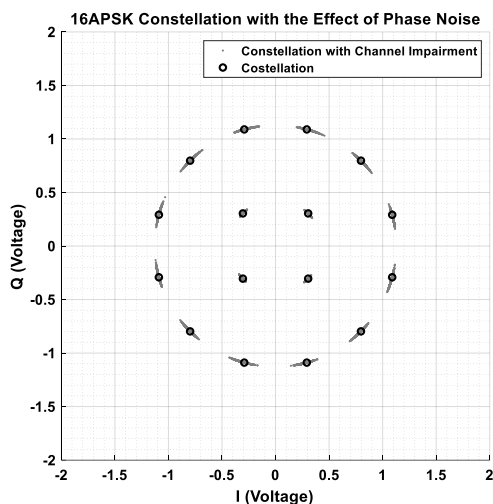
۷-۵-۲- نویز گوسی سفید

نویز گوسی سفید جمع‌شونده، دامنه و فاز سیمبل‌های مدولاسیون را تخریب می‌کند.

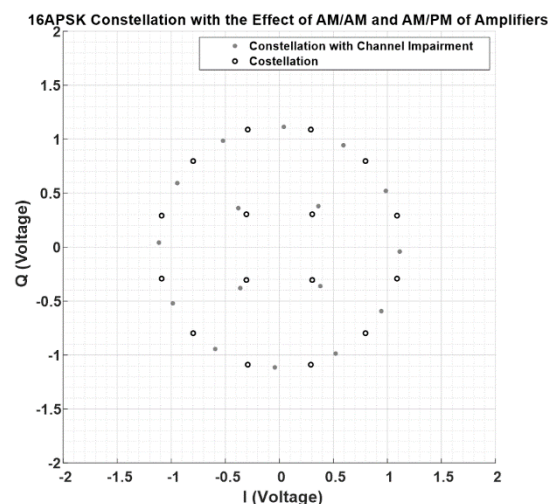
شکل (۷) بلوک دیاگرام مدل کانال برای نویز گوسی سفید جمع‌شونده، نویز فاز، خطای فرکانس و اعوجاج دامنه فرکانس گزین را نشان می‌دهد. در شکل (۷)، f نشان‌دهنده فرکانس، ۵۰ MHz $F_p =$ فرکانس تناوب و $\delta = 4/6 \times 10^{-10}$ است [۱]. شکل‌های (۸) تا (۱۴) شبیه‌سازی اثرات عوامل مخرب کانال را به‌طور جداگانه بر منظومه 16APSK نشان می‌دهد. در شکل (۸) سیگنال به نویز dB ۱۰ است. دواير توخالی سیاه‌رنگ سیمبل‌های اولیه در فرستنده و نقاط خاکستری سیمبل‌های دریافتی در گیرنده را با لحاظ اثرات کانال نشان می‌دهد.

۶-۲- تعریف مسئله

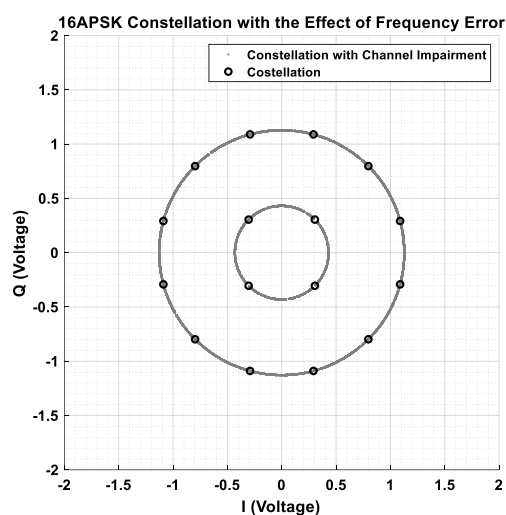
امکان استخراج نوع مدولاسیون DVB-S2X با کمک هدر باند پایه در سناریوهای بدون هماهنگی یا سفارشی‌سازی شده وجود ندارد؛ لذا مدولاسیون سیگنال به‌صورت کور شناسایی می‌شود. در اغلب کارهای گذشته، کانال غیر ماهواره‌ای محوشدگی رایلی یا راسین در نظر گرفته‌شده و تمرکز بر لحاظ خطاهای واحد سنکرون ساز شامل خطاهای سنکرون سازی فاز، فرکانس و زمان است. این نوع کانال مربوط به ارتباطات زمینی، هوایی و ارتباطات ماهواره‌ای تلفن همراه است. به‌طور معمول در ارتباطات ماهواره‌ای تلفن همراه، ماهواره‌ها در لایه LEO و در حرکت هستند. همچنین کاربر زمینی با آنتن همه جهتی روی گوشی، در حال حرکت است؛ لذا کانال ارتباطی در تلفن همراه ماهواره‌ای باتوجه به انعکاس‌های از زمین، عوارض و ساختمان‌ها چندمسیره محوشدگی در نظر گرفته می‌شود. همچنین در سناریوی LEO مدولاسیون‌های DVB-S2X استفاده نمی‌شود. در کاربردهای VSAT که مسئله این مقاله است، ترمینال زمینی دارای آنتن دیش با جهت‌دهی بالا و لوب‌های جانبی بسیار پایین است. همچنین ترمینال زمینی و جهت‌دهی آنتن ثابت و به سمت ماهواره GEO است؛ لذا کانال از نوع چندمسیره محوشدگی نیست. در سناریوهای ماهواره‌ای GEO نرخ بالا، کانال نویز گوسی سفید جمع‌شونده با لحاظ اثرات مخرب سخت‌افزارها و تداخل‌ها در نظر گرفته می‌شود.



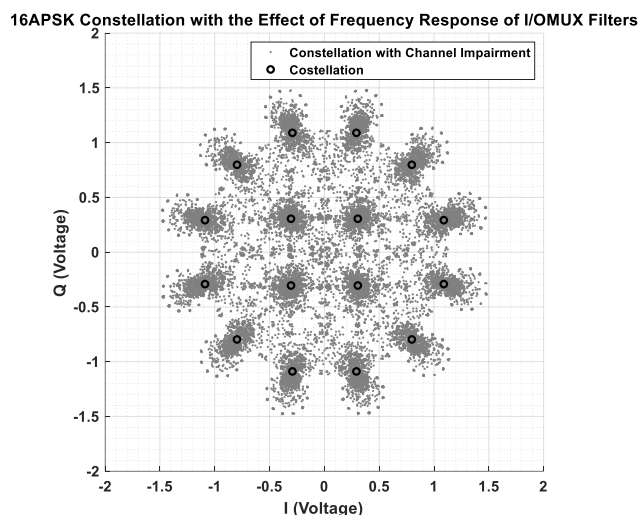
شکل (۱۱): اثر نویز فاز بر سیمبل‌های مدولاسیون 16APSK.



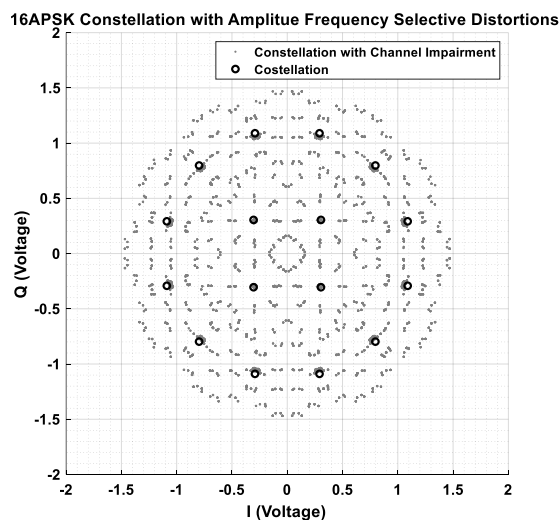
شکل (۸): اثر غیرخطی تقویت‌کننده‌ها بر سیمبل‌های 16APSK.



شکل (۱۲): اثر خطای فرکانس بر سیمبل‌های مدولاسیون 16APSK.

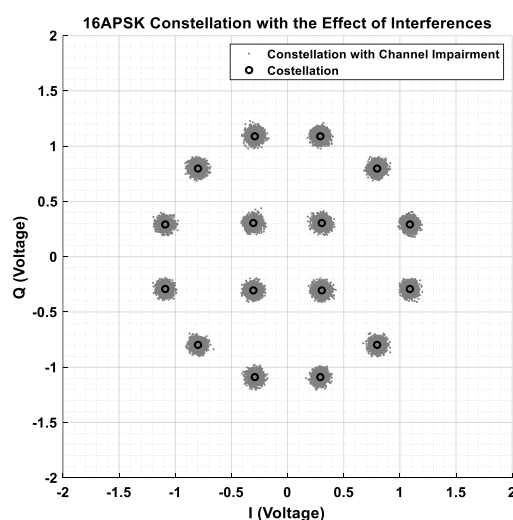


شکل (۹): اثر پاسخ فرکانسی فیلترها بر سیمبل‌های 16APSK.



شکل (۱۳): اثر فرکانس‌گزین‌اعوجاج دامنه بر سیمبل‌های 16APSK.

گیرنده زمینی، چندین مرحله تقویت و دچار تبدیل فرکانس می‌شود. لازم‌ه این فرایندها به‌کارگیری اسپیلاتورهای محلی، فیلترها و

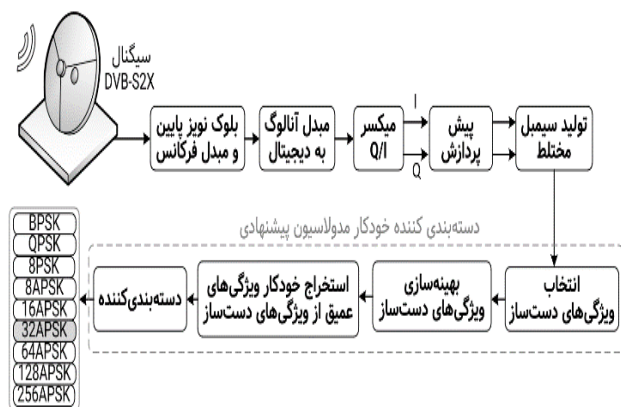


شکل (۱۰): اثر تداخل‌ها بر سیمبل‌های مدولاسیون 16APSK.

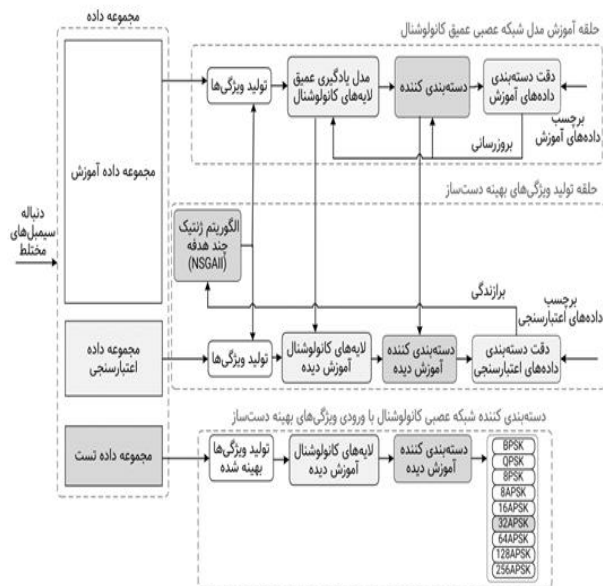
در سناریوی ماهواره‌ای اثرات سخت‌افزارها بسیار مهم‌تر است. سیگنال از ایستگاه فرستنده زمینی تا ماهواره و سپس از ماهواره تا پایانه

می‌شوند. ویژگی‌های دست‌ساز به شبکه عصبی عمیق وارد می‌شود و ویژگی‌های نهفته از ویژگی‌های دست‌ساز استخراج و سپس دسته‌بندی مبتنی بر ویژگی‌های نهفته انجام می‌شود.

شکل (۱۶) جزئیات الگوریتم تشخیص خودکار مدولاسیون را ارائه می‌کند. الگوریتم پیشنهادی چهار بخش اصلی دارد. هر یک از این بخش‌ها با قاب خط‌چین خاکستری مشخص شده‌اند. در بخش اول مجموعه داده شامل دنباله سیمبل‌های مختلط به سه قسمت داده‌های آموزش، داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های تست تقسیم می‌شوند. تعداد سیگنال‌های هر مدولاسیون جهت برقراری توازن در آموزش شبکه یکسان است.



شکل (۱۵): شمای کلی الگوریتم پیشنهادی.



شکل (۱۶): بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی

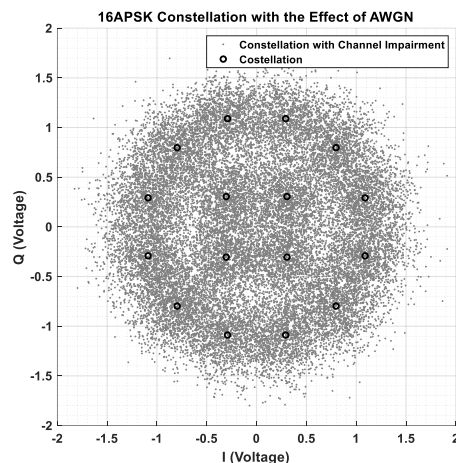
بخش دوم، حلقه آموزش مدل شبکه کانولوشنال است. در بلوک تولید ویژگی‌ها از نمونه سیمبل‌های سیگنال‌های آموزش ویژگی‌های دست‌ساز استخراج می‌شود. این ویژگی‌ها به‌عنوان ورودی برای آموزش شبکه کانولوشنال استفاده می‌شوند. در بخش سوم، حلقه تولید ویژگی‌های بهینه دست‌ساز است. از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGAI برای بهینه‌سازی ویژگی‌های دست‌ساز استفاده می‌شود. لایه‌های کانولوشنال آموزش دیده شده و دسته‌بندی کننده اتصال

تقویت‌کننده‌های متعدد است که عامل تخریب سیگنال هستند. در سناریوهای زمینی یا هوایی به دلیل به‌کارگیری مدولاسیون‌های مرتبه پایین‌تر و عدم وجود سخت‌افزار ماهواره، پایین بودن توان و فرکانس کاری، اثرات مخرب کمتر است. در این مقاله سبب مدولاسیون شامل نه مدولاسیون بخش ۲-۴ است. در این کار برای هر مرتبه مدولاسیون فقط یک منظومه مشخص مطابق مدکد استاندارد [۱] در نظر گرفته می‌شود. کانال GEO مطابق بخش ۲-۵ مدل‌سازی می‌شود. از نوآوری‌های اصلی این کار در نظر گرفتن کامل اثرات و شرایط کانال GEO مطابق استاندارد [۱] است.

به‌عنوان جمع‌بندی، در این کار تشخیص خودکار نه مدولاسیون سیگنال DVB-S2X به‌صورت خودکار و کور انجام می‌پذیرد. سیگنال دریافتی با مدولاسیون ناشناخته در پایانه گیرنده VSAT ثابت، تحت تأثیر کانال ماهواره GEO شامل نویز سفید گوسی، اثرات مخرب سخت‌افزار و تداخل‌ها قرار دارد.

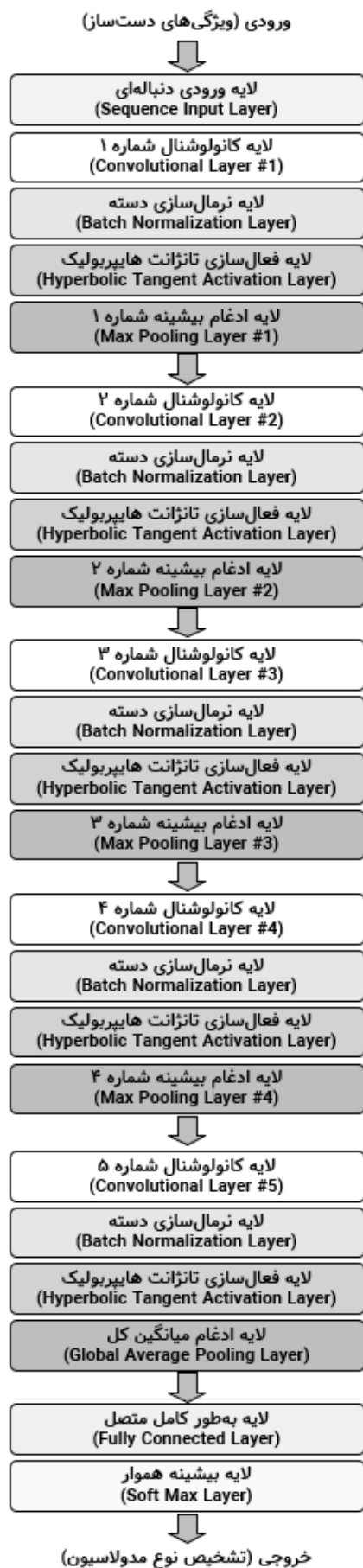
۷-۲- راهکار پیشنهادی

راهکار پیشنهادی تمرکز بر واحد تشخیص خودکار مدولاسیون دارد. شناسایی مدولاسیون‌های DVB-S2X تحت عوامل مخرب کانال ماهواره‌ای GEO بسیار چالش‌برانگیز است. در الگوریتم پیشنهادی رویکرد تشخیص مبتنی بر ویژگی‌های دست‌ساز با رویکرد تشخیص تحول‌گرا مبتنی بر یادگیری عمیق تلفیق شده است. شکل (۱۵)



شکل (۱۴): اثر نویز گوسی سفید بر سیمبل‌های مدولاسیون 16APSK.

شمای کلی پایانه گیرنده دسته‌بندی کننده مدولاسیون را نشان می‌دهد. سیگنال در باند بالا توسط آنتن دریافت می‌شود. بلوک نویز پایین وظیفه فیلترگذاری، تقویت و تبدیل به فرکانس میانی را انجام می‌دهد. بلوک میدل آنالوگ به دیجیتال سیگنال باند میانی را نمونه‌برداری می‌کند. سپس سیگنال گسسته به میکسر I/Q وارد می‌شود. واحد پیش‌پردازش، فیلترگذاری و سنکرون‌سازی‌های زمان، فاز و فرکانس را انجام می‌دهد. مؤلفه‌های هم‌فاز و ربعی، سیمبل مختلط را تشکیل می‌دهند. دنباله سیمبل‌های مختلط به‌عنوان ورودی وارد الگوریتم دسته‌بندی می‌شوند. در الگوریتم پیشنهادی ویژگی‌های دست‌ساز از دنباله سیمبل‌های مختلط انتخاب و بهینه



شکل (۱۷): معماری شبکه عصبی کانولوشنال پیشنهادی.

کامل تنظیم‌شده در بخش حلقه آموزش مدل شبکه کانولوشنال برای دسته‌بندی مجموعه داده‌های اعتبارسنجی استفاده می‌شوند. دقت دسته‌بندی مجموعه داده‌های اعتبارسنجی جهت ارزیابی کروموزوم‌های دخیل در تولید ویژگی‌های دست‌ساز به کار می‌روند. با اجرای فرایندهای بازگشتی الگوریتم ژنتیک، دو حلقه آموزش شبکه عصبی کانولوشنال و حلقه بهینه‌سازی ویژگی‌های دست‌ساز اجرا می‌شوند. با اجرای الگوریتم NSGAI به‌مرور ویژگی‌های مناسب‌تر تولید و به‌طور هم‌زمان آموزش شبکه کانولوشنال بهتر انجام می‌پذیرد. بعد از اجرای چند دور الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGAI، بهینه‌سازی ویژگی‌ها محقق می‌شود و آموزش شبکه کانولوشنال تکمیل می‌گردد. بخش چهارم، دسته‌بندی‌کننده شبکه کانولوشنال با ورودی ویژگی‌های بهینه دست‌ساز است. در این بخش مجموعه داده تست دسته‌بندی می‌شود. ویژگی‌های بهینه‌شده سیگنال تست وارد شبکه کانولوشنال آموزش‌دیده می‌شود. لایه‌های کانولوشنال ویژگی‌های نهفته را استخراج می‌کنند و مبتنی بر آن‌ها، دسته‌بندی‌کننده شبکه عصبی، مدولاسیون سیگنال‌های تست را تشخیص می‌دهد.

۱-۷-۲- شبکه عصبی کانولوشنال

به‌منظور استخراج ویژگی‌های نهفته از ویژگی‌های دست‌ساز و دسته‌بندی مدولاسیون، از شبکه عصبی عمیق کانولوشنال استفاده می‌شود. معماری شبکه عصبی کانولوشنال مطابق شکل (۱۷) طراحی شده است. رویکرد معماری شبکه کانولوشنال دریافت دنباله داده به‌عنوان ورودی است. در این کار دنباله داده، دنباله ویژگی‌های دست‌ساز است. لایه اول، ورودی دنباله‌ای است. این لایه سه دنباله متناظر با سه ویژگی دست‌ساز سیگنال‌ها را دریافت می‌کند. در این معماری پنج لایه کانولوشنال به‌کارگیری می‌شود. مشخصات تعداد فیلترهای کانولوشنال و طول آن‌ها در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مشخصات لایه‌های کانولوشنال معماری پیشنهادی.

شماره لایه	تعداد فیلتر	طول فیلتر
۱	۲۱	۱۷
۲	۴۲	۹
۳	۸۴	۵
۴	۱۶۸	۳
۵	۳۳۶	۲

بعد از هر لایه کانولوشنال، لایه نرمال‌سازی دسته قرار دارد. نرمال‌سازی دسته بر روی دسته‌های دنباله هر ویژگی انجام می‌شود و پایداری یادگیری، جلوگیری از انفجار گرادیان، بهبود تعمیم‌پذیری مدل و افزایش سرعت یادگیری را محقق می‌کند. لایه فعال‌سازی تانژانت هایپربولیک اثر غیرخطی به مدل اضافه می‌کند و مانع انفجار گرادیان می‌شود. تانژانت هایپربولیک در مقایسه با توابع فعال‌ساز دیگر گرادیان بزرگ‌تری حول صفر دارد؛ لذا یادگیری بهتر انجام می‌شود. همچنین احتمال محو شدن گرادیان پایین‌تر است. البته باتوجه به سبک بودن شبکه، احتمال محو شدن گرادیان پایین است.

کمولنت‌های رابطه (۱۰) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} C_{84} &= m_{84} - 16C_{63}C_{21} + |C_{41}|^2 \\ &\quad - 18C_{42}^2 \\ &\quad - 72C_{42}C_{21}^2 - 24C_{21}^4 \\ C_{82} &= m_{82} - 15m_{40}m_{42} - 20m_{41}^2 \\ &\quad + 30m_{40}m_{20}^2 + 60m_{40}m_{21}^2 \\ &\quad + 240m_{41}m_{21}m_{20} + 90m_{42}m_{20}^2 \\ &\quad - 90m_{20}^4 - 540m_{20}^2m_{21}^2 \\ C_{80} &= m_{80} - 35m_{40}^2 - 28m_{60}m_{20} \\ &\quad - 630m_{40}^4 + 420m_{20}^2m_{40} \\ C_{63} &= m_{63} - 9m_{21}m_{42} + 12m_{21}^3 \\ &\quad - 3m_{20}^2m_{43} \\ &\quad + 18m_{20}m_{21}m_{22} - 36m_{22}m_{41} \\ C_{62} &= m_{62} - 6m_{20}m_{42} - 8m_{21}m_{41} \\ &\quad - 30m_{22}^2m_{40} + 6m_{20}^2m_{22} \\ &\quad + 24m_{21}^2m_{22} \\ C_{61} &= m_{61} - 5m_{21}m_{40} - 10m_{20}m_{41} \\ &\quad + 30m_{20}^2m_{21} \\ C_{60} &= m_{60} - 15m_{20}m_{40} + 30m_{20}^3 \\ C_{42} &= m_{42} - m_{20}^2 - 2m_{21}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

مومن m_{pq} از سیمبل‌های r با رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$m_{pq}(r) = E[r[n]^{p-q}r^*[n]^{p-q}] \quad (12)$$

در رابطه (۱۰) توان‌های k_j هشت زن اول کروموزوم الگوریتم ژنتیک NSGAII در رابطه (۸) هستند. ویژگی‌های دوم و سوم از نوع ویژگی‌های دامنه لحظه‌ای هستند. این ویژگی‌ها به کمک رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\Gamma_k = \frac{\max |DFT(a(i)^k)|^2}{N} \quad (13)$$

در اینجا $a(i)$ دامنه لحظه‌ای سیمبل N و تعداد سیمبل‌ها هستند. ویژگی‌های $\mathcal{F}_2$ و $\mathcal{F}_3$ به ترتیب با روابط (۱۴) و (۱۵) تعریف می‌شوند.

$$\mathcal{F}_2 = \frac{\max |DFT(a(i)^{k_9})|^2}{\max |DFT(a(i)^{k_{10}})|^2} \quad (14)$$

$$\mathcal{F}_3 = \frac{\max |DFT(a(i)^{k_{11}})|^2}{\max |DFT(a(i)^{k_{12}})|^2} \quad (15)$$

در روابط (۱۴) و (۱۵) توان‌های k_j چهار زن آخر کروموزوم الگوریتم ژنتیک NSGAII در رابطه (۸) هستند. در صورتی که در جواب نهایی مقدار زن در الگوریتم ژنتیک صفر به دست آید، ویژگی اولیه متناظر، به طور خودکار حذف می‌گردد.

دامنه لحظه‌ای $a(i)$ و کمولنت‌های رابطه (۱۰) از سیگنال ورودی استخراج می‌شوند. مقدار کروموزوم k رابطه (۸) توسط الگوریتم NSGAII تولید می‌گردد. سپس عناصر بردار ویژگی رابطه (۹) با کمک روابط (۱۰)، (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند. با به کارگیری بردارهای ویژگی متناظر با هر کروموزوم در حلقه تولید ویژگی‌های بهینه و حلقه آموزش شبکه عصبی مطابق الگوریتم پیشنهادی، بردار ویژگی بهینه به دست می‌آید.

بعد از هر لایه فعال سازی، لایه ادغام پیشینه اعمال می‌شود. البته در بلوک آخر لایه ادغام میانگین کل جایگزین لایه ادغام پیشینه می‌شود. به کارگیری لایه ادغام موجب کاهش طول ویژگی‌ها و پارامترهای یادگیری و در نتیجه کاهش محاسبات می‌شود. همچنین به حل مشکل بیش برآزش کمک می‌کند. طول ادغام در لایه‌های ادغام پیشینه در جدول (۳) آمده است. لایه‌های به طور کامل متصل و پیشینه هموار وظیفه ادغام ویژگی‌ها و در نهایت دسته‌بندی مدولاسیون را انجام می‌دهند. تعداد گره‌های لایه اتصال کامل مساوی تعداد نوع مدولاسیون‌ها یعنی نه عدد است.

جدول (۳): طول لایه‌های ادغام پیشینه.

شماره لایه	طول ادغام
۱	۹
۲	۵
۳	۳
۴	۲

۲-۷-۲- الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGAII

از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGAII برای تولید ویژگی‌های بهینه استفاده می‌شود. در حالت طبیعی دقت مدولاسیون‌ها می‌تواند متناقض باشد. یعنی می‌توان ویژگی تولید کرد که دقت تشخیص را در یک مدولاسیون افزایش دهد، ولی دقت تشخیص در مدولاسیون دیگر کاهش یابد؛ بنابراین متناقض بودن توابع هدف امکان به کارگیری بهینه‌سازی چندهدفه NSGAII را فراهم می‌کند [۲۲]. در این مسئله بردار برازندگی به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} Fitness \\ = [AV_{BPSK} \quad AV_{QPSK} \quad AV_{8PSK} \quad AV_{8APSK} \\ AV_{16APSK} \quad AV_{32APSK} \quad AV_{64A} \\ AV_{128APSK} \quad AV_{256APSK}] \end{aligned} \quad (7)$$

در اینجا AV_m دقت تشخیص مدولاسیون مجموعه داده اعتبارسنجی برای مدولاسیون m است. کروموزوم با دوازده زن مطابق رابطه (۸) تعریف شد. زن‌ها از نوع اعداد صحیح هستند.

$$\begin{aligned} k \\ = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6 \quad k_7 \quad k_8 \quad k_9 \quad k_{10} \quad k_{11} \quad k_{12}] \\ k_j \in \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (8)$$

در اینجا k نشان‌دهنده کروموزوم و k_j نشان‌دهنده زن j ام است.

۲-۷-۳- ویژگی‌های دست‌ساز

بردار ویژگی‌های دست‌ساز شامل سه ویژگی است. بردار ویژگی دست‌ساز $\mathcal{F}$ به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$\mathcal{F} = [\mathcal{F}_1 \quad \mathcal{F}_2 \quad \mathcal{F}_3] \quad (9)$$

$\mathcal{F}_1$ ایده جدید سوپر ویژگی آماری شامل ترکیب ضربی توانی دامنه هشت کمولنت است و مطابق رابطه (۱۰) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_1 \\ = |C_{84}|^{k_1} \cdot |C_{82}|^{k_2} \cdot |C_{80}|^{k_3} \cdot |C_{63}|^{k_4} \cdot |C_{62}|^{k_5} \\ \cdot |C_{61}|^{k_6} \cdot |C_{60}|^{k_7} \cdot |C_{42}|^{k_8} \end{aligned} \quad (10)$$

۲-۷-۴- شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی

ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، با شبیه سازی در نرم افزار متلب انجام شد. الگوریتم برای صدبار تکرار و نتایج از متوسط گیری به دست آمده است. در هر بار تکرار مجموعه داده جدید به صورت تصادفی تولید شد. سیمبل ها برای نه مدولاسیون مطابق شکل (۳) تولید شدند. ۸۰٪ سیگنال ها به عنوان داده آموزش، ۱۰٪ به عنوان داده اعتبارسنجی و ۱۰٪ به عنوان داده تست لحاظ شدند. مقادیر مدل تداخل های شکل (۷) در جدول (۴)، پارامترهای الگوریتم NSGAI در جدول (۵) و دیگر پارامترهای شبکه عصبی کانولوشنال در جدول (۶) آمده است.

جدول (۵): پارامترهای الگوریتم ژنتیک NSGAI.

پارامتر	مقدار
تعداد توابع هدف	۹
تعداد جمعیت	۱۰۰
تعداد ژن در هر کروموزوم	۱۲
روش انتخاب والدین	تصادفی
درصد ترکیب	۸۰
نوع عملگر ترکیب	پنج نقطه ای
درصد جهش	۱۰
تعداد نخبان	۱۰
نرخ جهش	۱
نوع مقادیر ژن	اعداد صحیح
محدوده مقدار ژن	۹- تا ۹

سیمبل های تولید شده مطابق مدکد هر مدولاسیون استاندارد DVB-S2X با همان مقادیر سیمبل ها است. در شبیه سازی مراحل تولید داده از منظومه هایی استفاده می شود که بر اساس استاندارد قبل از آن اثرات کدینگ لحاظ شده است؛ به عبارت دیگر مدکدهای مختلف در آن مستتر است. لازم به ذکر است، بسته به نوع کدینگ در بعضی مدولاسیون ها چند نوع منظومه برای هر مدولاسیون در [۱۹]

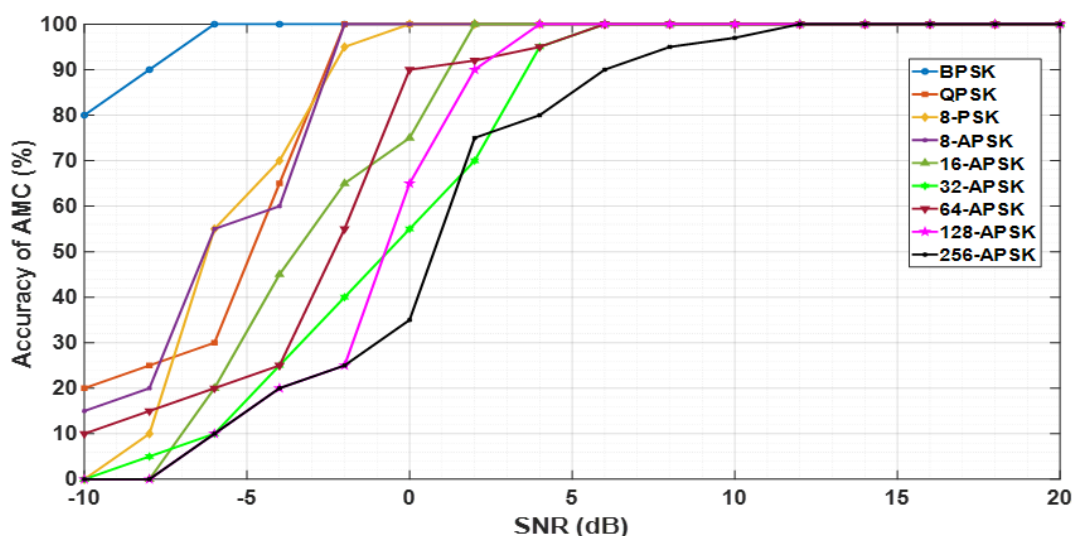
تعریف شده است؛ اما در این تحقیق فرض شده فقط یک منظومه مشخص از هر مدولاسیون در سبد مدولاسیون های هدف وجود دارد. می توان در کارهای آتی فرض تحقیق را تغییر داد و برای هر مدولاسیون چندین منظومه در نظر گرفت.

جدول (۶): پارامترهای شبکه عصبی کانولوشنال.

پارامتر	مقدار
نوع ورودی	دنباله ویژگی های دست ساز
الگوریتم پس انتشار	گرادیان نزولی تصادفی مومنت
نرخ یادگیری اولیه	۰/۰۱
ضریب افت نرخ یادگیری	۰/۵
طول حداقل دسته	۱۶۰
حداکثر دوره	۴۰
گام جابه جایی فیلتر	۱

۳- نتایج و بحث

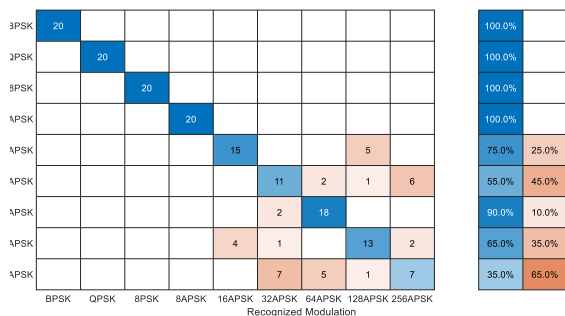
شکل (۱۸) درصد دقت تشخیص هر مدولاسیون بر حسب سیگنال به نویز در کانال GEO را نشان می دهد. شکل (۱۸) با تعداد ۲۰۰ سیگنال برای هر مدولاسیون، ۴۰۹۶ سیمبل برای هر سیگنال، ۱۲ نمونه در هر سیمبل و مقدار عقب نشینی توان ورودی از اشباع dB ۱۲ به دست آمده است. محدوده سیگنال به نویز از dB -۱۰ تا dB ۲۰+ با گام dB ۲ است. با افزایش سیگنال به نویز دقت تشخیص همه مدولاسیون ها افزایش می یابد. شکل (۱۹) ماتریس درهم ریختگی را برای سیگنال به نویز dB ۰ نشان می دهد. در سیگنال به نویز کم الگوریتم پیشنهادی به خوبی و با دقت ۱۰۰٪ مدولاسیون های مرتبه پایین تر را تشخیص می دهد. مدولاسیون های 32APSK و 256APSK سخت ترین تشخیص را دارند و دارای بیشترین تشخیص اشتباه با همدیگر هستند و مدولاسیون های 64APSK و 128APSK به ترتیب در رتبه های بعدی قرار دارند.



شکل (۱۸): دقت تشخیص هر مدولاسیون نسبت به سیگنال به نویز برای الگوریتم پیشنهادی در کانال GEO.

[۱۷] است. روش های [۱۶] و [۱۷] حتی در سیگنال به نویز بالا به دقت ۱۰۰٪ نمی رسند. دقت الگوریتم پیشنهادی در همه سیگنال به نویزها نسبت به روش های [۱۶] و [۱۷] به طور متوسط حدود ۱۵٪

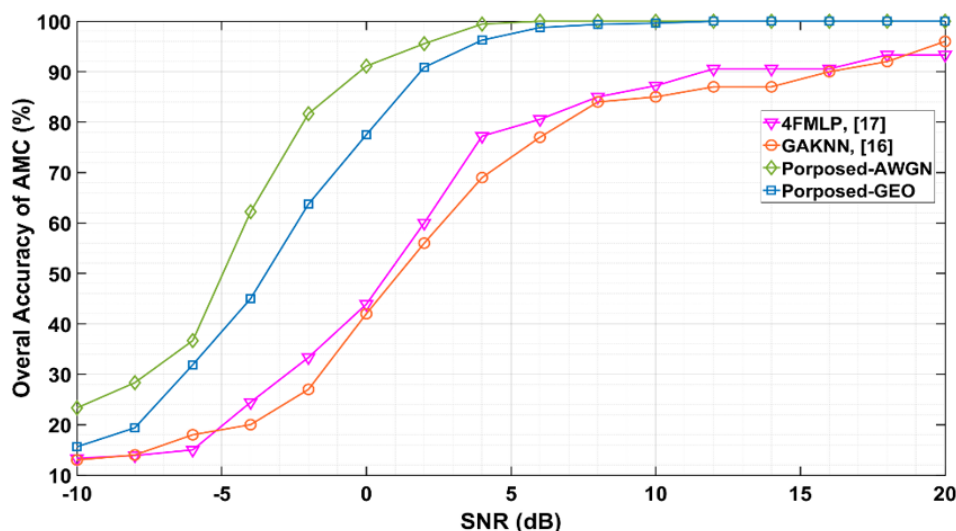
در شکل (۲۰) دقت کل الگوریتم پیشنهادی در کانال نویز گوسی و GEO با دو روش [۱۶] و [۱۷] مقایسه شده است. منحنی با نشانگر مثلث مربوط به روش [۱۶] و منحنی با نشانگر دایره مربوط به روش



شکل (۱۹): ماتریس درهم‌ریختگی در سیگنال به نویز dB

جدول (۷): درصد دقت کل الگوریتم پیشنهادی نسبت به تعداد سیگنال هر مدولاسیون (NSym=4096, NSPS=12 و IBO=12 dB)

سیگنال به نویز				تعداد سیگنال
۱۵ dB	۱۰ dB	۵ dB	۰ dB	
۱۰۰	۹۶	۹۲	۷۳	۵۰
۱۰۰	۹۸	۹۴	۷۶	۱۰۰
۱۰۰	۹۹/۶	۹۷	۷۸	۲۰۰
۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۸۱	۴۰۰



شکل (۲۰): مقایسه دقت کل تشخیص مدولاسیون نسبت به سیگنال به نویز برای الگوریتم پیشنهادی و روش‌های [۱۶] و [۱۷].

بیشتر می‌شود. پس تمایز بین ویژگی‌ها را در مدولاسیون‌های مختلف افزایش می‌یابد.

در ویژگی طیفی دامنه لحظه‌ای، افزایش تعداد سیمبل‌ها معادل با افزایش تعداد نقاط FFT است؛ بنابراین دقت و تفکیک‌پذیری سنجش حداکثر دامنه طیف افزایش می‌یابد. در این صورت تمایز این ویژگی در مدولاسیون‌های مختلف بیشتر می‌شود. همچنین کاهش دقت ناشی از عدم تولید همه سیمبل‌های مدولاسیون‌های مرتبه بالا در تعداد سیمبل کم، محتمل است.

بهتر است. الگوریتم پیشنهادی در کانال نویز گوسی سفید و سیگنال به نویز بیش از ۵ dB دقت ۱۰۰٪ دارد. در کانال GEO دقت کل الگوریتم پیشنهادی برای سیگنال به نویز بالای ۵ dB بیش از ۹۷٪ است و برای سیگنال به نویز بالای ۱۲ dB دقت کل ۱۰۰٪ می‌شود. سیگنال به نویز در نظر گرفته برای دو شبیه‌سازی کانال نویز گوسی و کانال GEO، یکسان و مطابق نویز گوسی سفید جمع‌شونده است. در سیگنال به نویز گوسی، سیمبل‌ها تحت تأثیر عوامل مخرب سخت‌افزار نیستند و فقط نویز گوسی لحاظ شده است؛ اما در کانال GEO، سیمبل‌ها تحت تأثیر عوامل مخرب سخت‌افزار و تداخل‌ها قرار می‌گیرند. جدول (۷) مقایسه دقت کل نسبت به تعداد سیگنال هر مدولاسیون برای چهار سیگنال به نویز ارائه می‌کند. با افزایش تعداد سیگنال، دقت افزایش می‌یابد. هر سیگنال معادل یک بردار ویژگی دست‌ساز است که شبکه با آن آموزش داده می‌شود. افزایش تعداد سیگنال احتمال رخداد برازش بیش‌ازحد را کاهش می‌دهد و منجر به بهبود آموزش شبکه عصبی می‌شود. بنابراین دقت تشخیص بهبود می‌یابد.

جدول (۸) مقایسه دقت کل نسبت به تعداد سیمبل‌های هر سیگنال را برای چهار سیگنال به نویز ارائه می‌کند. نتایج با فرض تعداد ۲۰۰ سیگنال برای هر مدولاسیون، تعداد ۱۲ نمونه در هر سیمبل و مقدار ۱۲ dB عقب‌نشینی سیگنال ورودی به‌دست‌آمده است. در همه سیگنال به نویزها با افزایش تعداد سیمبل‌ها دقت افزایش می‌یابد. ویژگی‌های آماری مومنت و کمولنت از میانگین‌گیری بر روی سیمبل‌ها به دست می‌آیند؛ لذا افزایش تعداد سیمبل‌های هر سیگنال باعث کاهش واریانس نویز می‌شود؛ بنابراین با افزایش تعداد سیمبل‌ها، دقت تخمین ویژگی‌های آماری افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات ویژگی‌ها در سیگنال‌های مختلف یک نوع مدولاسیون، کاهش می‌یابد و حداقل فاصله ویژگی‌ها در مدولاسیون‌های مختلف

جدول (۸): درصد دقت کل تشخیص مدولاسیون نسبت به تعداد سیمبل هر سیگنال (NSPS=12, NSig=200, IBO=12 dB).

تعداد سیمبل	سیگنال به نویز			
	۱۵ dB	۱۰ dB	۵ dB	۰ dB
۵۱۲	۹۵	۸۸	۷۲	۵۶
۱۰۲۴	۹۷	۹۴	۸۴	۶۶
۲۰۴۸	۱۰۰	۹۹	۸۸	۶۹
۴۰۹۶	۱۰۰	۹۹/۶	۹۷	۷۸

جدول (۹) درصد دقت تشخیص هر مدولاسیون را برای سه مقدار عقب‌نشینی توان سیگنال ورودی نشان می‌دهد. با افزایش مقدار عقب‌نشینی توان سیگنال ورودی از اشباع، دقت تشخیص مدولاسیون افزایش می‌یابد. مشخصات AM/AM و AM/PM بسته به مقدار عقب‌نشینی توان ورودی، منظومه را نسبت به حالت استاندارد تغییر می‌دهد. منظومه را فشرده و سیمبل‌ها را به هم نزدیک می‌کند. همچنین موجب چرخش ناهمگون منظومه می‌شود. در سناریوهای ارتباطی برای مدولاسیون‌های مرتبه پایین مقدار عقب‌نشینی ۳dB تا ۶ dB لحاظ می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی در این مقدار عقب‌نشینی برای مدولاسیون‌های مرتبه پایین دقت تشخیص ۱۰۰٪ را ارائه می‌کند. کاهش مقدار عقب‌نشینی بیشترین کاهش را بر دقت تشخیص مدولاسیون‌های 64APSK و 128APSK دارد و به سمت مقدار بهینه عقب‌نشینی در 256APSK نسبت به QPSK حدود ۹ dB بیشتر است.

جدول (۱۰) مقدار موردنیاز سیگنال به نویز برای سناریوهای ارتباطی و تشخیص مدولاسیون پیشنهادی را مقایسه کرده است. مقدار سیگنال به نویز سناریوی ارتباطی در استاندارد [۲۱] برای رسیدن به نرخ خطای فریم ۵-۱۰ در حالت ایدئال و واقعی اعلام‌شده است. باتوجه به نرخ کدینگ میانگین سیگنال به نویز نوشته شده است. مقدار سیگنال به نویز موردنیاز در سناریوی ایدئال و واقعی ارتباطی، بیشتر از مقدار سیگنال به نویز برای دستیابی به دقت تشخیص ۱۰۰٪ در هر مدولاسیون است.

جدول (۹): درصد دقت هر مدولاسیون نسبت به عقب‌نشینی توان ورودی (SNR=10 dB, NSPS=12, NSig=200, NSym=4096).

نوع مدولاسیون	مقدار عقب‌نشینی توان ورودی			
	۱۵ dB	۱۲ dB	۶ dB	۳ dB
BPSK	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
QPSK	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
8PSK	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
8APSK	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
16APSK	۱۰۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰
32APSK	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
64APSK	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	۷۰
128APSK	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۵
256APSK	۱۰۰	۹۷	۶۵	۹۵

جدول (۱۰): مقایسه سیگنال به نویز ارتباطات و دقت ۱۰۰٪
(NSPS=12, NSig=200, NSym=4096, FER=10-5)
(IBO=12dB)

نوع مدولاسیون	سیگنال به نویز		
	ارتباطی ایدئال	ارتباطی واقعی	دقت ۱۰۰٪
BPSK	-۵ dB	-۳ dB	-۶ dB
QPSK	-۱ dB	۱/۵ dB	-۲ dB
8PSK	۷ dB	۱۰ dB	۰ dB
8APSK	۵ dB	۷/۵ dB	-۲ dB
16APSK	۹ dB	۱۳/۵ dB	۲ dB
32APSK	۱۲ dB	۱۶/۵ dB	۶ dB
64APSK	۱۵ dB	۲۰ dB	۶ dB
128APSK	۱۸ dB	۲۴ dB	۴ dB
256APSK	۱۹ dB	۲۵/۵ dB	۱۲ dB

۴- نتیجه‌گیری

تا قبل از این، تحقیق جامعی در تشخیص خودکار مدولاسیون‌های DVB-S2X انجام نشده بود. برای اولین بار در این تحقیق، سبب مدولاسیون شامل همه نه مدولاسیون شبیه به هم و تودرتو PSK و APSK سیگنال DVB-S2X بود و همه عوامل محیطی و سخت‌افزاری کانال GEO لحاظ شد. مدل‌سازی همه شرایط کانال شامل تداخل‌ها و اثرات غیرخطی سخت‌افزار از نوآوری‌های اصلی این تحقیق بود. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با شبیه‌سازی و مقایسه با دو روش دیگر ارزیابی شد. الگوریتم پیشنهادی با به‌کارگیری هم‌زمان رویکردهای مرسوم و تحول‌گرا از مزیت‌های هر دو رویکرد استفاده کرد. رویکرد مرسوم شامل استفاده از ویژگی‌های دست‌ساز و الگوریتم ژنتیک چندهدفه بود. بردار ویژگی‌ها شامل دو عنصر از نوع ویژگی دامنه لحظه‌ای و یک ویژگی آماری بود؛ لذا تعداد ویژگی‌ها نسبت به کارهای مشابه کم شده است. ویژگی‌های دامنه لحظه‌ای برای تشخیص مدولاسیون‌های APSK و ویژگی آماری برای تشخیص مدولاسیون‌های PSK عملکرد بهتری دارند. استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGAI در حلقه شبکه عصبی ساختار یکپارچه‌ای ایجاد کرد که به‌موجب آن بیشترین سازگاری بین تابع هزینه شبکه عصبی و تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک ایجاد شد و همچنین بیشترین انطباق در ورودی داده شبکه عصبی عمیق و ورودی داده الگوریتم ژنتیک چندهدفه فراهم کرد. به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه دقت تشخیص هر مدولاسیون را به‌طور مجزا بهینه می‌کند و برخلاف بهینه‌سازی تک‌هدفه دقت تشخیص یک یا چند مدولاسیون نمی‌تواند تابع هدف را به‌گونه‌ای تحت تأثیر قرار دهد تا دقت تشخیص دیگر مدولاسیون‌ها در حالت زیر بهینه باشند. الگوریتم پیشنهادی با شبکه عصبی کانولوشنال، ویژگی‌های نهفته در دنباله ویژگی‌های دست‌ساز را استخراج و برای دسته‌بندی مدولاسیون استفاده می‌کند. ایده جدید استفاده از سوپر ویژگی تشکیل‌شده از

Letters, vol. 27, pp. 1135–1139, 2023. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3242690>

10) C. Xiao, S. Yang and Z. Feng, “Complex-Valued Depthwise Separable Convolutional Neural Network for Automatic Modulation Classification,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 99–108, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3298657>.

11) S. Wei, Z. Wang, Z. Sun, F. Liao, L. Zou and H. Mi, “A Family of Automatic Modulation Classification Models Based on Domain Knowledge for Various Platforms,” *Electronics*, vol. 12, pp. 1820–1847, 2023. <https://doi.org/10.3390/electronics12081820>.

12) H. Shah, A. Miry and T. M. Salman, “Automatic modulation classification based deep learning with mixed feature,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, pp. 1647–1653, 2023. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp1647-1653>.

13) T. Huynh-The, Q. V. Pham, T. V. Nguyen, T. T. Nguyen, R. Ruby, M. Zeng and D. S. Kim, “Automatic Modulation Classification: A Deep Architecture Survey,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 142950–142971, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120419>.

14) L. Li, J. Huang, Q. Cheng, H. Meng, and Z. Han, “Automatic Modulation Recognition: A Few-Shot Learning Method Based on the Capsule Network,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, pp. 474–477, 2020. <https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3034913>.

15) B. Jdid, K. Hassan, I. Dayoub, W. H. Lim, and M. Mokayef, “Machine learning Based Automatic Modulation Recognition for Wireless Communications: A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 57851–57873, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071801>.

16) Hussain, h. Alam, S. A. Ghauri, M. Ali, H. R. Sherazi, A. Akhunzada, I. Bibi and A. Gani, “Automatic Modulation Recognition Based on the Optimized Linear Combination of Higher-Order Cumulants,” *Sensors*, vol. 22, pp. 7488–7503 2022. <https://doi.org/10.3390/s22197488>.

17) Ahmed. K. Ali and E. Erçelebi, “Automatic modulation recognition of DVB-S2X standard-specific with an APSK-based neural network classifier,” *Measurement*, vol. 151, pp. 244–257, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mesurment.2019.107257>.

18) T. O’Shea, T. Roy and T. C. Clancy, “Over-the-air deep learning based radio signal classification,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process*, vol. 12, pp. 168–179, 2018. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2018.2797022>.

19) ETSI, “Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X),” <http://www.etsi.org/standard-search>, 2022.

20) M. M. Shakra, E. M. Shaheen, H. A. Bakr and M. S. Abdel-Latif, “Automatic Digital Modulation Recognition of Satellite Communication Signals,” *32nd National Radio Science Conference*, 2015.

21) ETSI, “Implementation guideline for the Second generation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X),” <http://www.etsi.org/standard-search>, 2020.

22) K. Deb, “Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms,” Wiley, 2001.

ترکیب ضربی توانی دامنه هشت کمولنت در این مقاله مطرح شد. استفاده از ویژگی‌های دست‌ساز موجب شد تا معماری شبکه بسیار ساده، سبک و درعین حال کارا شود. در سیگنال به نویز بالای ۵ dB دقت کل ۱۰۰٪ در کانال نویز سفید گوسی جمع‌شونده و دقت کل ۹۷٪ در حضور عوامل مخرب کانال عملکرد بسیار خوبی است. دقت تشخیص ۱۰۰٪ برای هر مدولاسیون در مقادیر سیگنال به نویز پایین‌تر از سیگنال به نویز استاندارد ارتباطی محقق گردید. همچنین این عملکرد با تعداد کم سیگنال آموزش به‌دست‌آمده است. برای نشان دادن قابلیت اطمینان الگوریتم و استفاده محققین از نتایج با استفاده از شبیه‌سازی تأثیر تعداد سیگنال، تعداد سیمبل و مقدار عقب‌نشینی سیگنال ورودی از اشباع بر دقت تشخیص مدولاسیون ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی در مقادیر مختلف پارامترهای ورودی، پایداری الگوریتم را نشان داد. به‌عبارت‌دیگر افزایش داده‌های ورودی به‌صورت منطقی موجب افزایش دقت تشخیص شد.

۵- مراجع

1) ETSI, “Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X),” <http://www.etsi.org/standard-search>, 2015.

2) Z. ZHU and A. K. Nandi, “Automatic Modulation Classification, Principles, Algorithms and Applications,” Univ. of Brunel, London, Jhon Wiley & Sons, 2015.

3) M. A. Abdel-Moneim, W. El-Shafai, N. Abdel-Salam, El-Sayed M. El-Rabaie and F. E. Abd El-Samie, “A survey of traditional and advanced automatic modulation classification techniques, challenges, and some novel trends,” *WILEY Journal*, vol. 34, pp. 1–36, 2021. <https://doi.org/10.1002/dac.4762>.

4) S. Ying, S. Huang, S. Chang, Z. Yang, Z. Feng and N. Guo, “A Convolutional and Transformer Based Deep Neural Network for Automatic Modulation Classification,” *China Communications*, vol. 20, pp. 135–147, 2023. <https://doi.org/10.23919/JCC.ja.2022-0580>.

5) J. Xiao and Y. Wang, “Multiscale Correlation Network Based on Deep Learning for Automatic Modulation Classification,” *IEEE Processing Letters*, vol. 30, pp. 633–637, 2023. <https://doi.org/10.1109/LSP.2023.3275912>.

6) Y. Shi, H. Xu, Y. Zhang, Z. Qi and D. Wang, “GAF-MAE: A Self-supervised Automatic Modulation Classification Method Based on Gramian Angular Field and Masked Autoencoder,” *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 10, pp. 94–106, 2023. <https://doi.org/10.1109/TCCN.2023.3318414>.

7) S. Lee, Y. Yoon, and Y. J. Jung, “Generative Adversarial Network-Based Signal Inpainting for Automatic Modulation Classification,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 50431–50446, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279022>.

8) Kumar and U. Satija, “Residual Stack-Aided Hybrid CNN-LSTM-Based Automatic Modulation Classification for Orthogonal Time-Frequency Space System,” *IEEE Communications Letters*, vol. 27, pp. 3255–3259, 2023. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3328011>.

9) R. Zhang, Y. Zhao, Z. Yin, D. Li and Z. Wu, “A Reference Signal-Aided Deep Learning Approach for Overlapped Signals Automatic Modulation Classification,” *IEEE Communications*