

Performance analysis of adaptive modulation and coding methods in the wireless telecommunication channels

H. R. Khodadadi*, S. H. Fattahhosseini, A. Golestani

*Department of Computer Engineering, Babol Branch, Islamic Azad University, Babol, Iran

(Received: 23/052021, Accepted: 13/12/2021)

ABSTRACT

The need for high-speed data transfer on one hand and the limited resources available, (especially the lack of frequency spectrum) on the other hand, are the most important challenges facing G4-standard telecommunications networks, such as WiMAX, LTE and TD-SCDMA. Several methods have been devised to improve the spectral efficiency (SE). One of these methods is adaptive modulation and coding (AMC) in which the sender selects its modulation and coding scheme (MCS) based on the channel conditions with respect to the error probability limit of a certain set. In this paper, the performance of two AMC methods with the same modulation and coding design, one with the Moore state machine method and the other with the first-order finite state Markov chain method, is simulated and the optimal state is extracted. In each of these two methods, each state is represented by a pair of regular modulation and coding rates. The designs are QPSK, 16QAM and 64QAM modulations and block codes with the rates of 1/2, 2/3 and 3/4. In the Moore-adaptive method, the modulation and coding scheme is adapted based on the average attenuation coefficient of the channel, and in the Markov-adaptive method, it is done based on the signal-to-noise ratio (SNR) of the average channel. The simulation results show that the spectral efficiency of the Moore method in comparison to the Markov-adaptive method is improved by 31.6% in the signal-to-noise ratio (SNR) range of 9 to 13.35 dB and by 7.9% in the SNR range of 13.35 to 18.6 dB, whilst in the SNR range of 18.6 to 22 decibels, the Markov method shows 52.1% spectral efficiency improvement over the Moore-adaptive method.

Keywords: : Spectrum Efficiency, channel quality index, channel attenuation coefficient, adaptive modulation and coding, bit error rate.

* Corresponding Author Email: hkhadadi@ihu.ac.ir

ارزیابی عملکرد روش‌های مدولاسیون و کدگذاری تطبیقی در کانال‌های مخابرات بی‌سیم

حمیدرضا خدادادی^{۱*}، سید حسین فتاح الحسینی^۲، علی گلستانی^۳

۱- استادیار، ۲ و ۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲)

چکیده

نیاز به انتقال داده‌های با نرخ بالا از یک طرف و محدودیت منابع در دسترس به‌خصوص کمبود طیف فرکانسی از طرف دیگر، مهم‌ترین چالش پیش روی شبکه‌های مخابراتی با استانداردهای G4، مانند LTE، WiMAX و TD-SCDMA است که منجر به ابداع روش‌هایی جهت بهبود بازدهی طیفی (SE) شده است. از جمله این روش‌ها، مدولاسیون و کدگذاری وفقی (AMC) است که در آن فرستنده، طرح مدولاسیون و کدگذاری (MCS) خود را بر اساس شرایط کانال و با رعایت محدودیت احتمال خطا از یک مجموعه معین انتخاب می‌کند. در این مقاله، عملکرد دو روش AMC با طرح مدولاسیون و کدگذاری یکسان، یکی با روش ماشین وضعیت مور و دیگری با روش زنجیره‌ی مارکوف حالت محدود مرتبه‌ی اول شبیه‌سازی شده است. نوآوری این مقاله، مقایسه و ارزیابی عملکرد این دو روش در یک محیط رایلی و استخراج حالت بهینه است. در هر یک از این دو روش، هر وضعیت با یک جفت مرتبه‌ی مدولاسیون و نرخ کدگذاری نشان داده می‌شود. طرح‌های موردنظر، مدولاسیون‌های QPSK، QAM16 و QAM64 و کدهای بلوکی با نرخ ۱/۲، ۲/۳ و ۳/۴ هستند. در روش مور وفقی، تطبیق طرح مدولاسیون و کدگذاری بر اساس ضریب تضعیف متوسط کانال انجام می‌شود و در روش مارکوف وفقی، بر اساس نسبت سیگنال به نویز (SNR) متوسط کانال انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بهره‌وری طیفی روش مور در نسبت سیگنال به نویزهای پایین از ۹ تا ۱۳،۳۵ دسی‌بل ۳۱،۶٪ و در نسبت‌های سیگنال به نویز متوسط از ۱۳،۳۵ تا ۱۸،۶ دسی‌بل ۷،۹٪ بهتر از بهره‌وری طیفی روش مارکوف وفقی است. همچنین بهره‌وری طیفی روش مارکوف در نسبت سیگنال به نویزهای بالا از ۱۸،۶ تا ۲۲ دسی‌بل ۵۲،۱٪ بهتر از بهره‌وری طیفی روش مور وفقی است.

کلیدواژه‌ها: بهره‌وری طیف، شاخص کیفیت کانال، ضریب تضعیف کانال، مدولاسیون و کدگذاری وفقی، نرخ خطای بیت

۱- مقدمه

با این حال، QAM مرتبه‌ی بالاتر احتمال نرخ خطای بیت (BER)^۵ را افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که طرح کدگذاری با نرخ کدگذاری بالاتر عموماً به معنی توانایی تصحیح کمتر است. بنابراین، عملکرد SE و QoS کانال بی‌سیم متناقض است و به یک مصالحه نیاز است. مصالحه‌ای که می‌تواند با انتخاب دقیق طرح مدولاسیون و کدگذاری حاصل شود. در سیستم‌های بی‌سیم فعلی، مکانیزم مدولاسیون و کدگذاری وفقی (AMC)^۶ به‌طور گسترده‌ای برای افزایش نرخ ارسال داده و تضمین QoS موردنیاز بر روی کانال متغیر با زمان استفاده می‌شود [۲].

مدولاسیون و کدگذاری وفقی روشی است که برای مقابله با شرایط متغیر با زمان کانال بی‌سیم از جمله محوشدگی، تداخل و نویز. این روش با تطبیق پارامترهای ارسال مانند نرخ کد و مرتبه‌ی مدولاسیون با شرایط متغیر با زمان کانال موجب افزایش بازدهی طیفی، کاهش نرخ خطای بیت و کاهش توان ارسال موردنیاز می‌شود و نقشی حیاتی در بهبود عملکرد ارتباطات بی‌سیم ایفا می‌کند [۳].

برای پشتیبانی مؤثر از خدمات چندرسانه‌ای و دسترسی به اینترنت در ارتباطات سلولی 4G و 5G تحقیقات گسترده‌ای در خصوص روش‌های وفقی به‌منظور انتقال داده از طریق کانال‌های بی‌سیم انجام شده است. نتیجه‌ی مهم این تحقیقات، ایجاد توانایی برای مقابله با تداخل بین‌سیمبلی^۱ (ISI) در ارسال باند پهن بر روی کانال‌های فیدینگ ناشی از چندمسیرگی است [۱]. امروزه با گسترش روزافزون ارتباطات بی‌سیم، کمبود منابع فرکانس رادیویی یک چالش بزرگ محسوب می‌شود. برای برآوردن سرعت بیشتر انتقال داده و نیاز به کیفیت بهتر خدمات (QoS)، سیستم ارتباطی بی‌سیم آینده به روش‌های کارآمدتری برای بهبود کارایی طیف^۳ (SE) نیاز دارد. به‌منظور بهینه‌سازی SE، اغلب مدولاسیون دامنه‌ی درجه بالا (QAM)^۴ و طرح کدگذاری با نرخ کدگذاری بیشتر برای بهبود توان کانال بی‌سیم استفاده می‌شود.

* رایانامه نویسنده مسئول: samsami@ausmt.ac.ir

¹ Intersymbol-Interference

² Quality of Service

³ Spectrum Efficiency

⁴ Quadrature amplitude modulation

⁵ Bit Error Rate

⁶ Adaptive Modulation and Coding

جین مینگ و یانگ [۸]، موضوع انتخاب نرخ کدگذاری کانال و منظومه‌ی مدولاسیون^۳ را در کدگذاری وقتی برای سیستم‌های MIMO مورد توجه قرار داده‌اند. بر اساس نتایج تئوری اطلاعات در تجزیه و تحلیل طول بلوک محدود ظرفیت کانال، یک قانون انتخاب جدید برای سیستم‌های MIMO باند باریک پیشنهاد کرده‌اند و بیشتر به سیستم‌های OFDM MIMO پهن باند روی کانال‌های تحت محوشدگی مبتنی بر انتخاب فرکانس توسعه داده می‌شود. هنگامی که به سیستم‌های LTE اعمال می‌شود؛ قانون انتخاب پیشنهاد شده عملکرد بهتری را در مقایسه با قوانین موجود در گزارش‌ها ارائه می‌دهد.

رابرت دانلیز و همکارانش [۹]، یک چارچوب جدید از یادگیری ماشین پیشنهاد کرده‌اند که از مشاهدات گذشته‌ی نرخ خطا و اطلاعات وضعیت کانال برای پیش‌بینی بهترین مرتبه‌ی مدولاسیون و نرخ کدگذاری برای درک جدید از وضعیت کانال بدون مدل‌سازی روابط ورودی - خروجی فرستنده گیرنده بی‌سیم استفاده می‌شود.

رومانو فانتاچی و همکارانش [۱۰]، استفاده از طرح‌های مدولاسیون و کدگذاری وقتی در سیستم مبتنی بر OFDMA را مورد بحث قرار داده‌اند. به‌طور خاص، با توجه به رفتار کانال از لحاظ تضعیف و نرخ خطای فریم، دو رویکرد پیشنهاد شده است: اولین رویکرد، مناسب‌ترین طرح مدولاسیون و کدگذاری را بر اساس تخمین تضعیف کانال در لینک فراسو انتخاب می‌کند. این روش بر اساس دو الگوریتم مختلف انجام شده است: یکی با نرخ خطای بلوکی موردنظر (TBLER)، باهدف حفظ نرخ خطا تحت یک مقدار خاص و استفاده از طرح مدولاسیون و کدگذاری که بالاترین کارایی را با توجه به هدف خطا تضمین می‌کند و حداکثر گذردهی (MT) که، برعکس، با هدف حداکثر رساندن گذردهی سیستم بدون کنترل عملکرد نرخ خطا است.

در این مقاله عملکرد دو روش AMC با MCS یکسان، یکی با روش ماشین وضعیت مور و دیگری با روش زنجیره‌ی مارکوف حالت محدود مرتبه‌ی اول با رویکرد بهبود QoS و نگاه داشتن احتمال خطا در زیر یک آستانه‌ی مشخص مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در روش اول، تأثیر کانال بی‌سیم از نظر تضعیف کانال به دلیل محوشدگی ناشی از چندمسیرگی و در روش دوم تأثیر کانال بی‌سیم از نظر SNR کانال در نظر گرفته می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم مارکوف در SNRهای بالا و الگوریتم مور در SNRهای پایین، ضمن حفظ الزامات BER، بهره‌وری طیفی بهتری نسبت به یکدیگر دارند.

اولین AMC در شبکه HSDPA برای جایگزینی کنترل توان به‌طور سنتی در CDMA توسعه یافته است [۴].

رانگ زنگ و همکارانش [۵]، طرحی جدید از پیش‌بینی شاخص کیفیت کانال (CQI) برای مدولاسیون و کدگذاری وقتی در محیط‌های با تحرک و سرعت بالا پیشنهاد کرده‌اند که در آن برای بهبود دقت تخمین الگوریتم مربوط به پیش‌بینی کانال از بانک فیلتر WSS^۱ با افزایش همبستگی کانال‌های بی‌سیم در هر زیر فضای متعامد استفاده می‌شود.

به کمک یک آرایه‌ی آنتن با مقیاس بزرگ، طرح جدید مدولاسیون و کدگذاری وقتی مبتنی بر فاصله برای ارتباطات هوایی از سوی ژانگ و همکارانش [۶] ارائه شده است. برخلاف طرح مدولاسیون و کدگذاری وقتی مبتنی بر نسبت سیگنال به نویز لحظه‌ای زمینی که برای کاربردهای ارتباط هوایی قابل استفاده نیست؛ طرح پیشنهادی مدولاسیون و کدگذاری وقتی مبتنی بر فاصله، حالت کدگذاری و مدولاسیون خود را با توجه به فاصله بین هواپیمای ارتباطی موردنظر تغییر می‌دهد.

تمالو و همکارانش [۳]، یک کدگذاری و مدولاسیون وقتی مبتنی بر منطق فازی-عصبی برای بهبود عملکرد در سیستم‌های بی‌سیم OFDM پیشنهاد کرده‌اند که با سایر مدل‌ها و روش‌ها مقایسه شده است. مقایسه‌ی عملکرد بهره‌وری طیفی در برابر نسبت سیگنال به نویز انجام شده است.

یک چارچوب کلی برای تحلیل گذردهی مربوط به طرح بهینه تطبیق لینک برای یک سیستم OFDM از سوی جابین فرانیسیس و مهتا [۷] ایجاد شده است که در آن بسته‌ها از طریق چندین زیرحامل که بهره‌های مختلفی را می‌بینند، ارسال می‌شوند. EESM^۲ به‌عنوان معیار کیفیت لینک برای مدولاسیون و کدگذاری وقتی استفاده می‌شود. در این مقاله به این نکته پی برده می‌شود که EESM، به لحاظ توزیع بتا برای طیف وسیعی از همبستگی‌های زیرحامل و برای انواع چندگانگی آنتن به‌خوبی مدل شده است. برای یک لینک نقطه‌به‌نقطه، این معیار به یک حد بالای محکم و یک تقریب دقیق برای گذردهی منجر می‌شود. سپس رابطه‌ی گذردهی شکل بسته را برای سناریوی چند سلولی، چندکاربره توسعه می‌دهد که در آن چندگانگی چندکاربره با یک زمان‌بندی حوزه‌ی فرکانس استفاده می‌شود. تداخل هم‌کانال نیز مدل شده است و سه زمان‌بندی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

^۱ Wave Number Spectrum Segmentation Filters' Bank

^۲ Exponential Effective SNR Mapping

^۳ Constellation Modulation

$$M(c) = 2^{r(c)} \quad (2)$$

به‌عنوان مثال در جدول (۱) طرح‌های مدولاسیون و کدگذاری متعارف در استاندارد نسل چهارم مخابرات سیار^۱ LTE آورده شده است. در این مقاله نیز برای شبیه‌سازی از پارامترهای این جدول استفاده می‌شود.

جدول (۱): طرح‌های مدولاسیون و کدگذاری در استاندارد LTE

ID (c)	Level	r (c) [bits/symbol]	SNR Boundary [dB]
۰	۰	۰	۰
۱	QPSK (۱/۲)	۱	۶
۲	QPSK (۳/۴)	۱,۵	۸,۵
۳	۱۶QAM (۱/۲)	۲	۱۱,۵
۴	۱۶QAM (۳/۴)	۳	۱۵
۵	۶۴QAM (۲/۳)	۴	۱۸,۵
۶	۶۴QAM (۳/۴)	۴,۵	۲۱

شکل (۲) مقاله‌ی منحنی‌های بهره‌وری طیفی مربوط به MCS‌های مختلف را در نرخ خطای بیت 10^{-6} نشان می‌دهد. با انتخاب هر مقدار \overline{SNR} MCS که حداکثر بهره‌وری طیفی را فراهم می‌کند، مشخص می‌شود. از این‌رو، کارایی انتقال افزایش یافته اما عملکرد به لحاظ نرخ خطا می‌تواند بدتر شود؛ زیرا هیچ محدودیتی در حداکثر احتمال خطای قابل قبول ارائه نمی‌شود.

در این منحنی، مرتبه‌ی مدولاسیون و نرخ کدگذاری در هر مقدار از \overline{SNR} طوری انتخاب می‌شود که بر اساس آن گذرده‌ی کل را حداکثر نماید. به‌طور مثال در $\overline{SNR} = 35dB$ بهره‌وری طرح $64QAM_{3/4}$ به میزان ۱۱٪ از طرح $16QAM_{2/3}$ بهتر است و همچنین در $\overline{SNR} = 15dB$ بهره‌وری طرح $QPSK_{3/4}$ به میزان ۳۳٪ از طرح $QPSK_{1/2}$ بهتر است. نتیجه‌ی نهایی این است که مؤثرترین طرح از نظر گذرده‌ی برای هر مقدار \overline{SNR} انتخاب می‌شود. به‌عنوان یک نتیجه، می‌توان بیان نمود که این روش بیشتر به خدماتی مانند پخش ویدئو یا خدمات VoIP اختصاص داده می‌شود که حداکثر نرخ داده‌ی قابل‌دستیابی را با یک حساسیت کمتری نسبت به احتمال خطا، درخواست می‌کنند.

ساختار مقاله به‌صورت زیر است. در بخش دوم، مدل سیستم AMC به‌طور کلی شرح داده خواهد شد. در بخش سوم، عملکرد دو روش AMC با MCS یکسان، یکی با روش ماشین وضعیت مور و دیگری با روش زنجیره‌ی مارکوف حالت محدود مرتبه‌ی اول مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در بخش چهارم نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری با مقایسه‌ی رفتار روش‌های فوقی نشان داده می‌شود و سرانجام در بخش پنجم نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲- مدل سیستم

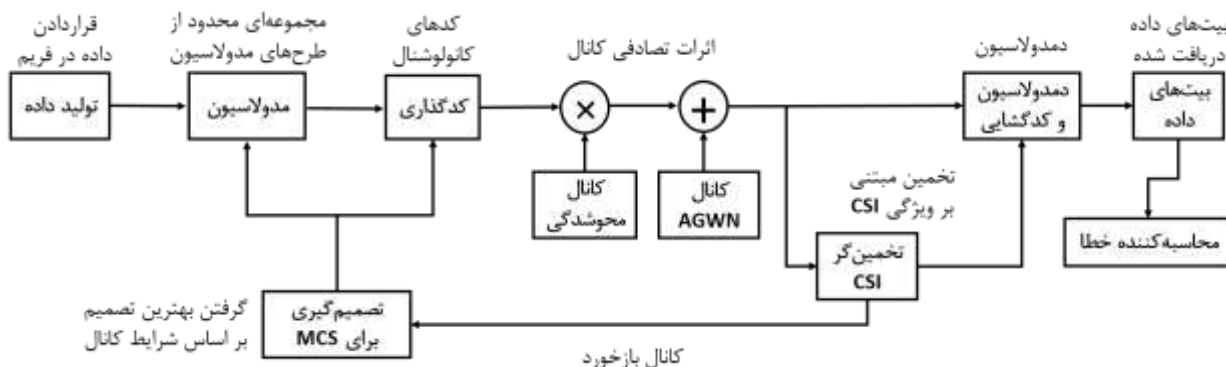
با استفاده از سیستم AMC، نرخ کدگذاری و مرتبه‌ی مدولاسیون در فرستنده بر اساس شرایط کانال متغیر با زمان بی‌سیم به‌منظور بهبود میانگین بهره‌وری طیفی، تغییر می‌کند. شکل (۱) معماری سیستم AMC را نشان می‌دهد. در این سیستم وضعیت کانال متغیر با زمان که می‌تواند میزان گذرده‌ی و یا نرخ خطای بیت دریافت شده باشد، در گیرنده تخمین زده می‌شود و در قالب یک CQI برای فرستنده از طریق کانال بازخورد ارسال می‌شود.

اطلاعات وضعیت کانال از شاخص کیفیت کانال بازیابی می‌شود. این اطلاعات به فرستنده کمک خواهد کرد تا بر اساس روش فوقی به‌کاررفته در سیستم AMC که در این مقاله می‌تواند روش مور یا روش مارکوف باشد، بهترین مدولاسیون و کدگذاری را برای حداکثر کردن بهره‌وری طیفی و گذرده‌ی سیستم از مجموعه MCS‌ها انتخاب نماید. برای آگاهی از مشخصات الگوریتم به‌کاررفته از جمله انتخاب مدولاسیون و کدگذاری بهینه برای هر وضعیت، مکانیزم‌های سیگنالینگ بین فرستنده و گیرنده به‌صورت دوره‌ای، لازم است. این امر گیرنده را قادر می‌سازد از مجموعه طرح‌های مدولاسیون به‌کاررفته برای بازیابی سیگنال مدوله‌شده استفاده کند. در پایان هر ارسال موفق، بازخورد وضعیت لحظه‌ای کانال گیرنده به‌روزرسانی و مجدداً به فرستنده ارسال می‌شود. در این مقاله کانال متغیر با زمان، کانال رایلی با محوشدگی تخت است که کیفیت آن بر اساس پارامتر BER مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نرخ خطای متوسط سیمبل به‌وسیله‌ی رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$p_M(c, \gamma) = 1 - \left[1 - 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M(c)}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3}{M(c)-1}} \gamma \right) \right]^2 \quad (1)$$

γ یا همان نسبت سیگنال به نویز است و c شناسه‌ی مربوط به طرح کدگذاری و مدولاسیون M(c)-ary را نشان می‌دهد.

^۱ Long-Term Evolution

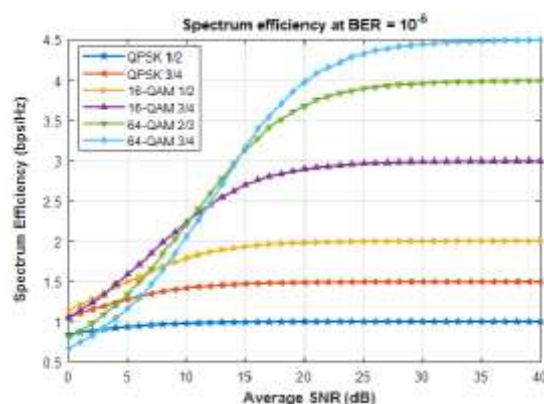


شکل (۱). معماری سیستم AMC [۱۲]

طرح بهینه مدولاسیون و کدگذاری را متناسب با شرایط کانال تطبیق می‌دهد. در این روش به منظور تعیین طرح مدولاسیون و کدگذاری جهت استفاده در ارسال بعدی، ضریب تضعیف متوسط واقعی کانال (α) در یک اسلات با آستانه‌های مناسب مقایسه می‌شود. شکل (۳) مقاله‌ی ماشین وضعیت مور را برای پنج سطح آستانه با حروف A, B, C, D و E نشان می‌دهد که در آن A پایین‌ترین مقدار آستانه است، یعنی $E < D < C < B < A$. الگوریتم مورد استفاده در این روش بر اساس ضریب تضعیف کانال با هر یک از سه مقدار مشخص BER عمل می‌کند. این الگوریتم وفقی اساساً با پنج سطح آستانه مشخص می‌شود. MCS تا زمانی که ضریب تضعیف کانال به‌عنوان پارامتر اندازه‌گیری شده به یک سطح آستانه نرسد، در حالت قبل باقی می‌ماند. به محض رسیدن به سطح آستانه، ماشین وضعیت وارد یک وضعیت جدید می‌شود و در نتیجه یک MCS متفاوت استفاده می‌شود.

چگونگی به‌دست‌آوردن مقادیر آستانه‌ها در الگوریتم فوق حائز اهمیت است؛ چرا که مقادیر آن‌ها به‌شدت در رفتار الگوریتم وفقی و سنجش عملکرد سیستم تأثیرگذار است. از این‌رو، می‌توان گفت که روش مور وفقی با انتخاب آستانه‌های مناسب برای تغییر وضعیت می‌تواند با نیازهای متنوع کاربر سازگار شود. آستانه‌ها را می‌توان با مقایسه BER طرح‌های انتقال در نظر گرفت.

هدف از الگوریتم TBER، انتخاب مرتبه‌ی مدولاسیون و نرخ کدگذاری برای هر ارسال در هر \overline{SNR} است. به‌طوری‌که بهره‌وری طیفی کل را با حفظ یک مقدار مشخص برای BER آن‌هم به دلیل حفظ QoS و یکپارچگی داده، حداکثر می‌کند. ویژگی اصلی الگوریتم TBER این است که میزان خطا را به‌منظور تضمین سطح ثابتی از QoS در زیر حد معینی نگه دارد. بنابراین این الگوریتم برای خدماتی که ملزم به رعایت دقیق حداکثر نرخ خطای خاصی هستند، مناسب است. این روش یک درجه‌ی آزادی دارد که با BER تخمیلی هدف مشخص می‌شود.

شکل (۲): بهره‌وری طیف طرح‌های مختلف مدولاسیون و کدگذاری در نرخ خطای بیت 10^{-6}

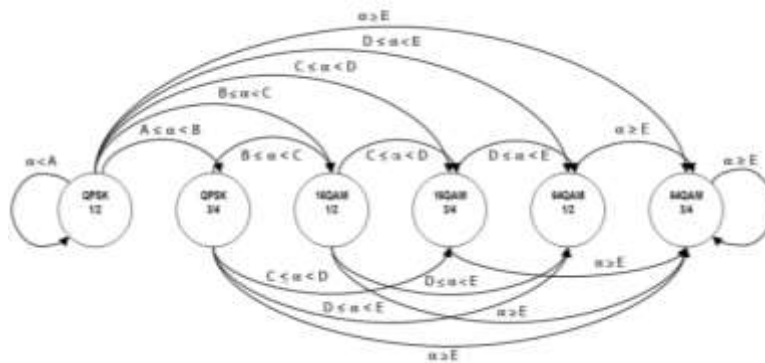
۳- سیستم AMC

در این بخش، عملکرد دو روش AMC با طرح مدولاسیون و کدگذاری یکسان، یکی با روش ماشین وضعیت مور و دیگری با روش زنجیره‌ی مارکوف حالت محدود مرتبه‌ی اول مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نوآوری این مقاله، مقایسه و ارزیابی عملکرد این دو روش در یک محیط رایلی و استخراج حالت بهینه است. در هر یک از این دو روش، هر وضعیت با یک جفت مرتبه‌ی مدولاسیون و نرخ کدگذاری نشان داده می‌شود. طرح‌های موردنظر، مدولاسیون‌های QPSK، ۱۶QAM و ۶۴QAM و نرخ کدگذاری کانال ۱/۲، ۲/۳ و ۳/۴ در نظر گرفته شده است.

۳-۱- روش مور وفقی

در این روش سیستم AMC به‌عنوان یک ماشین وضعیت مور مدل‌سازی می‌شود و در آن هر وضعیتی با یک جفت از یک مرتبه‌ی مدولاسیون و یک نرخ کدگذاری نشان داده می‌شود. روش مور در سیستم AMC بر اساس ضریب تضعیف کانال عمل می‌کند.

به عبارتی بعد از تخمین رفتار کانال به لحاظ ضریب تضعیف با یک BER مشخص و ارسال بازخورد آن به فرستنده، این روش

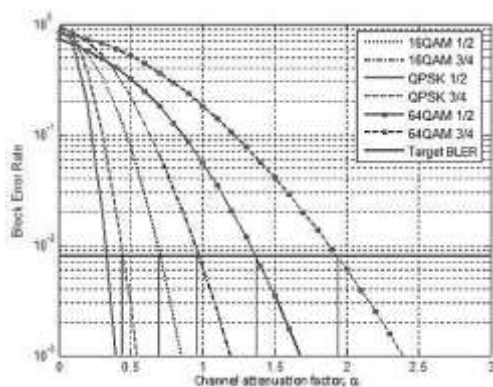


شکل (۳). ماشین وضعیت Moore بر اساس ضریب تضعیف کانال [۱۰]

شکل (۵) رفتارهای نرخ خطای بیت را بر حسب تابعی از α در مقاله [۱۰] نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که چگونه آستانه‌ها با فرض مقدار SNR برابر با ۱۶ dB و برای نرخ خطای هدف (BER_{target}) برابر با 10^{-4} تعیین می‌شوند. هر زمان که محیط انتشار متفاوتی در نظر گرفته شود، به دلیل عملکرد متفاوت از نظر نرخ خطای بیت، مقادیر آستانه نیز مقادیر مختلفی دارند.

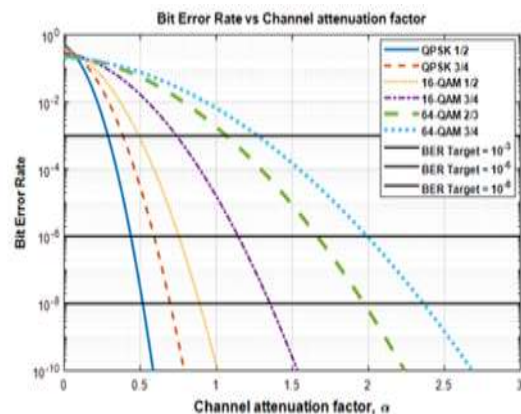
جدول (۲): مقادیر آستانه برای ضریب تضعیف کانال در BERهای مختلف با روش مور وقتی

ID	MCSs	attenuation Channel (Moore) Boundary		
		BER= 10^{-3}	BER= 10^{-6}	BER= 10^{-9}
۱	QPSK (۱/۲)	۰٫۲۹	۰٫۴۴	۰٫۵۲
۲	QPSK (۳/۴)	۰٫۳۹	۰٫۵۹	۰٫۷
۳	۱۶QAM (۱/۲)	۰٫۴۹	۰٫۷۵	۰٫۸۹
۴	۱۶QAM (۳/۴)	۰٫۷۴	۱٫۱۴	۱٫۳۵
۵	۶۴QAM (۲/۳)	۱٫۰۶	۱٫۶۶	۱٫۹۷
۶	۶۴QAM (۳/۴)	۱٫۲۷	۱٫۹۹	۲٫۳۶



شکل (۵): منحنی نرخ خطای بیت در طرح‌های مختلف مدولاسیون و کدگذاری بر حسب تابعی از ضریب تضعیف کانال [۱۰]

مقادیر مختلف BER هدف با عملکرد مختلف سیستم مطابقت می‌کند. برای هر مقدار SNR می‌توان BER را به‌عنوان تابعی از α استخراج کرد. در نتیجه، می‌توان ۵ مقدار آستانه برای α تعریف نمود که انتقال حالت برای فرآیند AMC اتفاق بیفتد. این مقادیر آستانه، BER هدف را برای یک SNR خاص و یک MCS خاص تضمین می‌کند. آستانه‌ها را می‌توان با استفاده از نمودار منحنی‌های BER هر کدام از طرح‌های مدولاسیون و کدگذاری بر اساس ضریب تضعیف α در یک BER مشخص به‌دست آورد. شکل (۴) مقاله رفتارهای BER را بر حسب تابعی از α نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که چگونه آستانه‌ها با فرض مقدار SNR برابر با ۱۶ dB و برای BER_{target} برابر با 10^{-3} ، 10^{-6} و 10^{-9} تعیین می‌شوند. هر زمان که محیط انتشار متفاوتی در نظر گرفته شود، به دلیل عملکرد متفاوت از نظر BER، مقادیر آستانه نیز مقادیر مختلفی دارند.



شکل (۴): منحنی نرخ خطای بیت برای طرح‌های مختلف مدولاسیون و کدگذاری بر حسب تابعی از ضریب تضعیف کانال

جدول (۲) مقاله‌ی مقادیر آستانه برای ضریب تضعیف کانال در BERهای مختلف را برای هر کدام از طرح‌های AMC با روش مور وقتی نشان می‌دهد که از طریق شبیه‌سازی به دست آمده است.

$$B = \begin{cases} b_0 = -\infty \text{dB} \\ b_1 = 0 \text{dB} \\ b_j = b_{j-1} + \Delta, \forall j = 2, \dots, n \\ b_{n+1} = +\infty \text{dB} \end{cases} \quad (3)$$

احتمال ثابت برای هر حالت S_j به صورت $P(j)$ نشان داده می‌شود و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$P(j) = \frac{\Gamma(m, m_j / \bar{\gamma}) - \Gamma(m, m_{j+1} / \bar{\gamma})}{\Gamma(m)} \quad (4)$$

که $\bar{\gamma}$ ، نسبت سیگنال به نویز متوسط است، m پارامتر فیدینگ ناکامی است که اگر $m = 1$ باشد می‌توان یک کانال فیدینگ رایلی را مدل کرد. $\Gamma(\cdot)$ تابع گاما است و $\Gamma(\cdot, \cdot)$ تابع گامای ناقص بالا است.

احتمال انتقال از حالت S_j به حالت S_k برای یک کانال با محوشدگی آهسته که انتقال فقط بین حالات مجاور رخ می‌دهد، به صورت $P_{j,k}$ نشان داده می‌شود و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$P_{j,j+1} = \frac{L_{j+1}T}{P(j)}, j = 0, 1, \dots, n-1 \quad (5)$$

$$P_{j,j-1} = \frac{L_j T}{P(j)}, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$P_{j,j} = \begin{cases} 1 - P_{j,j+1} - P_{j,j-1}, j = 1, \dots, n-1 \\ 1 - P_{0,1}, j = 0 \\ 1 - P_{n,n-1}, j = n \end{cases} \quad (7)$$

که T مدت زمان یک فریم MAC است و L_j نرخ عبور سطح در کانال b_j محوشدگی ناکامی است که به صورت زیر بیان می‌شود: (نرخ عبور سطح معیاری از سرعت محوشدگی است این کمیت بیان می‌کند که چند بار محوشدگی از آستانه عبور می‌کند، معمولاً در جهت مثبت حرکت می‌کند.)

$$L_j = \sqrt{2\pi} \frac{mb_j}{\bar{\gamma}} \frac{f_d}{\Gamma(m)} \left(\frac{mb_j}{\bar{\gamma}}\right)^{m-1} \exp\left(-\frac{mb_j}{\bar{\gamma}}\right) \quad (8)$$

f_d فرکانس داپلر را نشان می‌دهد.

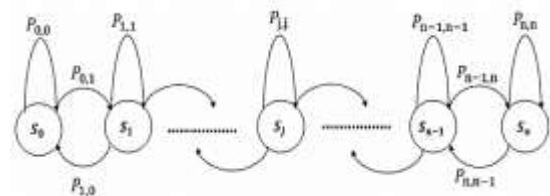
شکل (۷) رفتارهای BER را برحسب تابعی از نسبت سیگنال به نویز نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که چگونه آستانه‌ها در بازه SNR از 0 تا 30 dB و برای BER_{target} برابر با 10^{-3} ، 10^{-6} و 10^{-8} تعیین می‌شوند. هر زمان که محیط انتشار متفاوتی در نظر گرفته شود، به دلیل عملکرد متفاوت از نظر BER، مقادیر آستانه نیز مقادیر مختلفی دارند.

جدول (۳) مقاله‌ی مقادیر آستانه برای ضریب تضعیف کانال در نرخ خطای بیت 8×10^{-4} را برای هر کدام از طرح‌های AMC با روش مور وفقی در مقاله [۱۰] نشان می‌دهد.

۳-۲- روش مارکوف وفقی

در این بخش، روش زنجیره‌ی مارکوف حالت محدود مرتبه‌ی اول برای مدل‌سازی ویژگی‌های متغیر با زمان کانال فیدینگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش در ارزیابی ماهیت متغیر با زمان کانال فیدینگ و همچنین ارزیابی بهره‌وری طیف بر اساس تخمین وضعیت فعلی کانال بسیار مؤثر است.

روش مارکوف مرتبه‌ی اول با احتمال ثابت برای هر حالت و احتمال انتقال بین حالات مجاور مشخص می‌شود. شکل (۶) مقاله‌ی احتمالات مربوط به هر حالت و هر انتقال را نشان می‌دهد.



شکل (۶): مدل کانال بر اساس روش مارکوف [۱۱]

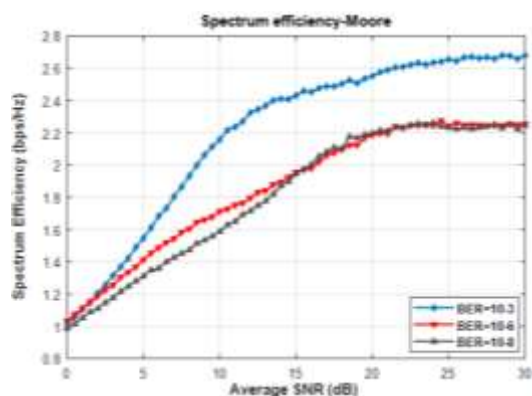
حالات زنجیره مارکوف با مجموعه $S = \{S_0, S_1, \dots, S_n\}$ که متناظر با بردار مرزی $B = \{b_0, b_1, \dots, b_n, b_{n+1}\}$ است نشان داده می‌شود و n تعداد حالات محدود برای نسبت سیگنال به نویز کانال است. حالت کانال با S_j که در آن $0 \leq j \leq n$ است نشان داده می‌شود.

در حالت S_j ، مقادیر نسبت سیگنال به نویز گیرنده در بازه‌ی $[b_j, b_{j+1}]$ قرار خواهد گرفت و برای اطمینان از سنجش عملکرد مقدار b_j برای نسبت سیگنال به نویز در نظر گرفته می‌شود. با افزودن یک گام مشخص Δ به دامنه‌ی مقادیر نسبت سیگنال به نویز، بردار مرزی B به صورت زیر است:

جدول (۳): مقادیر آستانه برای ضریب تضعیف کانال در

نرخ‌های خطای بیت مختلف با روش مور وفقی [۱۰].

ID	MCSs	attenuation Channel (Moore) Boundary
		BER = 8×10^{-3}
۱	QPSK(1/2)	$\alpha < 0.46$
۲	QPSK(3/4)	$0.46 \leq \alpha < 0.65$
۳	16QAM(1/2)	$0.65 \leq \alpha < 0.95$
۴	16QAM(3/4)	$0.95 \leq \alpha < 1.38$
۵	64QAM(2/3)	$1.38 \leq \alpha < 1.95$
۶	64QAM(3/4)	$\alpha \geq 1.95$

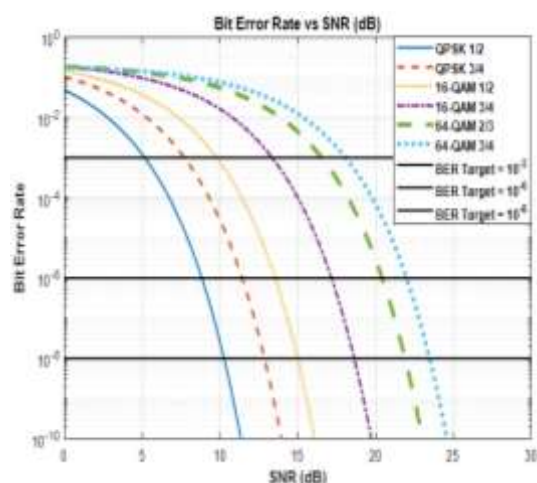


شکل (۸): منحنی بهره‌وری طیفی برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط در نرخ خطای بیت 10^{-3} ، 10^{-6} و 10^{-8} با استفاده از روش مور

شکل‌های (۸) تا (۱۴) بهره‌وری طیفی را برحسب نسبت سیگنال به نویز میانگین گیرنده نشان می‌دهد. شکل (۸) بهره‌وری طیفی با استفاده از روش مور را برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط گیرنده در نرخ خطای بیت 10^{-3} ، 10^{-6} و 10^{-8} نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که تحت یک نسبت سیگنال به نویز متوسط یکسان در گیرنده و اعمال محدودیت‌های ضعیف‌تر نرخ خطای بیت، بهره‌وری طیفی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که بهره‌وری طیفی در نرخ خطای بیت 10^{-6} از نسبت سیگنال به نویز متوسط ۰ تا ۱۵ دسی‌بل بیشتر از بهره‌وری طیفی در نرخ خطای بیت 10^{-8} است و بهره‌وری طیفی در نرخ خطای بیت 10^{-6} و نرخ خطای بیت 10^{-8} از نسبت سیگنال به نویز متوسط ۱۵ به بالا تقریباً یکسان است.

شکل (۹) عملکرد روش مور را در مقاله‌ی [۱۰] از نظر گذردگی داده بر حسب نسبت سیگنال به نویز گیرنده در نرخ خطای بیت 10^{-3} و 10^{-6} نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با کاهش نرخ خطای موردنظر، مقدار گذردگی پایین‌تر می‌شود و برعکس، این موضوع می‌تواند مؤید شکل (۷) باشد. به‌عنوان یک نتیجه، این روش، برای برنامه‌های کاربردی مانند خدمات UDP یا بی‌درنگ، راه‌حل مناسبی است؛ چرا که تلفات کم برای اطلاعات یکپارچه به نفع افزایش نرخ بیت قابل‌قبول است.

شکل (۱۰) بهره‌وری طیفی با استفاده از روش مارکوف را برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط گیرنده در نرخ خطای بیت 10^{-3} ، 10^{-6} و 10^{-8} نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که تحت یک نسبت سیگنال به نویز متوسط یکسان در گیرنده و اعمال محدودیت‌های ضعیف‌تر نرخ خطای بیت، بهره‌وری طیفی افزایش می‌یابد. بهره‌وری طیفی با استفاده از روش مارکوف همان‌طور که در شکل نمایان است به‌طور کلی در نرخ خطای بیت 10^{-6} بیشتر از بهره‌وری طیفی نرخ خطای بیت 10^{-8} است ولیکن در بعضی نسبت‌های سیگنال به نویز متوسط یکسان هستند.



شکل (۷): منحنی‌های BER برحسب تابعی از SNR

جدول (۴) مقاله‌ی مقدار نسبت سیگنال به نویز کانال برحسب dB در BERهای مختلف را برای هر کدام از طرح‌های AMC مربوط به روش مارکوف وقتی نشان می‌دهد که از طریق شبیه‌سازی به دست آمده است.

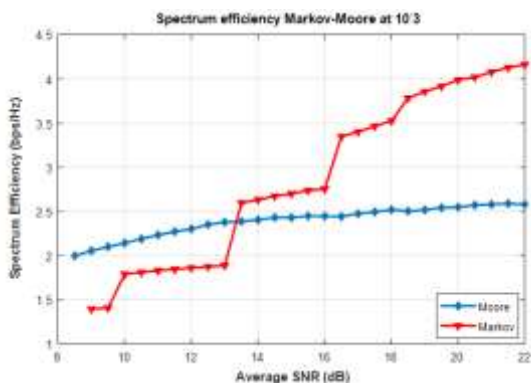
جدول (۴): مقادیر آستانه SNR کانال در BERهای مختلف با روش مارکوف وقتی

ID	MCSs	(Markov) Boundary SNR		
		BER= 10^{-3}	BER= 10^{-6}	BER= 10^{-8}
۱	QPSK(۱/۲)	۵,۱۵	۸,۸۲	۱۰,۲۷
۲	QPSK(۳/۴)	۷,۶۹	۱۱,۴	۱۲,۸۶
۳	۱۶QAM(۱/۲)	۹,۷۶	۱۳,۵۲	۱۴,۹۸
۴	۱۶QAM(۳/۴)	۱۳,۳۳	۱۷,۱۴	۱۸,۶۴
۵	۶۴QAM(۲/۳)	۱۶,۴۸	۲۰,۴۳	۲۱,۸۹
۶	۶۴QAM(۳/۴)	۱۸,۰۳	۲۱,۹۸	۲۳,۴۴

۴- نتایج عددی

در این بخش نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار متلب تشریح خواهد شد. نتایج ارائه‌شده بر اساس محاسبه‌ی میانگین ده‌هزار بار تکرار شبیه‌سازی در یک محیط رایلی است. به‌طور خاص، عملکرد دو روش وقتی یکی مور و دیگری مارکوف با یکدیگر مقایسه و حالت بهینه استخراج می‌گردد.

شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) مقایسه‌ی بهره‌وری طیفی دو روش مور و مارکوف را برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط و در یک نرخ خطای بیت مشخص نشان می‌دهد. به علت محدودیت در شبیه‌سازی روش مارکوف و همچنین به‌منظور یک مقایسه‌ی منصفانه، نسبت سیگنال به نویز متوسط در هر دو روش در یک بازه‌ی مشخص و یکسان از ۹ تا ۲۲ دسی‌بل بیان شده است. همچنین مشخصات کانال بی‌سیم در همه‌ی آزمایش‌ها یکسان فرض شده است. منحنی خط‌چین بیانگر قدر مطلق تفاضل بهره‌وری بین دو روش است که نشان‌دهنده‌ی تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای در بهره‌وری طیفی برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط است. همان‌طور که از شکل قابل‌مشاهده است، در نسبت سیگنال به نویز متوسط پایین و بالا، به‌ترتیب روش‌های مور و سپس روش مارکوف عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

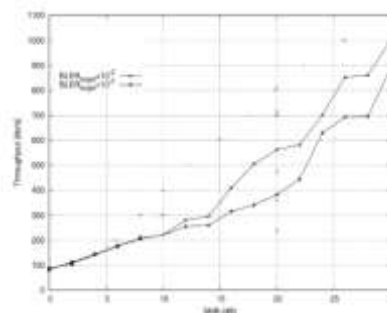


شکل (۱۲): مقایسه‌ی بهره‌وری طیفی دو روش مور و مارکوف برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط در نرخ خطای بیت 10^{-3}

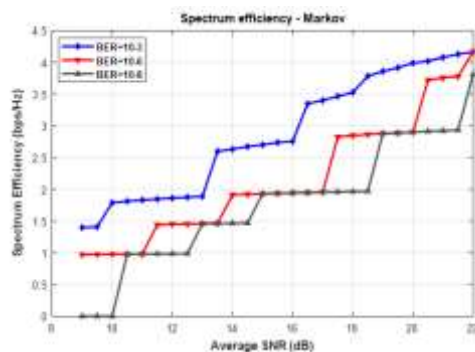
شکل (۱۲) نشان می‌دهد که در نرخ خطای بیت 10^{-3} ، بهره‌وری طیفی روش مور در محدوده نسبت سیگنال به نویز میانگین ۹ تا 13.35 دسی‌بل 22.1% بهتر از روش مارکوف است و از نسبت سیگنال به نویز میانگین 13.35 تا 16 دسی‌بل به‌اندازه 13.4% روش مور بهتر از مارکوف است و از نسبت سیگنال به نویز میانگین 16 تا 22 دسی‌بل، بهره‌وری طیفی روش مارکوف 57.4% بهتر از روش مور است.

شکل (۱۳) نشان می‌دهد که در نرخ خطای بیت 10^{-6} ، بهره‌وری طیفی روش مور در محدوده نسبت سیگنال به نویز میانگین ۹ تا 14 دسی‌بل 25.4% بهتر از روش مارکوف است و از نسبت سیگنال به نویز میانگین 14 تا 17 دسی‌بل تقریباً یکسان و به‌اندازه‌ی 2.1% روش مور بهتر از مارکوف است و از نسبت سیگنال به نویز میانگین 17 تا 22 دسی‌بل، بهره‌وری طیفی روش مارکوف 49.5% بهتر از روش مور است.

شکل (۱۴) نشان می‌دهد که در نرخ خطای بیت 10^{-8} ، بهره‌وری طیفی روش مور در محدوده نسبت سیگنال به نویز

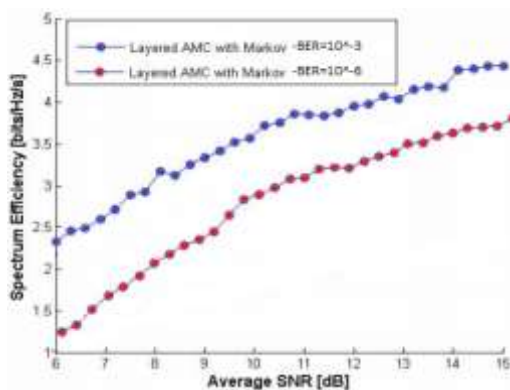


شکل (۹): منحنی گذردهی داده برحسب نسبت سیگنال به نویز در نرخ خطای بیت 10^{-2} و 10^{-3} با استفاده از روش مور [۱۰]



شکل (۱۰): منحنی بهره‌وری طیفی برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط در نرخ خطای بیت 10^{-3} ، 10^{-6} و 10^{-8} با استفاده از روش مارکوف

شکل (۱۱) بهره‌وری طیفی را با استفاده از روش مارکوف در مقاله‌ی [۱۱] برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط گیرنده در نرخ خطای بیت 10^{-3} و 10^{-6} نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که تحت یک نسبت سیگنال به نویز متوسط یکسان در گیرنده و اعمال محدودیت‌های ضعیف‌تر نرخ خطای بیت، بهره‌وری طیفی افزایش می‌یابد. بهره‌وری طیفی با استفاده از روش مارکوف همان‌طور که در شکل نمایان است به‌طور کلی در نرخ خطای بیت 10^{-3} بیشتر از بهره‌وری طیفی نرخ خطای بیت 10^{-6} است. این موضوع در شکل (۹) نیز که حاصل شبیه‌سازی در این مقاله است، نتیجه یکسانی را به همراه دارد.



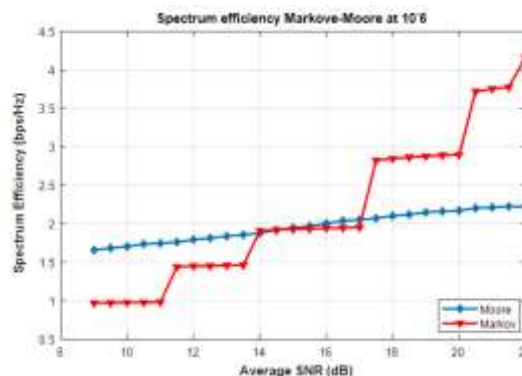
شکل (۱۱): منحنی بهره‌وری طیفی برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط در نرخ خطای بیت 10^{-3} و 10^{-6} با استفاده از روش مارکوف [۱۱]

به نویز متوسط کانال انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بهره‌وری طیفی روش مور در نسبت سیگنال به نویزهای پایین از ۹ تا ۱۳/۳۵ دسی‌بل ۳۱/۶٪ و در نسبت‌های سیگنال به نویز متوسط از ۱۳/۳۵ تا ۱۸/۶ دسی‌بل ۷/۹٪ بهتر از بهره‌وری طیفی روش مارکوف و فقی است. همچنین بهره‌وری طیفی روش مارکوف در نسبت سیگنال به نویزهای بالا از ۱۸/۶ تا ۲۲ دسی‌بل ۵۲/۱٪ بهتر از بهره‌وری طیفی روش مور و فقی است.

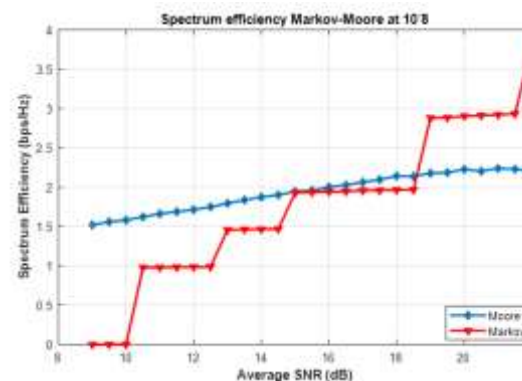
۶- مراجع

- [1] A. Hamidane and D. Berkani, "Performance Analysis of NLMS Channel Estimation for AMC-COFDM System," *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, no. 2, vol. 3, pp. 190–194, Mar. 2018.
- [2] W. Jiao, H. Ding, H. Wu, and G. Yu, "Spectrum Efficiency of Jointing Adaptive Modulation Coding and Truncated ARQ with QoS Constraints," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 46915–46925, 2018.
- [3] S. G. Temalow, E. Mwangi, and K. Langat, "Neuro-fuzzy based adaptive coding and modulation for performance improvement in OFDM wireless systems," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, no. 20, vol. 12, pp. 9357–9366, 2017.
- [4] K. G. Shanthi and A. Manikandan, "An Improved Adaptive Modulation and Coding for Cross Layer Design in Wireless Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, no. 2, vol. 108, pp. 1009–1020, Sep. 2019.
- [5] R. Zeng, T. Liu, X. Yu, and Z. Zhang, "Novel Channel Quality Indicator Prediction Scheme for Adaptive Modulation and Coding in High Mobility Environments," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11543–11553, 2019.
- [6] J. Zhang, S. Chen, R. G. Maunder, R. Zhang, and L. Hanzo, "Adaptive Coding and Modulation for Large-Scale Antenna Array-Based Aeronautical Communications in the Presence of Co-Channel Interference," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, no. 2, vol. 17, pp. 1343–1357, Feb. 2018.
- [7] J. Francis and N. B. Mehta, "EESM-based link adaptation in OFDM: Modeling and analysis," in *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, 2013, no. 1, vol. 13, pp. 3703–3708.
- [8] J. Meng, E.-H. Yang, and E. h. Yang, "Constellation and rate selection in adaptive modulation and coding based on finite blocklength analysis," *IEEE Wirel. Commun. Netw.*, no. 10, vol. 13, pp. 4065–4070, 2013.

میانگین ۹ تا ۱۵ دسی‌بل ۴۷,۳٪ بهتر از روش مارکوف است و از نسبت سیگنال به نویز میانگین ۱۵ تا ۱۸,۶ دسی‌بل تقریباً یکسان و به اندازه‌ی ۸,۲٪ روش مور بهتر از مارکوف است و از نسبت سیگنال به نویز میانگین ۱۸,۶ تا ۲۲ دسی‌بل، بهره‌وری طیفی روش مارکوف ۴۹/۳٪ بهتر از روش مور است.



شکل (۱۳). مقایسه‌ی بهره‌وری طیفی دو روش مور و مارکوف برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط در نرخ خطای بیت 10^{-6}



شکل (۱۴). مقایسه‌ی بهره‌وری طیفی دو روش مور و مارکوف برحسب نسبت سیگنال به نویز متوسط در نرخ خطای بیت 10^{-8}

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد دو روش AMC با طرح مدولاسیون و کدگذاری یکسان، یکی با روش ماشین وضعیت مور و دیگری با روش زنجیره‌ی مارکوف حالت محدود مرتبه‌ی اول شبیه‌سازی شد و حالت بهینه استخراج گردید. هر وضعیت در هریک از این دو روش با یک جفت از یک مرتبه مدولاسیون و یک نرخ کدگذاری نشان داده می‌شود. طرح‌های موردنظر در این مقاله، مدولاسیون‌های QPSK، ۱۶QAM و ۶۴QAM و کدهای بلوکی با نرخ کدگذاری ۱/۲، ۲/۳، ۳/۴ هستند. هدف از این کار، ارزیابی بهره‌وری طیف بر اساس تخمین وضعیت فعلی کانال مبتنی بر هرکدام از دو روش فوق است. در روش مور و فقی، تطبیق طرح مدولاسیون و کدگذاری بر اساس ضریب تضعیف متوسط کانال انجام می‌شود و در روش مارکوف و فقی، بر اساس نسبت سیگنال

- [11] J. She, J. Mei, J. Ho, P.-H. Ho, and H. Ji, "Layered Adaptive Modulation and Coding for 4G Wireless Networks," IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM, 2010, pp. 1–6.
- [12] S. C. K. Lye, S. E. Tan, Z. W. Siew, H. T. Yew, and K. T. K. Teo, "Analysis and performance measurement of adaptive modulation and coding," IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, 2012, pp. 268–273.
- [9] R. C. Daniels, C. M. Caramanis, and R. W. Heath, "Adaptation in convolutionally coded MIMO-OFDM wireless systems through supervised learning and SNR ordering," IEEE Trans. Veh. Technol., no. 1, vol. 59, pp. 114–126, 2010.
- [10] R. Fantacci, D. Marabissi, D. Tarchi, and I. Habib, "Adaptive modulation and coding techniques for OFDMA systems," IEEE Trans. Wirel. Commun., no. 9, vol. 8, pp. 4876–4883, Sep. 2009.