

دسته‌بندی کور کدهای فضا- زمان با استفاده از یادگیری ماشین

مهدی تیموری^{۱*}، مسعود رضایی^۲

۱- استادیار، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۶/۰۷/۲۷، پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۵)

چکیده

مهم‌ترین خصوصیتی که شناسایی کور کدهای فضا- زمان را از سایر انواع شناسایی کور مخابراتی متمایز می‌کند این است که برای نفوذ در بسیاری از سامانه‌های مخابراتی مدرن که از روش‌های ارسال و دریافت چندآنتنی استفاده می‌کنند، در اولین قدم، شناسایی کور کد فضا- زمان به‌کاررفته است. در این مقاله، دسته‌بندی کور در مجموعه وسیعی از کدهای فضا- زمان با استفاده از ابزارهای یادگیری ماشین مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که در کارهای پیشین، تنها دسته‌بندی کدهای فضا- زمان متعامد مورد بررسی قرار گرفته است، یکی از نوآوری‌های این مقاله افزودن کدهای شبه متعامد و همچنین سامانه ارسال تک آنتنی به این دسته‌بندی است. بهبود عملکرد روش‌های مرسوم دسته‌بندی نیز یکی دیگر از نوآوری‌های این مقاله است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که درخت تصمیم ایجادشده توسط تعداد زیادی از ویژگی‌های استخراج‌شده از ماتریس‌های همبستگی، نسبت به سایر روش‌های مرسوم شناسایی دارای عملکرد نسبتاً بهتر، به خصوص در شرایط بسیار نویزی، است.

کلیدواژه‌ها: شناسایی کور، کدهای فضا- زمان، ماتریس همبستگی، درخت تصمیم

Blind Classification of Space-Time Codes Using Machine Learning

M. Teimouri*, M. Rezaei

University of Tehran

(Received: 19/10/2017; Accepted: 16/03/2018)

Abstract

For eavesdropping of modern telecommunications systems, which employ multiple transmit and receive antennas, the first step is to recognize the space-time code. In this paper, a method to classify within broad categories of space-time codes is proposed. The method is based on machine learning and pattern recognition. Compared to the previous reports, the novelty is including quasi-orthogonal space-time codes and also single antenna transmitter in identification set. Moreover, the method described in this paper outperforms the current classification methods. It is shown that the decision tree classifier based on several features extracted from correlation matrices, has practical advantages over the current classification methods, especially when data is very noisy.

Keywords: Blind Identification, Space-Time Codes, Correlation Matrix, Decision Tree

* Corresponding Author E-mail: mehditeimouri@ut.ac.ir

۱. مقدمه

عنوان مقادیر ویژگی مورد استفاده قرار داده و با استفاده از آن‌ها دسته‌بندی بین پنج نوع سامانه مختلف را انجام داده‌اند. یکی از ضعف‌های این کار عدم در نظر گرفتن کدهای فضا-زمان شبه متعامد و همچنین سامانه ارسال تک آنتنی در دسته‌بندی است. کدهای فضا-زمان شبه متعامد دارای این مزیت هستند که نسبت به کدهای فضا-زمان متعامد نرخ ارسال بالاتری را فراهم می‌کنند. با این حال، نسبت به کدهای فضا-زمان متعامد، گیرنده آن‌ها پیچیده‌تر و عملکرد احتمال خطای آن‌ها ضعیف‌تر است. در این مقاله، با بهره‌گیری از درخت تصمیم دودویی^{۱۲} روش چاکوز و همکارانش را توسعه داده و با استفاده از آن هشت سامانه ارسال مختلف را از یکدیگر تفکیک خواهیم نمود. حتی با وجود اینکه دسته‌بندی در این مقاله بر روی دسته وسیع‌تری از سامانه‌ها صورت می‌گیرد، اما با توجه به نتایج شبیه‌سازی، صحت^{۱۳} عملکرد دسته‌بند ارائه‌شده بالاتر از دسته‌بند چاکوز و همکارانش است.

ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در بخش دوم، مدل مد نظر برای سامانه شناسایی ارائه می‌گردد. در بخش سوم، ویژگی‌های همبستگی معرفی خواهند شد. در بخش چهارم و پنجم، به ترتیب روش چاکوز و همکاران و روش پیشنهادی این مقاله ارائه می‌گردند. با ارائه نتایج شبیه‌سازی در بخش ششم، دو روش مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرند. در پایان و در بخش هفتم، جمع‌بندی ارائه می‌گردد.

۲. مدل سیستم

در این مقاله، تمامی ماتریس‌ها با حرف بزرگ و به شکل ضخیم آن نمایش داده می‌شوند (مثلاً ماتریس M). همچنین بالانویس‌های * ، T و H به ترتیب نمایانگر مزدوج مختلط، ترانزاده و شکل هرمیتی^{۱۴} یک ماتریس است (مثلاً M^T ، M^* و M^H). ستون‌های یک ماتریس نیز توسط حروف بزرگ و یک اندیس پایین‌نویس نشان داده می‌شود که اندیس پایین‌نویس نشان‌دهنده شماره ستون است (مثلاً M_i). همچنین با استفاده از دو اندیس پایین‌نویس، یک عنصر ماتریس که در سطر و ستون مشخصی قرار دارد، نشان داده می‌شود (مثلاً M_{ij}).

۲-۱. مدل سیگنال ارسالی کد فضا-زمان

در یک کد بلوکی فضا-زمان^{۱۵}، هر بلوک n_e سمبلی توسط n_t آنتن به صورت موازی در l بازه زمانی ارسال می‌شود. بردار n_e سمبلی مختلط مورد نظر به صورت $S = [s_1, \dots, s_{n_e}]^T$ نمایش داده می‌شود. همچنین تابع ماتریسی کدگذار فضا-زمان و $l+1$

طبیعت انتشار سامانه‌های رادیویی بی‌سیم در فضای آزاد، امکان دسترسی غیرمجاز به دیگر کاربران را می‌دهد. این ساختار دسترسی بسیار متفاوت از ساختار دسترسی در شبکه سیمی است؛ به عبارت دیگر، در مقایسه با انتقال داده توسط سیم، در مخابرات بی‌سیم داده‌ها بسیار آسیب‌پذیرتر است. این آسیب‌پذیری در شکل‌های گوناگون مطرح می‌شود. به عنوان مثال، یک دستگاه استراق سمع می‌تواند به صورت غیرفعال دسترسی غیرمجاز به داده داشته باشد و یا یک دستگاه اخلاص‌گر می‌تواند به صورت فعال در روند ارسال اطلاعات خلل ایجاد نماید [۱].

کدهای فضا-زمان به منظور افزایش بهره چندگانگی^۱ معرفی شدند. این چندگانگی جهت بهبود کیفیت انتقال اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است؛ اما می‌توان از شیوه چندگانگی جهت افزایش قدرت محرمانگی و امنیت در لایه فیزیکی نیز بهره برد. با توجه به کاربرد کدهای فضا-زمان در بسیاری از سامانه‌های مخابراتی مدرن، در شرایط مختلفی مانند شنود اطلاعات، مدیریت طیف و یا رادیو شناختی^۲ نیاز به شناسایی کور کدهای فضا-زمان داریم [۲].

یکی از روش‌های بنیادی برای شناسایی کدهای فضا-زمان، استفاده از معیار شباهت بیشینه^۳ است. روش‌های شباهت بیشینه عموماً دارای پیچیدگی محاسباتی فراوانی هستند. علاوه بر این، در چنین روش‌هایی باید مشخصات کانال و در مواردی نوع مدولاسیون در گیرنده کور مشخص باشد [۳]. برای حل این مشکلات، معمولاً روش‌های مبتنی بر ویژگی^۴ انتخاب می‌گردند. به طور مثال، در [۲] ویژگی‌های ایستان چرخشی^۵ مورد استفاده قرار گرفته است. ایراد اصلی این ویژگی‌ها این است که نمی‌توانند در دسته‌بندی^۶ کدهای دارای دوره زمانی یکسان مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به اینکه بسیاری از سامانه‌های چندآنتنی مرسوم از کد فضا-زمان الموتی^۷ استفاده می‌کنند، در سال‌های اخیر تفکیک کد فضا-زمان الموتی از تسهیم فضایی^۸ مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۴-۶].

یکی از بهترین روش‌ها برای دسته‌بندی کدهای فضا-زمان توسط چاکوز^۹ و همکارانش ارائه شده است [۷]. آن‌ها نرم فروبنیوس^{۱۰} ماتریس همبستگی^{۱۱} به‌ازای تأخیرهای مختلف را به

¹ Diversity

² Cognitive Radio

³ Maximum Likelihood

⁴ Feature-Based Methods

⁵ Cyclostationarity Features

⁶ Classification

⁷ Alamouti Space-Time Code

⁸ Spatial Multiplexing

⁹ Choqueuse

¹⁰ Frobenius Norm

¹¹ Correlation Matrix

¹² Binary Decision Tree

¹³ Accuracy

¹⁴ Hermitian Form

¹⁵ Space-Time Block Code

حاصل شوند k_1+1 امین ستون $(0 \leq k_1 < l)$ از j امین زمان ارسال (یعنی $(C_{k_1}(S_j))$) است. تحت این فرض، k امین ستون Y_k شده $(k \geq 0)$ ، به این صورت قابل نمایش است [۷]:

$$Y_k = \mathbf{H}X_k + B_k, \quad (5)$$

$$X_k = C_u(S_v), \quad (6)$$

کـــه در آن $u = (k+k_1) \bmod l$ و $v = j + (k+k_1) \text{div } l$ و $x \bmod l$ و $x \text{div } l$ به ترتیب بیانگر خارج قسمت و باقیمانده تقسیم x بر l هستند. همچنین، B_k بردار نویز جمع‌شونده به طول n_r است. فرض کنید که این نویز جمع‌شونده یک نویز گوسی مختلط ناهمبسته است. برای شناسایی کور کدهای بلوکی فضا-زمان فرض می‌شود که N نمونه از Y_k ($0 \leq k < N$) دریافت شده است. هدف سامانه کور شناسایی تعیین نوع کد فضا-زمان مورد استفاده با استفاده از این N نمونه است.

۳. ویژگی ماتریس همبستگی و نُرم فروبنیوس

در این بخش، ویژگی‌های همبستگی مورد استفاده در دسته‌بندی معرفی خواهند شد. در این راستا ابتدا ماتریس‌های همبستگی توصیف می‌گردند. سپس ویژگی‌های مورد استفاده به صورت نُرم فروبنیوس ماتریس‌های همبستگی معرفی می‌گردند.

۳-۲. ماتریس‌های همبستگی

فرض کنید بردارهای مختلط M_k ($k=0,1,\dots,N-1$) حاصل ارسال و یا دریافت N دوره سمبل از یک سامانه چندآنتنی باشند (این بردارها در سمت فرستنده دارای طول n_r و در سمت گیرنده دارای طول n_r هستند). برای این بردارها، ماتریس‌های همبستگی فضا-زمان به این صورت تعریف می‌شود [۷]:

$$\mathbf{R}_{M,T}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} E[M_k M_{k+\tau}^T], \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{M,H}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} E[M_k M_{k+\tau}^H]. \quad (8)$$

تنها تفاوت این دو رابطه در عبارت $M_{k+\tau}^T$ و $M_{k+\tau}^H$ است. می‌توان نشان داد که برای کد فضا-زمان مشخص شده توسط رابطه (۱)، روابط (۷) و (۸) در سمت فرستنده به این صورت ساده خواهند شد [۷]:

$$\mathbf{R}_{X,T}(\tau) \cong \frac{E[|s|^2]}{2l} \sum_{w=0}^{l-\tau-1} \mathbf{A}_w \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{n_e} & \mathbf{0}_{n_e} \\ \mathbf{0}_{n_e} & -\mathbf{I}_{n_e} \end{pmatrix} \mathbf{A}_{w+\tau}^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{X,H}(\tau) \cong \frac{E[|s|^2]}{2L} \sum_{w=0}^{l-\tau-1} \mathbf{A}_w \mathbf{A}_{w+\tau}^H. \quad (10)$$

امین ستون آن به ترتیب به صورت $\mathbf{C}(S)$ و $C_j(S)$ ($0 \leq j < l$) نمایش داده می‌شود. بنا تعریف

$$\tilde{S} = [\Re e(s_1), \dots, \Re e(s_{n_e}), \Im m(s_1), \dots, \Im m(s_{n_e})]^T$$

به ترتیب نشان‌دهنده قسمت‌های حقیقی و موهومی یک عدد مختلط هستند، می‌توان کدگذار یک کد فضا-زمان را به صورت

$$\mathbf{C}(S) = [C_0(S) \dots C_{l-1}(S)]$$

$$= \left[\mathbf{A}_0 \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{n_e} & \mathbf{0}_{n_e} \\ \mathbf{0}_{n_e} & i \mathbf{I}_{n_e} \end{pmatrix} \tilde{S} \dots \mathbf{A}_{l-1} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{n_e} & \mathbf{0}_{n_e} \\ \mathbf{0}_{n_e} & i \mathbf{I}_{n_e} \end{pmatrix} \tilde{S} \right] \quad (1)$$

نمایش داد که در آن \mathbf{I}_{n_e} و $\mathbf{0}_{n_e}$ به ترتیب معرف ماتریس همانی و ماتریس تمام صفر با ابعاد n_e هستند. همچنین $i = \sqrt{-1}$. ماتریس کدگذاری \mathbf{A}_j به نوع کدگذار کد فضا-زمان مورد استفاده بستگی دارد. برای مثال برای کد الموتی ($l=2$) و $(n_e=2)$ ، می‌توان گفت [۷]:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

فرض می‌شود که سمبل‌های ارسالی s_j ($j=1,2,\dots,n_e$) متعلق به یکی از مدولاسیون‌های مختلط QAM و یا PSK (با مرتبه ۴ یا بالاتر) هستند. علاوه بر این فرض می‌شود که این سمبل‌ها مستقل از هم و دارای توزیع احتمال یکسان (iid) هستند. با توجه به این موضوع، بخش‌های حقیقی و موهومی سمبل‌های ارسالی نیز iid هستند و می‌توان نوشت [۷]:

$$E[\Re e(s_j)^2] = E[\Im m(s_j)^2] = \frac{E[|s_j|^2]}{2}. \quad (4)$$

۲-۲. مدل سیگنال دریافتی

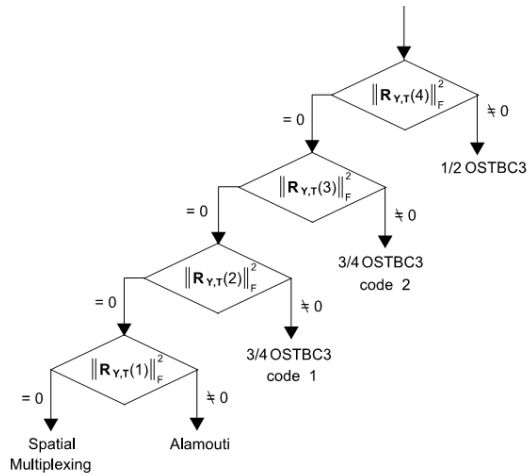
فرض کنید که گیرنده دارای n_r آنتن بوده و به طور کامل با فرستنده هم‌زمان شده باشد؛ به عبارت دیگر، فرض کنید که ازای هر دوره سمبل در فرستنده، یک نمونه توسط هر آنتن گیرنده دریافت شود. علاوه بر این فرض کنید که کانال بین هر زوج آنتن فرستنده و گیرنده دارای مدل تخت آهسته با توزیع دامنه رایلی باشد. ماتریس ضرایب کانال در چنین شرایطی توسط \mathbf{H} نشان داده می‌شود که یک ماتریس با ابعاد $n_r \times n_r$ است.

با توجه به اینکه در یک محیط غیر هم‌پار، شروع و طول کدهای بلوکی فضا-زمان در طرف گیرنده نامشخص است، می‌توان فرض کرد که اولین ستون دریافتی Y_0 (دارای طول n_r)

¹ Independent Identically Distributed

جدول ۱. مقدار ویژگی نرم فریبنیوس ماتریس همبستگی به ازای تأخیرهای متفاوت.

سامانه	تأخیر τ	$\ \mathbf{R}_{X,T}(\tau)\ _F^2$	$\ \mathbf{R}_{X,H}(\tau)\ _F^2$
SA (تک آنتنی)	0 > 0	0 0	1 0
SM	0 > 0	0 0	n_r 0
AL	0 1 > 1	0 1/2 0	0 0 0
STBC2	0 1 2 3 > 3	0 1/4 1/8 0 0	27/16 1/16 1/16 1/16 0
STBC3	0 1 2 3 > 3	0 1/8 1/8 1/8 0	27/16 1/8 1/16 0 0
STBC4	0 1 2 3 4 5 6 7 > 7	0 1/32 0 5/32 3/4 5/32 0 1/32 0	3 5/8 0 1/8 0 0 0 0 0
QSTBC1	0 1 2 3 > 3	0 3/4 3/4 0 0	4 1/4 0 1/4 0
QSTBC2	0 1 2 3 > 3	0 5/4 0 1/4 0	4 0 1 0 0



شکل ۱. درخت تصمیم‌گیری ارائه‌شده در [۷].

جهت تعیین پوچ بودن یا غیر پوچ بودن نرم فریبنیوس ماتریس همبستگی، یک روش آماری برای تعیین آستانه تصمیم‌گیری در [۷] پیشنهاد شده است. در این روش مقدار

روابط فوق نشان می‌دهند که مقادیر ماتریس‌های همبستگی تنها به نوع مدولاسیون و ساختار کد فضا-زمان بستگی دارد. با استفاده از ترکیب روابط (۷) و (۸) با رابطه (۵)، ماتریس‌های همبستگی در سمت گیرنده به این شکل خواهند بود [۷]:

$$\mathbf{R}_{Y,T}(\tau) = \mathbf{H}\mathbf{R}_{X,T}(\tau)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_{B,T}(0)\delta(\tau)\mathbf{I}_{n_r}, \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_{Y,H}(\tau) = \mathbf{H}\mathbf{R}_{X,H}(\tau)\mathbf{H}^H + \mathbf{R}_{B,H}(0)\delta(\tau)\mathbf{I}_{n_r}. \quad (12)$$

این همبستگی‌ها به ماتریس کانال \mathbf{H} ، مقادیر $\mathbf{R}_{B,H}(0)$ و $\mathbf{R}_{B,T}(0)$ و ماتریس‌های همبستگی در سمت فرستنده بستگی دارند.

۳-۱. نرم فریبنیوس ماتریس همبستگی

نرم فریبنیوس یک ماتریس \mathbf{M} دارای ابعاد $n \times m$ به این صورت تعریف می‌شود:

$$\|\mathbf{M}\|_F^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |M_{ij}|^2. \quad (13)$$

با توجه به روابط (۱۱) و (۱۲)، می‌توان نشان داد که برای هر ماتریس \mathbf{H} با ابعاد $n_r \times n_r$ ($n_r \geq n_r$) و دارای رتبه کامل^۱، به ازای $\tau > 0$ داریم [۷]:

$$\mathbf{R}_{X,T}(\tau) = 0 \text{ اگر و فقط اگر } \mathbf{R}_{Y,T}(\tau) = 0 \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_{X,H}(\tau) = 0 \text{ اگر و فقط اگر } \mathbf{R}_{Y,H}(\tau) = 0 \quad (15)$$

۳-۲. تولید ویژگی

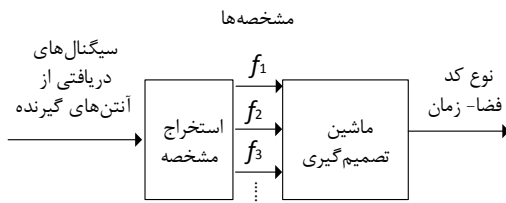
می‌توان به راحتی نشان داد که ویژگی‌های $\|\mathbf{R}_{Y,T}(\tau)\|_F^2$ و $\|\mathbf{R}_{Y,H}(\tau)\|_F^2$ در مقادیر مختلف تأخیر τ ، ویژگی‌هایی مناسب برای دسته‌بندی کدهای فضا-زمان هستند [۷]. در جدول (۱) مقادیر ویژگی‌های $\|\mathbf{R}_{X,T}(\tau)\|_F^2$ و $\|\mathbf{R}_{X,H}(\tau)\|_F^2$ برای سامانه‌های مختلف چندآنتنی آورده شده است. ماتریس ارسال تمامی این سامانه‌ها در پیوست ۱ آورده شده است.

برای تصمیم‌گیری جهت انتخاب مقادیر غیر پوچ به ازای هر تأخیر، از یک آزمون فرض ساده استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی توسط چاکوز و همکارانش [۷]، تنها از مقادیر $\|\mathbf{R}_{Y,T}(\tau)\|_F^2$ به عنوان ویژگی استفاده شده است. با توجه به مقادیر $\|\mathbf{R}_{X,T}(\tau)\|_F^2$ در جدول (۱)، درخت تصمیم شکل (۱) توسط چاکوز و همکارانش پیشنهاد شده است. در هر گره این درخت تصمیم یک آزمون فرض تعریف می‌شود.

^۱ Full Rank

می‌شود تا بر روی آن‌ها تصمیم‌گیری نماید. با توجه به اینکه این مثال‌ها در فرایند توسعه و هرس درخت نقشی نداشته‌اند، عملکرد درخت تصمیم بر روی این نمونه‌ها می‌تواند به عنوان عملکرد درخت در دنیای واقعی دیده شود.

در بخش بعد، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نشان داده خواهد شد که درخت تصمیم حاصل علاوه بر اینکه قادر به دسته‌بندی بین تنوع وسیع‌تری از سامانه‌های چندآنتنی است، دارای مقاومت بیشتری در مقابل نویز است. در شکل (۲) بلوک دیاگرام نحوه عملکرد روش پیشنهادی نمایش داده شده است.



شکل ۲. بلوک دیاگرام نحوه عملکرد روش پیشنهادی.

۵. نتایج شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی از چندین پایگاه داده مختلف استفاده می‌شود. با فرض تنها استفاده از مدولاسیون PSK، برای تولید هر پایگاه داده مقدار مشخصی از مرتبه مدولاسیون، تعداد آنتن‌های گیرنده و تعداد سمبل دریافتی در نظر گرفته می‌شود؛ به عبارت دیگر، برای هر یک از شرایط مختلف مرتبه مدولاسیون، تعداد آنتن‌های گیرنده و تعداد سمبل دریافتی توسط هر آنتن گیرنده، یک ماشین تصمیم مجزا آموزش و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای هر پایگاه داده، مرتبه مدولاسیون یکی از مقادیر ۴، ۸ و ۱۶، تعداد آنتن‌های گیرنده یکی از مقادیر ۲، ۳، ... و ۶ و تعداد سمبل‌های دریافتی توسط هر یک از آنتن‌های گیرنده یکی از مقادیر ۲۴، ۴۸، ۹۶ و ۱۹۲ است. در تولید هر پایگاه داده، به ازای هر یک از نسبت‌های سیگنال به نویز از ۱۰- دسی‌بل تا ۲۰ دسی‌بل (با قدم ۱ دسی‌بلی)، ۳۰۰۰ مثال برای هر یک از سامانه‌های مشخص شده در پیوست ۱ تولید می‌شود. لذا، هر پایگاه داده شامل ۷۴۴۰۰۰ مثال است. هر مثال در پایگاه داده دارای ۲۳ ویژگی است که شامل ۲۲ ویژگی $\|\mathbf{R}_{Y,T}(\tau)\|_F^2$ و $\|\mathbf{R}_{Y,H}(\tau)\|_F^2$ در مقادیر تأخیر $\tau = 0, 1, \dots, 11$ به همراه مقدار نسبت سیگنال به نویز است. به عنوان مثال، در شکل (۳) درخت تصمیم حاصل برای حالتی نشان داده شده است که دو آنتن گیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعداد نمونه‌های دریافتی توسط هر آنتن برابر ۱۰۲۴ است و مدولاسیون مورد استفاده ۸-PSK است. این درخت تصمیم با استفاده از شش ویژگی متفاوت دسته‌بندی میان هشت سامانه مختلف را انجام می‌دهد. لازم به ذکر است درخت برای سادگی نمایش هرس اضافی شده است.

آستانه تصمیم‌گیری با توجه به مقدار مطلوب برای احتمال هشدار نادرست^۱ تعیین می‌شود. نشان داده شده است که در حالت برقراری فرض H_0 ، مقادیر $\|\mathbf{R}_{Y,T}(\tau)\|_F^2$ دارای توزیع مربع‌خی^۲ $\chi_{2n_r}^2$ با درجه آزادی $2n_r^2$ هستند. با توجه به این موضوع می‌توان به راحتی مقدار آستانه تصمیم‌گیری را با توجه به احتمال هشدار نادرست تعیین نمود. سپس در درخت تصمیم شکل (۱)، هرگاه مقدار اندازه‌گیری شده برای ویژگی مدنظر بزرگ‌تر از این آستانه باشد، تصمیم بر وقوع فرض H_1 است و در غیر این صورت تصمیم بر وقوع فرض H_0 گرفته می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در روش پیشنهادی چاکوز و همکارانش بسیاری از ویژگی‌های جدول (۱) مورد استفاده قرار نگرفته و تنها چهار ویژگی به کار گرفته شده است. در بخش بعد، روش پیشنهادی برای استفاده از مجموعه همه ویژگی‌ها ارائه می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان هر هشت سامانه مدنظر را از یکدیگر تفکیک نمود. علاوه بر این، همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، صحت دسته‌بندی روش پیشنهادی نسبت به [۷] افزایش خواهد داشت.

۴. روش پیشنهادی برای دسته‌بندی کدهای فضا-

زمان

با توجه به تعداد زیاد ویژگی‌ها، یکی از روش‌های مناسب برای تولید درخت تصمیم، استفاده از روش‌های مرسوم یادگیری ماشین است. برای این منظور ابتدا یک پایگاه داده از تمامی حالت‌های مدنظر یادگیری ایجاد می‌نماییم. هر مثال (نمونه) در این پایگاه داده، در حقیقت متناظر با یک بسته مشاهده N نمونه‌ای از سیگنال دریافتی است. متناظر با هر بسته دریافتی، هر مثال در پایگاه داده شامل ویژگی‌های $\|\mathbf{R}_{Y,T}(\tau)\|_F^2$ و $\|\mathbf{R}_{Y,H}(\tau)\|_F^2$ در مقادیر مختلف تأخیر τ به همراه برچسب مشخص‌کننده کد فضا-زمان مورد استفاده برای تولید و ارسال آن بسته است.

مثال‌های پایگاه داده به سه زیرمجموعه با اندازه (تقریباً) یکسان به نام مجموعه‌های آموزش، ارزیابی و آزمون^۳ افزاز می‌شود. برای آموزش درخت با استفاده از مثال‌های مجموعه آموزش از معیار کاهش ضریب جینی^۴ استفاده شده و درخت تا حد ممکن توسعه داده می‌شود [۸]. سپس اقدام به هرس^۵ درخت می‌شود تا جایی که عملکرد درخت هرس شده بر روی مجموعه ارزیابی ببشینه شود. در نهایت نیز برای سنجش عملکرد درخت حاصل، مثال‌های موجود در مجموعه آزمون به درخت داده

¹ False Alarm Probability

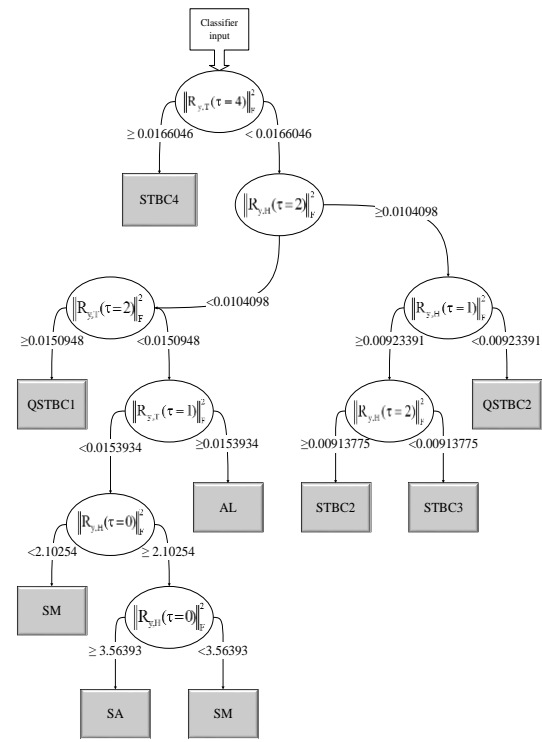
² Chi-Square

³ Training, Validation, and Test Sets

⁴ Gini's Index

⁵ Pruning

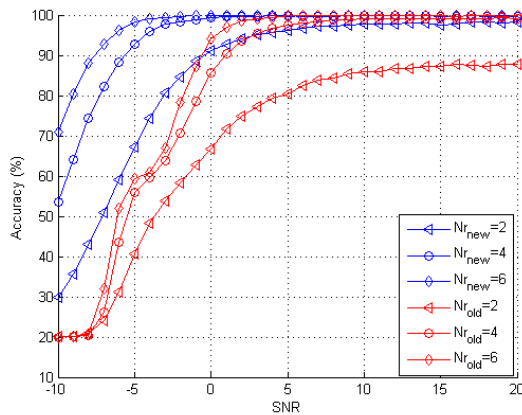
یکی از روش‌های مناسب برای بررسی عملکرد درخت تصمیم استفاده از ماتریس درهم‌ریختگی است. با استفاده از این ماتریس می‌توان دید که اشتباهات تصمیم‌گیری بیشتر بین کدام سامانه‌ها رخ می‌دهد. سناریوی جدول (۲) را در نظر بگیرید. در این سناریو چهار آنتن گیرنده مورد استفاده قرار گرفته است، تعداد نمونه‌های دریافتی توسط هر آنتن برابر ۲۰۴۸ است و مدولاسیون مورد استفاده QPSK است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، زمانی که سامانه SM فعال است، دسته‌بند پیشنهادی به ترتیب در ۱/۸۱ و ۱/۸۰ درصد موارد به اشتباه تشخیص به حضور به STBC2 و STBC3 می‌دهد. در ادامه، روش پیشنهادی با روش مرسوم ارائه شده در [۷] مقایسه می‌گردد. در تمامی مقایسه‌ها، روش پیشنهادی دسته‌بندی را بین هشت سامانه مشخص شده در پیوست ۱ انجام داده و روش مرسوم تنها بین پنج سامانه دسته‌بندی می‌کند. همچنین برای پیاده‌سازی روش مرسوم، هر جا که اشاره‌ای نشده است احتمال هشدار نادرست برابر 10^{-3} نظر گرفته شده است.



شکل ۳. درخت تصمیم برای دو آنتن گیرنده، ۱۰۲۴ نمونه به‌ازای هر آنتن و مدولاسیون 8-PSK.

جدول ۲. ماتریس درهم‌ریختگی برای چهار آنتن گیرنده، ۲۰۴۸ نمونه به‌ازای هر آنتن و مدولاسیون QPSK.

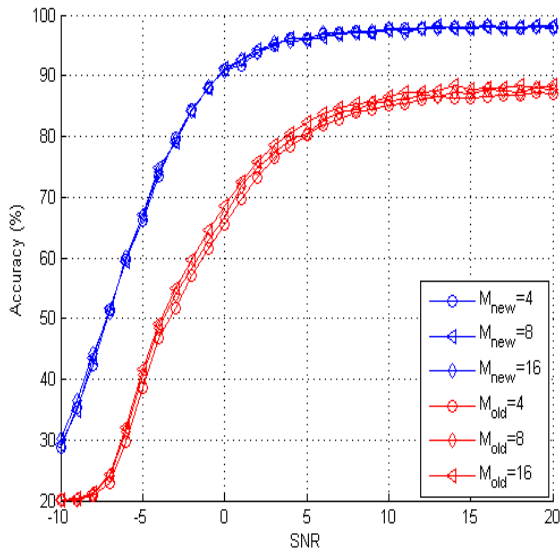
								سامانه واقعی
QSTBC2	QSTBC1	STBC4	STBC3	STBC2	AL	SM	SA	سامانه تشخیص داده شده
۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۲۲	۰/۱۵	۰/۳۳	۱/۲۲	۹۷/۶۷	SA
۰/۱۷	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۰۱	۰/۶۷	۰/۴۷	۹۳/۷۴	۱/۶۱	SM
۰/۵۸	۰/۳۶	۰/۰۴	۰/۴۷	۱/۳۱	۹۵/۲۹	۰/۵۳	۰/۴۹	AL
۱/۲۸	۳/۴۳	۰/۲۶	۲/۹۳	۸۷/۷۰	۱/۸۸	۱/۸۱	۰/۰۷	STBC2
۰/۷۸	۱/۴۰	۰/۴۷	۹۱/۴۶	۲/۶۸	۰/۴۸	۱/۸۰	۰/۰۸	STBC3
۰/۰۴	۰/۱۱	۹۸/۶۰	۰/۳۴	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۲۵	۰/۰۵	STBC4
۰/۲۹	۹۴/۰۱	۰/۱۳	۱/۵۳	۳/۲۶	۰/۷۵	۰/۳۵	.	QSTBC1
۹۵/۹۹	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۸۹	۱/۰۶	۰/۷۸	۰/۲۸	.	QSTBC2



شکل ۴. تأثیر تعداد آنتن گیرنده در عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به‌ازای دریافت ۱۰۲۴ نمونه دریافتی در هر آنتن و مدولاسیون 8-PSK.

۵-۱. تأثیر تعداد آنتن گیرنده

در شکل (۴)، به‌ازای مقادیر مختلف تعداد آنتن‌های گیرنده، صحت روش پیشنهادی با روش مرسوم ارائه شده در [۷] مقایسه شده است. برای این منظور، فرض شده است که هر آنتن گیرنده ۱۰۲۴ نمونه دریافت می‌نماید و مدولاسیون مورد استفاده 8-PSK است. در این شکل و شکل‌های بعدی، منحنی‌های آبی بیانگر عملکرد درخت تصمیم پیشنهادی و منحنی‌های قرمز نشان‌دهنده عملکرد روش مرسوم است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، صحت شناسایی درخت پیشنهادی با چهار آنتن گیرنده به‌طور چشمگیری بالاتر از صحت درخت مرسوم با شش آنتن است.



شکل ۶. تأثیر نوع مدولاسیون در عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به‌ازای دو آنتن دریافتی و ۱۰۲۴ نمونه دریافتی در هر آنتن.

۴-۵. تأثیر خطای هم‌زمان‌سازی

یکی از مسائل مهم در شناسایی کور سامانه‌های مخابراتی، مسئله هم‌زمان‌سازی کور است. بدیهی است که در شرایط کور، حتی با فرض تخمین دقیق نرخ سمبل، هم‌زمان‌سازی کامل بسیار پیچیده است [۹]. در چنین شرایطی، ممکن است نمونه‌برداری از سمبل‌های دریافتی با یک لغزش زمانی^۱ همراه باشد.

برای بررسی اثر لغزش زمانی، مقدار لغزش زمانی نسبت به دوره سمبل برابر Δt در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در حالت هم‌زمان‌سازی دقیق، $\Delta t = 0$. بدترین حالت نیز $\Delta t = 0.5$ است. در جدول (۳)، تأثیر خطای هم‌زمان‌سازی در صحت عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به‌ازای دریافت ۱۰۲۴ نمونه در دو آنتن گیرنده، مدولاسیون 8-PSK و نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش پیشنهادی نسبت به خطای هم‌زمان‌سازی بسیار حساس است، اما روش چاکوز در برابر خطای هم‌زمان‌سازی به‌طور کامل مقاومت می‌نماید. دلیل این مسئله این است که روش‌های یادگیری ماشین بر اساس داده‌های آموزشی یادگیری را انجام می‌دهند. لذا اگر داده‌های مجموعه آزمون دارای ویژگی‌هایی باشند که به شکل معناداری متفاوت از ویژگی‌های مجموعه داده‌های آموزش باشند، ماشین در دسته‌بندی آن‌ها دچار خطا می‌گردد.

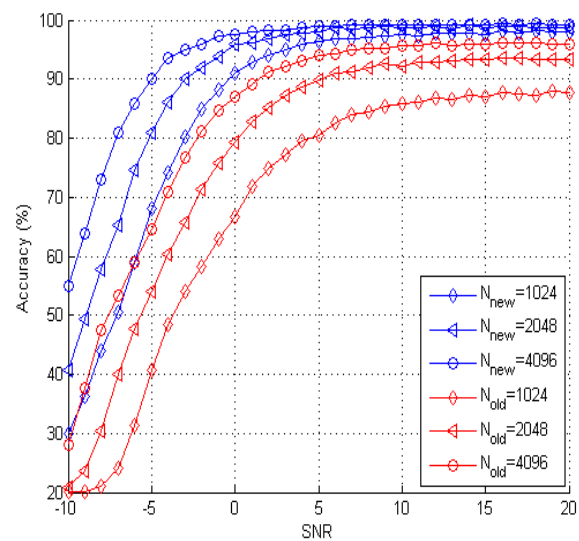
۲-۵. تأثیر تعداد نمونه‌های دریافتی

در شکل (۵)، به‌ازای مقادیر مختلف تعداد نمونه‌های دریافتی در هر آنتن گیرنده، صحت روش پیشنهادی با روش مرسوم مقایسه شده است. برای این منظور، فرض شده است که دو آنتن گیرنده داریم و مدولاسیون 8-PSK است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، صحت شناسایی درخت پیشنهادی با ۱۰۲۴ نمونه کمی بهتر از صحت درخت مرسوم با ۴۰۹۶ نمونه است.

۳-۵. تأثیر مدولاسیون

در شکل (۶)، به‌ازای انواع مختلف مدولاسیون، صحت روش پیشنهادی با روش مرسوم مقایسه شده است. برای این منظور، فرض شده است که دو آنتن گیرنده داریم و هر آنتن ۱۰۲۴ نمونه دریافت می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییر مدولاسیون تأثیر چندانی در صحت دو روش ندارد. همچنین همان‌طور که ملاحظه می‌شود عملکرد روش پیشنهادی به‌طور متوسط ۵ دسی‌بل بهتر از روش مرسوم است.

همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، مطابق با نتایج به دست آمده توسط چاکوز و همکارانش [۷] در هر یک از دو روش انتخاب نوع مدولاسیون تقریباً تأثیری در میزان عملکرد ندارد. این موضوع در مورد مدولاسیون‌های QAM نیز برقرار است. البته باید به این نکته توجه داشت که در روش پیشنهادی گیرنده باید از نوع مدولاسیون آگاه باشد تا از ماشین تصمیم مناسب استفاده نماید.



شکل ۵. تأثیر تعداد نمونه‌های دریافتی در عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به‌ازای دو آنتن دریافتی و مدولاسیون 8-PSK.

¹ Time Jitter

و ۷۲٪ می‌رسد. با توجه به این موضوع می‌توان گفت که مقدار انتخاب‌شده 10^{-3} برای احتمال هشدار نادرست در سایر شبیه‌سازی‌ها انتخاب مناسبی است.

جدول ۴. تأثیر مقدار $f_d T_s$ در صحت عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به ازای دریافت ۱۰۲۴ نمونه دریافتی در دو آنتن گیرنده، مدولاسیون 8-PSK و نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل.

مقدار $f_d T_s$					روش چاکوز و همکاران [۷]
۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	
٪۳۶	٪۴۸	٪۷۱	٪۸۸	٪۸۸	روش چاکوز و همکاران [۷]
٪۳۹	٪۵۵	٪۸۰	٪۹۰	٪۹۸	روش پیشنهادی

۷-۵. تأثیر نویزهای همبسته فضایی

یکی از مسائل مهم در سامانه‌های چند آنتنی، عملی نبودن فرض استقلال زمانی و فضایی نویزهای جمع‌شونده است. به عبارت دیگر، در تمامی شبیه‌سازی‌ها فرض کرده‌ایم که ماتریس کوواریانس نویز B_k در رابطه (۵)، ماتریسی قطری است. اما ممکن است نویز به صورت فضایی همبسته باشد [۷]. در این بخش، مانند [۷] فرض می‌کنیم، نویزها در آنتن‌های گیرنده با هم همبستگی دارند و این همبستگی به صورت نمایی با ضریب ρ از یک آنتن به آنتن دیگر کاهش می‌یابد.

در جدول (۵)، تأثیر مقدار این همبستگی در صحت عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به ازای دریافت ۱۰۲۴ نمونه در دو آنتن گیرنده، مدولاسیون 8-PSK و نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، روش پیشنهادی نسبت به این همبستگی مقدار کمی حساس است، اما روش چاکوز در برابر آن به طور کامل مقاومت می‌نماید.

جدول ۵. تأثیر همبستگی فضایی نویزها در صحت عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به ازای دریافت ۱۰۲۴ نمونه دریافتی در دو آنتن گیرنده، مدولاسیون 8-PSK و نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل.

مقدار ρ				روش چاکوز و همکاران [۷]
0.9	0.7	0.5	0	
٪۸۸	٪۸۸	٪۸۸	٪۸۸	روش چاکوز و همکاران [۷]
٪۹۵	٪۹۵	٪۹۷	٪۹۸	روش پیشنهادی

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با بهره‌گیری از یادگیری ماشین و آموزش درخت تصمیم دودویی، روش چاکوز و همکارانش توسعه داده شده است

جدول ۳. تأثیر خطای هم‌زمان‌سازی در صحت عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به‌ازای دریافت ۱۰۲۴ نمونه دریافتی در دو آنتن گیرنده، مدولاسیون 8-PSK و نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل.

مقدار Δt					روش چاکوز و همکاران [۷]
۰	۰/۱۲۵	۰/۲۵	۰/۳۷۵	۰/۵	
٪۸۸	٪۸۸	٪۸۸	٪۸۸	٪۸۸	روش چاکوز و همکاران [۷]
٪۹۸	٪۹۷	٪۵۶	٪۲۸	٪۲۳	روش پیشنهادی

۵-۵. تأثیر کانال تغییرپذیر با زمان

در آموزش ماشین تصمیم، داده‌های مجموعه آموزش با فرض کانال تخت و آهسته تولید شده‌اند. سؤال مهمی که پیش می‌آید این است که اگر کانال تغییرپذیر با زمان باشد، ماشین بر روی داده‌های مجموعه آزمونی که توسط کانال تغییرپذیر با زمان تولید شده‌اند، چه رفتاری خواهد داشت؟ برای بررسی اثر کانال تغییرپذیر با زمان، فرض کنید کانال دارای پهنای داپلر f_d باشد. همچنین فرض کنید دوره سمبل برای مدولاسیون مورد استفاده برابر T_s است. هر چه مقدار حاصل ضرب $f_d T_s$ بزرگ‌تر باشد، سرعت تغییرات کانال هم بیشتر است. در جدول (۴)، تأثیر مقدار $f_d T_s$ در صحت عملکرد روش مرسوم و روش پیشنهادی به ازای دریافت ۱۰۲۴ نمونه دریافتی در دو آنتن گیرنده، مدولاسیون 8-PSK و نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت تغییرات کانال، صحت عملکرد هر دو روش کاهش می‌یابد، اما روش پیشنهادی کماکان بهتر از روش چاکوز و همکاران است.

۵-۶. اثر تغییر احتمال هشدار نادرست

روش پیشنهادی توسط چاکوز و همکاران بر اساس مقدار احتمال هشدار نادرست استوار است. لذا با تغییر این احتمال، صحت عملکرد روش آن‌ها تغییر خواهد نمود. همان طور که اشاره شد، در تمامی شبیه‌سازی‌ها احتمال هشدار نادرست برابر 10^{-3} در نظر گرفته شده است. با این کار به عنوان مثال متوسط صحت عملکرد روش چاکوز و همکاران به ازای دریافت ۱۰۲۴ نمونه دریافتی در هر آنتن، مدولاسیون 8-PSK و نسبت سیگنال به نویز از ۱۰- دسی‌بل تا ۲۰ دسی‌بل حدود ۷۷٪ است. حال اگر احتمال هشدار نادرست برابر اعداد کوچک‌تر 10^{-4} ، 10^{-5} و یا مقدار بزرگ‌تر 10^{-2} در نظر گرفته، صحت عملکرد روش چاکوز و همکاران در همین شرایط کاهش و به ترتیب به حدود ۷۴٪، ۷۰٪

- [4] Eldemerdash, Y. A.; Marey, Dobre, O. A.; Karagiannidis, G. K.; Inkol, R. "Fourth-Order Statistics for Blind Classification of Spatial Multiplexing and Alamouti Space-Time Block Code Signals"; IEEE Trans. Commun. 2013, 61, 2420-2431.
- [5] Eldemerdash, Y. A.; Marey, M.; Dobre, O. A.; Inkol, R. "Blind Identification of SM and Alamouti STBC Signals Based on Fourth-Order Statistics"; Proc. IEEE ICC 2013, 4666-4670.
- [6] Eldemerdash, Y. A.; Dobre, O. A.; Marey, M.; Inkol, R. "Fourth-Order Moment-Based Identification of SM and Alamouti STBC for Cognitive Radio"; Proc. IEEE ICC 2012, 1737-1741.
- [7] Choqueuse, V.; Yao, K.; Collin, L.; Burel, G. "Hierarchical Space-Time Block Code Recognition Using Correlation Matrices"; IEEE Trans. Wireless Communications 2008, 7, 3526-3534.
- [8] Teimouri, M. "Detection of Link 16 Signal"; Tabriz J. Electrical Eng. 2016, 46, 84-87.
- [9] Teimouri, M. "Blind Symbol Duration Estimation of Digitally Modulated Signals in the Presence of Carrier Frequency Offset"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2015, 6, 1-7.

پیوست ۱. ماتریس کدگذار سامانه‌های مختلف چندآنتنی

در این پیوست ماتریس $C(S)$ برای سامانه‌های مختلف چندآنتنی توصیف شده است. علاوه بر این نام اختصاری مورد استفاده در این مقاله برای هر یک از این سامانه‌ها مشخص گردیده است.

تک آنتن فرستنده (SA):

$$(S_1)$$

تسهیم فضایی دو آنتنی (SM):

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix}$$

کد الموتی (AL):

$$\begin{pmatrix} S_1 & S_2 \\ -S_2^* & S_1^* \end{pmatrix}$$

کد متعامد چهار آنتنی (STBC2):

$$\begin{pmatrix} S_1 & 0 & -S_2^* \\ 0 & S_1 & -S_3 \\ S_2 & S_3^* & S_1^* \\ -S_3 & S_2^* & 0 \end{pmatrix}$$

که با استفاده از آن هشت سامانه مختلف ارسال چندآنتنی از یکدیگر قابل تفکیک هستند. روش پیشنهادی در مقایسه با روش مرسوم چاکوز و همکارانش دارای عملکرد بهتری است. این بهبود در شرایطی است که روش پیشنهادی دسته‌بندی را بین هشت سامانه انجام می‌دهد و روش مرسوم تنها بین پنج سامانه دسته‌بندی می‌نماید. در مقایسه با روش مرسوم که تنها از چهار ویژگی استفاده می‌نماید، روش پیشنهادی با استفاده از ۲۲ نرْم فریبیوس ماتریس‌های همبستگی می‌تواند به صحت بالاتری در دسته‌بندی برسد. علاوه بر این روش پیشنهادی برای تصمیم‌گیری نیاز به تعداد نمونه‌های دریافتی کمتری دارد. همچنین، در هر یک از دو روش انتخاب نوع مدولاسیون تقریباً تأثیری در میزان عملکرد ندارد. این موضوع در مورد مدولاسیون‌های QAM نیز برقرار است. البته باید به این نکته توجه داشت که در روش پیشنهادی گیرنده باید از نوع مدولاسیون آگاه باشد تا از ماشین تصمیم مناسب استفاده نماید.

در کنار مزایای اشاره‌شده، روش پیشنهادی مبتنی بر یادگیری ماشین دارای یک ضعف است. روش‌های یادگیری ماشین بر اساس داده‌های آموزشی یادگیری را انجام می‌دهند. لذا اگر داده‌های مجموعه آزمون دارای ویژگی‌هایی باشند که به شکل معناداری متفاوت از ویژگی‌های مجموعه داده‌های آموزش باشند، ماشین در دسته‌بندی آن‌ها دچار خطا می‌گردد. به عنوان مثال، همان‌طور که ملاحظه شد، اگر داده‌های مجموعه آزمون توسط کانالی تغییرپذیر با زمان تولید شده باشد و یا در گیرنده خطای هم‌زمان‌سازی وجود داشته باشد، روش پیشنهادی دارای افت عملکرد قابل‌ملاحظه‌ای خواهد بود.

در پایان لازم به ذکر است که هم در روش پیشنهادی و هم در روش چاکوز و همکارانش، فرض شده است که نسبت سیگنال به نویز و نوع مدولاسیون مورد استفاده معلوم است. برای کارهای آتی پیشنهاد می‌شود که این موضوع مد نظر قرار گیرد.

۷. مراجع‌ها

- [1] Teimouri, M.; Kakaei Motlagh, H. R.; Haddadi M. "Blind Recognition of BCH Product Codes"; Tabriz J. Electrical Eng. 2017, 47, 49-54.
- [2] Marey, M.; Dobre, O.; Inkol R. "Cyclostationarity-Based Blind Classification of STBCs for Cognitive Radio Systems"; Proc. IEEE ICC 2012, 1715-1720.
- [3] Choqueuse, V.; Marazin, M.; Collin, L.; Yao, K. C.; Burel, G. "Blind Recognition of Linear Space-Time Block Codes: A Likelihood-Based Approach"; IEEE Trans. Signal Processing 2010, 58, 1290-1299.

کد متعامد چهار آنتنی (STBC3):

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 \\ s_3^* & 0 & -s_1^* \\ 0 & -s_3^* & s_2^* \end{pmatrix}$$

کد متعامد هشت آنتنی (STBC4):

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 \\ -s_3 & s_4 & s_1 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 \\ s_1^* & s_2^* & s_3^* \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* \\ -s_3^* & s_4^* & s_1^* \\ -s_4^* & -s_3^* & s_2^* \end{pmatrix}$$

کد شبه متعامد چهار آنتنی (QSTBC1):

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ -s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \\ s_4 & -s_3 & -s_2 & s_1 \end{pmatrix}$$

کد شبه متعامد چهار آنتنی (QSTBC2):

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ s_3 & s_4 & s_1 & s_2 \\ -s_4^* & s_3^* & -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix}$$