

Improvement of Security in Wireless Communication Networks with Directional Modulation and Artificial Noise

H. R. Khodadadi*, S. Falsafi

*Associate Professor, Imam Hossein University (AS), Tehran, Iran

(Received: 24/09/2021, Accepted: 11/12/2021)

ABSTRACT

Directional modulation (DM) is an emerging technology for securing wireless communication at the physical layer and is mostly used in the line of sight propagation channels such as millimeter wave communications, next-generation cellular, satellite, and radar networks. This promising technology, unlike key-based cryptographic methods and the key-based physical layer security approaches, locks information signals without any requirement of keys. The locked information can only be fully recovered by the legitimate receiver(s) priory known by DM transmitters. This technology can be implemented in different ways. In the phased array method, modulation is implemented in the antenna. In this method by changing the phase of each element, the angle-dependent modulation is constructed. for this reason, the modulation constellation points in the undesired directions are distorted and deviate from the standard mode.

In this article, DM is implemented in the baseband by using the orthogonal vector method and separating the information radiation pattern from the interference radiation pattern (random artificial noise). This is a new method for simultaneously sending several signals with DM and random artificial noise. In this method, the bit error rate (BER) probability in the direction of the legitimate receiver(s) is improved from 10^{-3} to 10^{-5} and at least the signal secrecy rate is also increased one bit per second per hertz (bandwidth unit). Also, the results of the simulations show that as the number of antennas increases, the secrecy rate increases, the amount of power allocated to artificial noise decreases, and the power efficiency of the transmitter increases .

Keywords: False data, cyber-attacks, deep learning, problem dimension reduction.

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

بهبود امنیت در شبکه‌های مخابرات بی‌سیم با مدولاسیون جهتی و نویز مصنوعی

حمیدرضا خدادادی^{۱*}، سپهدار فلسفی^۲

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی دکترا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۰)

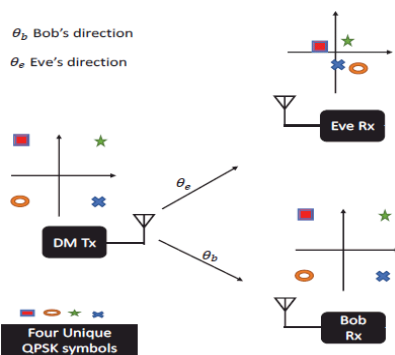
چکیده

مدولاسیون جهتی یک فناوری در حال ظهور برای امنیت مخابرات بی‌سیم در لایه فیزیکی است و بیشتر در کانال‌های انتشار دید مستقیم مانند ارتباطات موج میلی‌متری، شبکه‌های سلولار نسل آینده، ماهواره و رادار کاربرد دارد. این تکنولوژی اطمینان‌بخش برخلاف روش‌های رمزنگاری مبتنی بر کلید، سیگنال‌های اطلاعاتی را بدون نیاز به کلید قفل می‌نماید. اطلاعات قفل شده تنها توسط گیرنده یا گیرنده‌های مجاز و شناخته شده برای فرستنده، قابل بازیابی است. این فناوری به روش‌های مختلفی قابل پیاده‌سازی است. در روش آرایه فازی، پیاده‌سازی مدولاسیون در آنتن انجام می‌شود. در این روش با تغییر فاز هر آنتن آرایه، مدولاسیون وابسته به زاویه انتشار می‌شود و به همین دلیل صورت فلکی سیگنال در جهت غیرمجاز دچار اعوجاج و از حالت استاندارد خارج می‌گردد. در این مقاله با استفاده از روش بردار متعامد و جداسازی الگوی تشعشعی اطلاعات و الگوی تداخل (نویز مصنوعی تصادفی)، ضمن اجرای مدولاسیون جهتی در باند پایه، روش جدیدی برای ارسال هم‌زمان چندین سیگنال با مدولاسیون جهتی همراه با نویز مصنوعی تصادفی ارائه شده است، به طوری که احتمال خطای بیت در جهت گیرنده‌های مجاز از 10^{-3} به 10^{-5} بهبود یافته است و نرخ محرمانگی سیگنال نیز حداقل یک بیت بر ثانیه بر هر ترز (واحد پهنای باند) افزایش یافته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد آنتن‌های فرستنده باعث افزایش نرخ محرمانگی و کاهش میزان اختصاص توان به نویز مصنوعی و در نتیجه باعث افزایش کارایی توان فرستنده می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: مدولاسیون جهتی، آنتن آرایه‌ای، امنیت لایه فیزیکی و نویز مصنوعی

۱- مقدمه

با توجه به تکامل و فراگیر شدن سریع فناوری شبکه‌های موبایل، خودروهای بدون سرنشین، اینترنت اشیا و پزشکی از راه دور؛ رقابت‌های آینده بر بهره‌برداری حداکثری از طیف فرکانس و ارتباطات بی‌سیم خواهد بود. حملات امنیتی غیرفعال ارتباطات بی‌سیم شامل استراق سمع و تحلیل ترافیک می‌باشد، به همین دلیل سیگنال منتشره به راحتی توسط گیرنده‌های غیرمجاز نیز قابل دریافت و شنود خواهد بود [۱]. یکی از روش‌های امنیت در لایه فیزیکی، استفاده از DM یا «مدولاسیون جهتی»^۱ است. DM یک تکنولوژی سمت فرستنده است که قادر است سیگنال‌های اطلاعاتی مدوله شده دیجیتال را به ارتباطات محرمانه برای جهت‌های از پیش تعیین شده در فضای آزاد تصویر کند، در حالی که فرمت همین سیگنال‌ها در سایر جهت‌ها را تحریف می‌کند تا با چنین روشی احتمال ره‌گیری سیگنال را کاهش دهد. به عنوان مثال خروجی اطلاعات یک سیستم DM با مدولاسیون QPSK به صورت شکل (۱) است که در آن تقارن مرکزی و استاندارد الگوی صورت فلکی مدولاسیون QPSK، در جهت‌های غیر از θ_b حفظ نمی‌شود [۲].



شکل (۱). صورت فلکی مدولاسیون QPSK در جهت‌های مختلف [۳]

دو ویژگی اصلی فرستنده DM، حفظ فرمت سیگنال ارسالی در جهت از پیش تعیین شده و تحریف الگوی صورت فلکی در سایر جهات است.

اولین روش مدولاسیون جهتی، مدولاسیون مستقیم میدان نزدیک آنتن (NFDAM)^۲ یا DM با تنظیم ساختار تشعشعی غیرفعال نام دارد که شامل یک آنتن دوقطبی و تعدادی بازتابنده است که روی هر بازتابنده تعدادی سویچ قرار دارد. با تغییر الگوی تشعشعی آنتن به ازای هر سمبول به وسیله قطع و وصل کردن سویچ‌ها، مانع ارسال مشابه در جهت‌های مختلف شده و بدین صورت مخابره جهت‌دار می‌شود [۴]. این روش دارای حسن

* رایانامه نویسنده مسئول: Hkhdadi@ihu.ac.ir

² Near field Direct Antenna Modulation

¹ Directional Modulation

شکل دهی پرتو و ASM (موارد زیر) می باشد [۱۲]:

- فرستنده باید از پیش جهت گیرنده را به دست آورد.
- گیرنده‌ها فقط می توانند به صورت گسسته در برخی از جهت های مکانی به منظور حفظ متعامد بودن اطلاعات و تداخل های مصنوعی، قرار گیرند.

برای امنیت بیشتر و وابسته نمودن امنیت به فاصله (علاوه بر زاویه یا جهت)، روش های DM با فرکانس های متفاوت برای هر آنتن آرایه (FDA)^۳ همراه با نویز مصنوعی و DM با کمک گیرنده همکار (CR)^۴ پیشنهاد شده است. در DM-LFDA، فرکانس هر آنتن آرایه نسبت به آنتن مرجع دارای تغییر خطی بسیار کوچکی (نسبت به فرکانس حامل) است به همین دلیل فاکتور آرایه تابعی از زاویه و فاصله است [۱۳]. برای رفع مشکل همبستگی DM-LFDA با فرکانس تصادفی (RFDA) همراه با نویز مصنوعی پیشنهاد گردید. در این روش فرکانس هر آنتن آرایه نسبت به آنتن مرجع به صورت تصادفی تغییر می نماید و نواحی غیرمجاز، با نویز مصنوعی پوشش داده می شود [۱۴-۱۵] روش DM-OFDM با استفاده از IFFT/FFT روشی برای کاهش تعداد زنجیره RF، کاهش هزینه و کاهش پیچیدگی نسبت به RFDA است [۱۶].

در DM-CR، گیرنده مجاز به صورت تصادفی از یک مجموعه ضرایب اعوجاج از پیش تعریف شده برای شکل دهی پرتو برای گیرنده های همکار استفاده می نماید [۱۷]. در [۱۸]، لینک فرسوی شبکه با دسترسی چندگانه غیر متعامد با استفاده از DM و نویز مصنوعی به گونه ای طراحی شده است که تعداد نقاط صورت فلکی مدولاسیون در جهت گیرنده غیرمجاز بسیار کمتر از تعداد نقاط واقعی مدولاسیون است.

در [۱۹] میزان خطای تخمین زاویه در محاسبه نرخ خطای بیت برای یک گیرنده مجاز محاسبه شده است در [۲۰] نیز برای چندین گیرنده مجاز توسعه داده شده است. در [۲۱] و [۲۲] چگونگی اختصاص توان بهینه به سیگنال های اصلی و نویز مصنوعی تحلیل شده است.

در این مقاله $(0)^+$ ، $(0)^T$ ، $(0)^H$ و I_N به ترتیب نمایانگر معکوس مور-پنروز^۵، ترانهاده، ترانهاده مزدوج و ماتریس همانی هستند.

۲- اساس فناوری مدولاسیون جهتی

به طور کلی تشعشعات میدان دور ناشی از آنتن آرایه ای در فضای یک بعدی برای N آنتن، برابر با مجموع میدان الکتریکی همه آنتن ها و به صورت زیر محاسبه می شود:

یک زنجیره RF است اما در فرکانس های پایین قابل استفاده نیست، روش سنتز مؤثر و کارآمدی ندارد و نیازمند سویچ های بایاس و حافظه است.

در DM با تنظیم ساختار تشعشعی فعال به جای بازتاب کننده های غیرفعال NFDAM، آنتن های فعال قرار دارد. با تغییر حالت سویچ ها برای هر سمبول، الگوی تشعشعی آنتن تغییر می کند. این روش، به چندین زنجیره RF نیاز دارد و تنظیم سرعت قطعات RF با نرخ ارسال سمبول مشکل است [۵]. در روش پرتو دوتایی، دیتاهای I و Q مدولاسیون به وسیله آنتن های مختلف ارسال می شود [۶].

در DM آرایه فازی با تنظیم تحریکات آرایه توسط تضعیف کننده ها و شیفت دهنده های فاز، الگوهای میدان دور برای هر تنظیم آرایه به دست می آید. استفاده از شیفت دهنده فاز دیجیتال به جای آنالوگ باعث اجرای آسان، سادگی، کاهش هزینه، کاهش پیچیدگی و عملی شدن سخت افزار می شود اما به دلیل حالت های محدود در انتخاب شیفت فاز، تعداد گیرنده ها محدود می شود [۷]. روش بردار متعامد یا باند پایه دیجیتال برخلاف روش های قبل در باند پایه پیاده سازی می شود. این روش باعث رفع مشکلات DM آرایه فازی و تسهیل DM در سیستم های دیجیتال مدرن می شود [۸]. در [۹] الگوهای تشعشعی میدان دور به الگوهای اطلاعات و الگوهای تداخل جداسازی می گردد. تفاوت های آن با بردار متعامد، تمرکز توان تداخلی در امتداد چندین جهت به جای کل فضا، عدم توانایی کنترل دقیق بهره روری توان و غیرقابل استفاده در حالت چندمسیری و فقط برای فضای آزاد است.

روش های سنتز آزاد شامل شبکه شکل دهی پرتو فوریه^۱ و آرایه های بازگردان^۲ (RDAs) می باشد. در روش ASM با قرار دادن یک سویچ قبل از آنتن ها، یک زیرمجموعه از آنتن های آرایه برای ارسال هر سمبول انتخاب می شود. این روش فقط به M (کمتر از تعداد آنتن فرستنده) زنجیره RF نیاز دارد و بهره شکل دهی پرتو آن کاهش می یابد [۱۰]. شبکه های شکل دهی پرتو فوریه، ماتریس باتلر و لنزهای روتمن فوریه با قابلیت متعامد کردن پرتو، باعث تحریف سیگنال در امتداد جهت های غیر از جهت مورد نظر می شوند [۱۱]. RDAها در پاسخ به سیگنال بازجویی، پرتو خود را به صورت خودکار و بدون نیاز به الگوریتم محاسباتی حجیم یا سخت افزارهای مبتنی بر تغییر فاز، هدایت می کنند و شکل دهی پرتو بدون داشتن هیچ اطلاعاتی از منبع حاصل می شود و این سادگی، باعث ردیابی سریع منبع می شود. روش آرایه های بازگردان قادر به غلبه بر ضعف شبکه های

³ Frequency Diverse Array Antenna

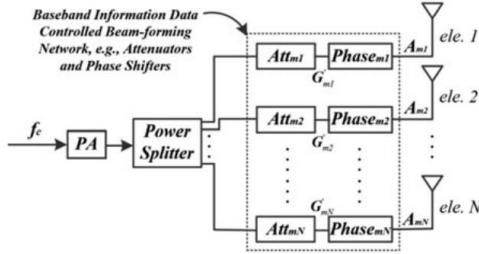
⁴ Cooperative Receivers

⁵ Moore-Penrose Inverse

¹ Antenna Subset Modulation

² Retrodirective Arrays

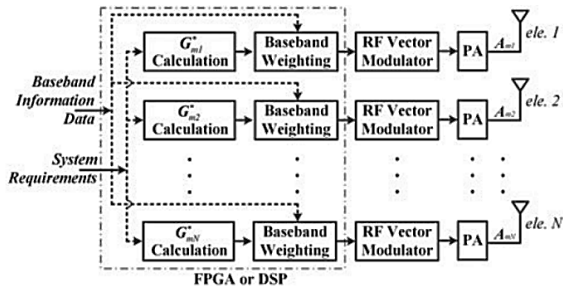
از دیدگاه معماری آنالوگ یا مهندسی مغناطیس (شکل ۳)، $D_m A_{mn}^*$ را می‌توان به‌عنوان بهره مختلط از یک دیتای اطلاعات باند پایه در نظر گرفت که شبکه شکل‌دهی پرتو را کنترل می‌نماید.



شکل (۳). معماری DM آنالوگ [۲]

از دیدگاه پردازش سیگنال یا معماری دیجیتال (شکل ۴)، $D_m G_{mn}^*$ را می‌توان به‌عنوان داده m وزن دار شده منحصربه‌فرد که به آنتن آرایه m تغذیه می‌شود، در نظر گرفت. این وزن‌دهی در باند پایه و پیش از تبدیل به فرکانس باند بالا، انجام می‌شود. به همین دلیل، $E(\theta)$ را می‌توان به‌عنوان یک نقطه صورت فلکی در فضای IQ در سمت گیرنده در نظر گرفت که به‌صورت $C_m(\theta)$ برای سمبول m می‌باشد.

$$C_m(\theta) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \frac{(A_{nm} \cdot e^{jn\pi \cos \theta})}{B_{nm}(\theta)} \quad (5)$$



شکل (۴). معماری فرستنده‌ی DM دیجیتال [۲]

برای هر سمبول، جمع بردارهای B_{nm} باید نقطه صورت فلکی استاندارد C_m^{st} در امتداد جهت θ_d باشد. با اسکن زاویه θ ، مسیر صورت فلکی در فضای IQ برای سمبول m به دست می‌آید [۲].

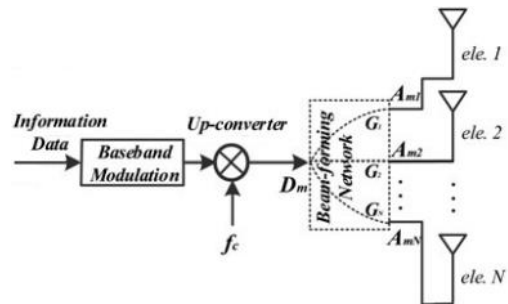
روش بردار متعامد در [۲] استفاده شده است به این مفهوم که بردارهای تحریک آنتن برای ارسال یک سمبول در زمان‌های مختلف به‌گونه‌ای هستند که تفاضل آن‌ها بر بردار کانال بین گیرنده و فرستنده عمود است. در [۹] و [۱۱]، معماری آنالوگ یک پرتوی یعنی فقط برای یک گیرنده انجام می‌شود. در [۱۰] از آنتن آرایه فازی سوئیچی استفاده شده است یعنی مدولاسیون آن همانند آنتن آرایه فازی انجام می‌شود اما در سوئیچ خروجی یک یا تعدادی از آنتن‌ها با توجه به نوع سمبول‌ها

$$E(\theta) = \frac{e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}}}{|\vec{r}|} \begin{bmatrix} AP_1(\theta) \\ AP_2(\theta) \\ \vdots \\ AP_N(\theta) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_1 e^{-j\vec{k} \cdot \vec{x}_1} \\ A_2 e^{-j\vec{k} \cdot \vec{x}_2} \\ \vdots \\ A_N e^{-j\vec{k} \cdot \vec{x}_N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

K بردار عدد موج، x_n ، r به ترتیب فاصله آنتن آرایه m و بردار مکان گیرنده نسبت به مرکز فاز آرایه می‌باشند. $E(\theta)$ فقط از دو طریق قابل تغییر است؛ اول با تنظیم الگوی تشعشی هر آنتن یعنی AP_n که DM با ساختار تشعشی قابل تنظیم نام دارد و دوم از طریق A_n یعنی به‌روزرسانی تحریک آنتن‌های آرایه که DM با تحریک‌های قابل تنظیم نام دارد. با فرض همسانگرد بودن الگوی تشعشی آنتن‌ها ($AP_n = 1$) و یکنواختی فاصله آنتن‌های آرایه ($|d_{n-1} - d_n| = \frac{\lambda}{2}$)، $E(\theta)$ تنها با A_n محاسبه می‌شود یعنی:

$$E(\theta) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} (A_n e^{jn\pi \cos \theta}) \quad (2)$$

در یک فرستنده غیر DM دارای آرایه با آنتن‌های فعال (شکل ۲)، داده‌های اطلاعاتی به‌صورت دیجیتال در باند پایه مدوله و به فرکانس‌های RF تبدیل و سپس از طریق شبکه شکل‌دهی پرتو به‌طور یکنواخت در آنتن‌های آرایه توزیع می‌شوند [۲].



شکل (۲). معماری آرایه فرستنده "DM معمولی" [۲]

بنابراین E_m مقیاسی از داده‌های مدوله شده D_m در هر جهت است. زیرنویس m مربوط به m امین سمبول ارسالی است. در نتیجه فرمت مدولاسیون در تمام جهات فضایی حفظ می‌شوند.

$$E_m(\theta) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \left(\frac{D_m \cdot G_n^*}{A_{mn}} \cdot e^{jn\pi \cos \theta} \right) \quad (3)$$

$$= D_m \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} (G_n^* \cdot e^{jn\pi \cos \theta})$$

در فرستنده DM، برای دستیابی به ارسال با فرمت‌های وابسته به جهت، A_n به‌عنوان A_{mn} معرفی می‌شود که با نرخ مدولاسیون D_m به‌روزرسانی می‌شود.

$$E_m(\theta) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \left((D_m G_{mn}^*) \cdot e^{jn\pi \cos \theta} \right) \quad (4)$$

$$G_j = \sum_{n=1}^2 (\sqrt{\beta_1} G_{\theta_n} x_{jn}) + \sqrt{\beta_2} w \quad (9)$$

x_{jn} سمبول ارسالی زام برای گیرنده n ام با مدولاسیون مربوطه و β ها ضرایب تخصیص توان می‌باشند. w بردار نویز مصنوعی تصادفی و دارای اندازه $N \times 1$ می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$w = w_{an} z \quad (10)$$

z نویز مصنوعی تصادفی مختلط گوسی که متناسب با نرخ ارسال سمبول بروز می‌شود و w_{an} بردار شکل‌دهی نویز است به طوری که:

$$h_n^H w_{an} = 0 \quad (11)$$

بر اساس تعریف DM، برداری ستونی که شامل الگوهای تشعشی مورد نظر برای هر کدام از جهت‌های ارسال است یعنی:

$$E = [E(\theta_1), E(\theta_2)]^T = \begin{bmatrix} h_1^H(\theta_1) \\ h_2^H(\theta_2) \end{bmatrix} [G_j] \quad (12)$$

اگر P_S مقدار کل توان فرستنده باشد، سیگنال ارسالی برابر است با:

$$y = \sqrt{P_S} \left(\sum_{n=1}^2 (\sqrt{\beta_1} G_{\theta_n} x_{jn}) + \sqrt{\beta_2} w \right) \quad (13)$$

۳-۱- شبیه‌سازی و کارایی سیستم

اگر مدل سیستم پیشنهادی برای دو گیرنده مجاز در زوایای θ_1 و θ_2 بررسی و شبیه‌سازی گردد، بردارهای هدایت کانال برای ارسال هم‌زمان دو جریان دیتای مستقل در جهت‌های θ_1 و θ_2 ($\theta_1, \theta_2 \in [0, \pi]$)، $\theta_1 \neq \theta_2$ به شرح زیر است [23].

$$h_1(\theta_1) = \begin{bmatrix} e^{j2\left(\frac{N-1}{2}\right)\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta_1} \dots e^{j2\left(\frac{N-1}{2}-(N-1)\right)\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta_1} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

$$h_2(\theta_2) = \begin{bmatrix} e^{j2\left(\frac{N-1}{2}\right)\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta_2} \dots e^{j2\left(\frac{N-1}{2}-(N-1)\right)\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta_2} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

بردارهای تحریک آرایه در جهت‌های θ_1 و θ_2 عبارتند از:

$$G_{\theta_1} = \frac{1}{\|h_1(\theta_1)\|^2} [I_N - (h_2^H(\theta_2))^\dagger h_2^H(\theta_2)] h_1(\theta_1) \quad (16)$$

$$G_{\theta_2} = \frac{1}{\|h_2(\theta_2)\|^2} [I_N - (h_1^H(\theta_1))^\dagger h_1^H(\theta_1)] h_2(\theta_2) \quad (17)$$

کل سیگنال تحریک آرایه فرستنده DM به صورت زیر است.

$$G_i = \sqrt{\beta_1} G_{\theta_1} x_{i1} + \sqrt{\beta_1} G_{\theta_2} x_{i2} + \sqrt{\beta_2} w \quad (18)$$

x_{i1} و x_{i2} به ترتیب سیگنال‌های با مدولاسیون BPSK و QPSK و β ها ضرایب تنظیم توان هستند به طوری که

$$\beta_1 + \beta_1 + \beta_2 = 1 \quad (19)$$

غیرفعال می‌شوند و این پردازش سویچینگ از نرخ ارسال سمبول مستقل است یعنی بین نرخ ارسال دیتا و سرعت سویچینگ همبستگی وجود ندارد.

در این مقاله با استفاده از روش تعامد و جداسازی الگوی تشعشی اطلاعات اصلی از الگوی تداخل، یک معماری دیجیتال جدید برای به‌کارگیری مدولاسیون جهتی در باندپایه برای پوشش چندین گیرنده در حالت انتشار دیدمستقیم (LOS) ارائه می‌شود که با طراحی مناسب نویز مصنوعی (AN) تصادفی و ارسال آن همراه با سیگنال‌های اصلی، نرخ محرمانگی سیگنال در برابر گیرنده‌های غیرمجاز بهبود می‌یابد و این نویز که توان آن متناسب تعداد آنتن فرستنده تغییر می‌نماید، شنود اطلاعات برای گیرنده‌های غیرمجاز را مشکل‌تر می‌نماید.

۳- مدل سیستم پیشنهادی

یک کانال پخش با یک ایستگاه پایه دارای آنتن آرایه خطی با N آنتن و ۲ گیرنده مجاز تک آنتنه در جهت‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. هر جهت دارای جریان دیتای مستقل با مدولاسیون‌های دیجیتال و زاویه‌های ارسال نسبت به ایستگاه پایه برابر با θ_i ($i = 1, 2$) هستند. بردار $G = [G_{\theta_1}(k), G_{\theta_2}(k)]^T$ نشان‌دهنده وزن‌های مختلط آرایه آنتن می‌باشد. بر اساس ایده DM، $E(\theta_i, k) = x_i(k)$ که $x_i(k)$ سمبول ارسالی برای گیرنده n ام و E مقدار الگوی تشعشی آنتن در زاویه θ_i می‌باشد که برابر است با:

$$E(\theta_i, k) = h_i^H(\theta_i) G_i(k) \quad (6)$$

با فرض یک بودن ضرایب تضعیف، بردار هدایت کانال برای گیرنده n ام که در جهت θ_i ($\theta_i \in [0, \pi]$) قرار دارد برابر است با:

$$h_i(\theta_i) = \begin{bmatrix} e^{j2\left(\frac{N-1}{2}\right)\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta_i} \dots e^{j2\left(\frac{N-1}{2}-(N-1)\right)\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta_i} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

d فاصله بین آنتن‌های مجاور است. در این سیستم، بردار تحریک آرایه برای راستای θ_i ($n \neq i$) را به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$G_{\theta_i} = \frac{1}{\|h_i(\theta_i)\|^2} [I_N - (h_n^H(\theta_n))^\dagger h_n^H(\theta_n)] h_i(\theta_i) \quad (8)$$

این نوع جهت‌دهی الگو تشعشی باعث می‌شود که اطلاعات ارسالی برای گیرنده‌های مختلف که در جهت‌های متفاوت هستند، روی همدیگر اثر هم‌شنوایی نداشته باشند [۲۳]. سیگنال کلی تحریک آرایه آنتن فرستنده DM برای ارسال هم‌زمان سمبول زام برای گیرنده‌ها به صورت زیر است.

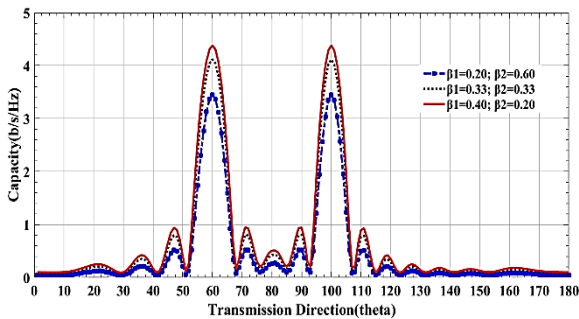
بر اساس شکل (۵) و (۶) و با وجود نویز تصادفی، سیگنال‌ها در زوایای ۶۰ و ۱۰۰ درجه دارای یک دامنه با مقدار واحد هستند و همچنین در این زوایا به ترتیب فقط فازهای مدولاسیون‌های BPSK و QPSK وجود دارد. در دیگر زوایا، فازها و دامنه‌های مختلف و بهم‌ریخته است به همین دلیل آشکارسازی سیگنال در زاویه‌های ۶۰ و ۱۰۰ درجه آسان خواهد بود.

۳-۱-۲- ظرفیت

با توجه به نوع تحریک آرایه و وجود نویز مصنوعی تصادفی متناسب با هر سمبول ارسالی و متعام بودن بردارهای تحریک، ظرفیت سیستم به صورت زیر است.

$$C = \left[\log_2 \left(1 + \frac{\|\sqrt{\beta_1 P_S} h^H(\theta) G_{\theta_1} x_{i1}\|^2}{\|\sqrt{\beta_1 P_S} h^H(\theta) G_{\theta_2} x_{i2}\|^2 + \sigma_1^2} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{\|\sqrt{\beta_1 P_S} h^H(\theta) G_{\theta_2} x_{i2}\|^2}{\|\sqrt{\beta_1 P_S} h^H(\theta) G_{\theta_1} x_{i1}\|^2 + \sigma_2^2} \right) \right]^+ \quad (25)$$

ظرفیت شبیه‌سازی شده در جهت‌های مختلف به صورت شکل (۷) است که در زوایای ۶۰ و ۱۰۰ بیشترین نرخ وجود دارد.



شکل (۷). ظرفیت ارسال سیستم در زوایای مختلف

۳-۱-۳- نرخ خطای بیت

گیرنده استاندارد بر اساس این که سمبول در کدام یک از نواحی تصمیم باشد، آشکارسازی سمبول را انجام می‌دهد. در این مقاله با فرض گیرنده استاندارد، نرخ خطای بیت در زوایای مختلف برای ارسال هم‌زمان 10^5 سمبول QPSK و 10^5 سمبول BPSK شبیه‌سازی شده است. بر این اساس، احتمال خطای بیت در زوایای ۶۰ و ۱۰۰ درجه بسیار پایین است و در دیگر زوایا بسیار بالاست. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۸) و (۱۰) بهبود نتایج در مقایسه با [۲۲] کاملاً مشهود است مثلاً برای شرایط $\beta_1 = \beta_2$ ، احتمال خطای بیت در زاویه ۶۰ برای مدولاسیون BPSK و زاویه ۱۰۰ برای مدولاسیون QPSK، تقریباً 10^{-5} می‌باشد در حالی که در [۲۲]، احتمال خطا تقریباً 10^{-3} است.

Z نویز مصنوعی تصادفی مختلط گوسی و w_{an} بردار شکل‌دهی نویز مصنوعی است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$w = w_{an} Z \quad (20)$$

$$h_1^H w_{an} = 0 \quad \text{and} \quad h_2^H w_{an} = 0 \quad (21)$$

سیگنال دریافتی در راستای $\theta = \theta_1$ و $\theta = \theta_2$ برابر است با:

$$y_{\theta_1} = \sqrt{P_S} h_1^H(\theta_1) G_i + n_1 = \sqrt{P_S} h_1^H(\theta_1) (\sqrt{\beta_1} G_{\theta_1} x_{i1} + \sqrt{\beta_2} w) + n_1 = \sqrt{\beta_1 P_S} h_1^H(\theta_1) G_{\theta_1} x_{i1} + n_1 \quad (22)$$

$$y_{\theta_2} = \sqrt{P_S} h_2^H(\theta_2) G_i + n_2 = \sqrt{P_S} h_2^H(\theta_2) (\sqrt{\beta_1} G_{\theta_1} x_{i1} + \sqrt{\beta_2} w) + n_2 = \sqrt{\beta_1 P_S} h_2^H(\theta_2) G_{\theta_2} x_{i2} + n_2 \quad (23)$$

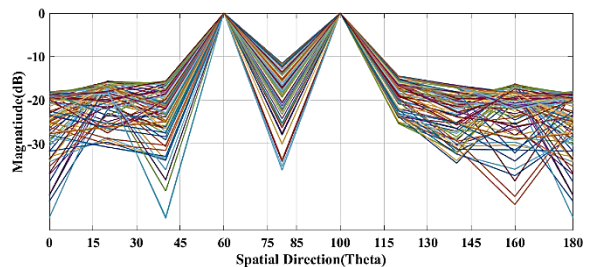
و در راستاهای $\theta \neq \theta_1$ و $\theta \neq \theta_2$ برابر است با:

$$y_e = \sqrt{P_S} h^H(\theta) G_i + n_e = \sqrt{P_S} h^H(\theta) (\sqrt{\beta_1} G_{\theta_1} x_{i1} + \sqrt{\beta_2} w) + n_e \quad (24)$$

n_1 ، n_2 و n_e سیگنال‌های نویز جمع‌شونده گوسی با توزیع یکسان و مستقل با واریانس‌های σ_1^2 ، σ_2^2 و σ_e^2 می‌باشند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده این واریانس‌ها برابر فرض شده‌اند.

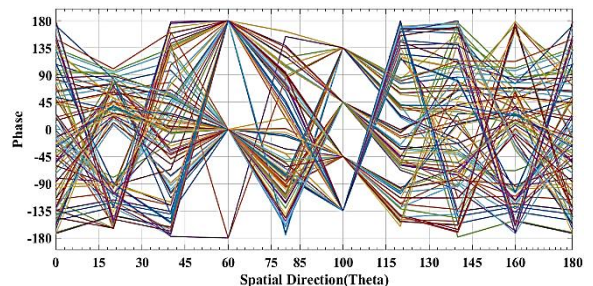
۳-۱-۳-۱- آشکارسازی

اگر تعداد آنتن‌های فرستنده ۱۶، $\theta_1 = 60$ ، $\theta_2 = 100$ ، $d = \frac{\lambda}{2}$ ، $\beta_1 = \beta_2$ تعداد ۱۰۰ سمبول BPSK و ۱۰۰ سمبول QPSK به طور هم‌زمان ارسال گردد، بر اساس روابط (۲۲)، (۲۳) و (۲۴) دامنه و فاز سیگنال دریافتی در زوایای مختلف به شرح زیر است.



شکل (۵). دامنه ۱۰۰ سیگنال تصادفی BPSK و ۱۰۰

سیگنال تصادفی QPSK در زوایای مختلف



شکل (۶). فاز ۱۰۰ سیگنال تصادفی BPSK و ۱۰۰

سیگنال تصادفی QPSK در زوایای مختلف

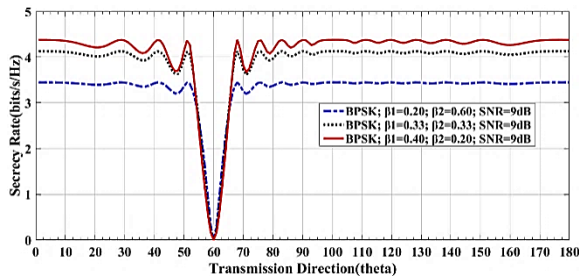
$\gamma(\theta_1)$ مقدار SINR در جهت $\theta = \theta_1$ و برابر است با:

$$\gamma(\theta_1) = \frac{\|\sqrt{\beta_1 P_S} h_1^H(\theta_1) G_{\theta_1} x_{i1}\|^2}{\sigma_1^2} \quad (29)$$

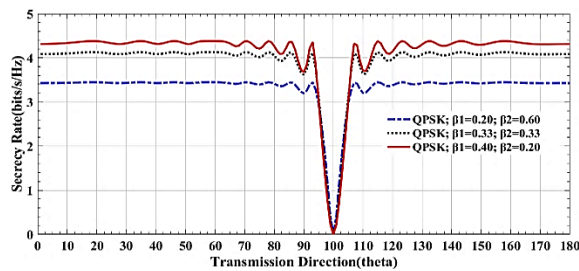
θ_1 جهت گیرنده مجاز ۱ و θ یک جهت انتخابی است. نرخ محرمانگی پیام x_{i1} به صورت زیر است:

$$R_{s|x_{i1}} = \left[\log_2 \left(1 + \frac{\|\sqrt{\beta_1 P_S} h_1^H(\theta_1) G_{\theta_1} x_{i1}\|^2}{\sigma_1^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{\|\sqrt{\beta_1 P_S} h^H(\theta) G_{\theta_2} x_{i2}\|^2 + \|\sqrt{\beta_2 P_S} h^H(\theta) w\|^2 + \sigma_2^2}{\|\sqrt{\beta_1 P_S} h^H(\theta) G_{\theta_2} x_{i2}\|^2 + \|\sqrt{\beta_2 P_S} h^H(\theta) w\|^2 + \sigma_2^2} \right) \right]^+ \quad (31)$$

نرخ محرمانگی x_{i2} نیز مثل x_{i1} قابل محاسبه است. با توجه به شکل (۱۲) و (۱۳) نرخ محرمانگی سیگنال x_{i1} و x_{i2} به ترتیب در زوایای ۶۰ و ۱۰۰ درجه نسبت به دیگر زاویه‌ها کمتر است و گیرنده غیرمجاز فقط در این زوایا امکان شنود سیگنال‌های مربوطه را دارد. در مقایسه با [۲۲] نرخ محرمانگی حداقل یک بیت بر ثانیه (در واحد پهناى باند یعنی هرتز) افزایش یافته است. اگر بر اساس [۲۴] به جای عمود بودن نویز بر کانال گیرنده‌های مجاز از نویز شناخته شده برای گیرنده‌های مجاز استفاده شود، می‌توان در زوایای ۶۰ و ۱۰۰ نیز نرخ محرمانگی را افزایش داد.

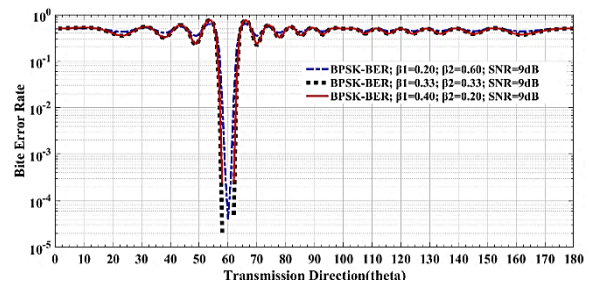


شکل (۱۲). نرخ محرمانگی سیگنال BPSK

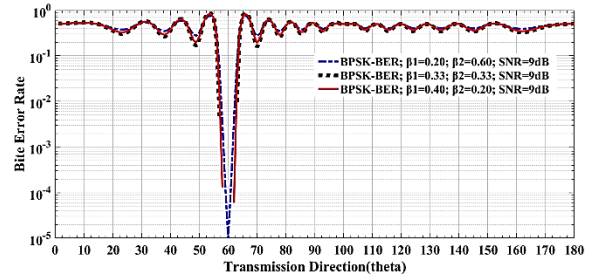


شکل (۱۳). نرخ محرمانگی سیگنال QPSK

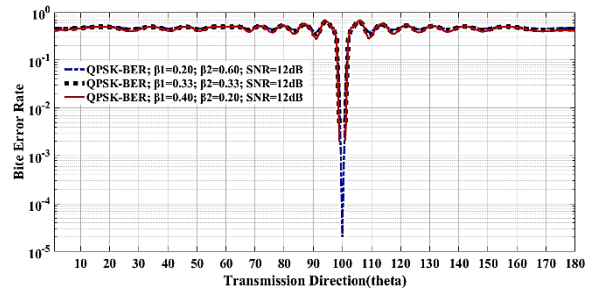
شکل (۱۴) شبیه‌سازی نمودار نرخ محرمانگی در برابر ضریب اختصاص توان سیگنال‌های اصلی (β_1) در حالت $SNR = 9\text{ dB}$ برای تعداد آنتن‌های مختلف فرستنده را نشان می‌دهد. این نمودارها یا توابع، مقعر می‌باشند به همین دلیل در بازه مربوطه تنها دارای یک مقدار بیشینه هستند. مقدار بهینه β_1 برای فرستنده با ۴، ۱۶ و ۶۴ آنتن به ترتیب برابر 0.3265 ، 0.2143 و 0.15 می‌باشد که حداکثر نرخ امنیت مربوط به این مقادیر به



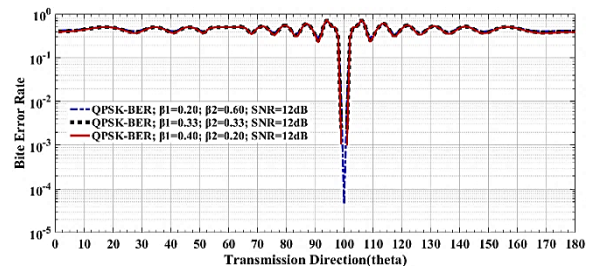
شکل (۸). نرخ خطای بیت BPSK با تلفیق DM و نویز مصنوعی



شکل (۹). نرخ خطای بیت BPSK بدون DM



شکل (۱۰). نرخ خطای بیت QPSK با تلفیق DM و نویز مصنوعی



شکل (۱۱). نرخ خطای بیت QPSK بدون DM

۳-۱-۴ - نرخ محرمانگی سیگنال

نرخ محرمانگی^۱ سیگنال هر گیرنده به صورت زیر است [۲۴].

$$R_s^m = [R_b^m - R_e^m]^+ \quad (26)$$

که از طریق این معادله می‌توان نرخ محرمانگی سیگنال کاربر یک که در جهت $\theta = \theta_1$ قرار دارد را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$R_s = [R(\theta_1) - R(\theta)]^+ \quad (27)$$

که $R(\theta)$ عبارت است از

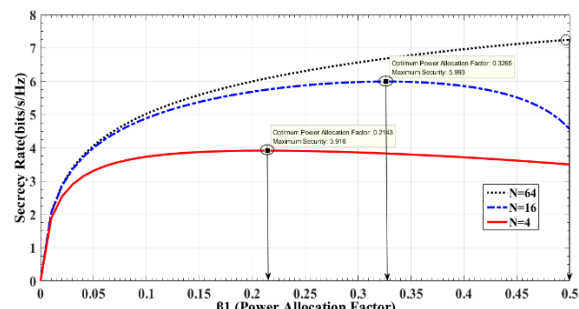
$$R(\theta) = \log_2(1 + \gamma(\theta)) \quad (28)$$

^۱ Secrecy Rate

۶- مراجع

- [1] Y. S. Shiu, S. Y. Chang, H. C. Wu, S. C. H. Huang, & H. H. Chen, "Physical layer security in wireless networks: A tutorial," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 2, pp. 66–74, 2011.
- [2] Y. Ding & V. Fusco, "A review of directional modulation technology," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 8, no. 7, pp. 981–993, 2016.
- [3] J. M. Hamamreh, H. M. Furqan, & H. Arslan, "Classifications and Applications of Physical Layer Security Techniques for Confidentiality: A Comprehensive Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1773–1828, 2019.
- [4] A. H. Chang, A. Babakhani, & A. Hajimiri, "Near-field direct antenna modulation (NFDAM) transmitter at 2.4GHz," *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, pp. 2–5, 2009.
- [5] M. P. Daly & J. T. Bernhard, "Beamsteering in pattern reconfigurable arrays using directional modulation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 7, pp. 2259–2265, 2010.
- [6] T. Hong, M. Z. Song, & Y. Liu, "Dual-beam directional modulation technique for physical-layer secure communication," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 1417–1420, 2011.
- [7] M. P. Daly & J. T. Bernhard, "Directional modulation technique for phased arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 9, pp. 2633–2640, 2009.
- [8] Y. Ding & V. F. Fusco, "A vector approach for the analysis and synthesis of directional modulation transmitters," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 361–370, 2014.
- [9] Y. Ding & V. F. Fusco, "Directional modulation far-field pattern separation synthesis approach," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 9, no. 1, pp. 41–48, 2015.
- [10] N. N. Alotaibi & K. A. Hamdi, "Switched Phased-Array Transmission Architecture for Secure Millimeter-Wave Wireless Communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 3, pp. 1303–1312, 2016.
- [11] Y. Zhang, Y. Ding, & V. Fusco, "Sidelobe modulation scrambling transmitter using fourier Rotman lens," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 7, pp. 3900–3904, 2013.
- [12] Y. Ding & V. Fusco, "A Synthesis-Free Directional Modulation Transmitter Using Retrodirective Array," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 11, no. 2, pp. 428–441, 2017.
- [13] J. Xiong, S. Y. Nusenu, & W. Q. Wang, "Directional Modulation Using Frequency Diverse Array For Secure Communications," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 95, no. 3, pp. 2679–2689, 2017.

ترتیب برابر با ۳/۹۱۶، ۵/۹۹۳ و ۷/۲۵ بیت بر ثانیه بر هر تتر است. قابل مشاهده است که با افزایش تعداد آنتن، نرخ امنیت و ضریب اختصاص توان به سیگنال اصلی افزایش و ضریب اختصاص توان به نویز مصنوعی کاهش می‌یابد. در مقایسه با [۲۱] نرخ محرمانگی در این روش، حداقل یک بیت افزایش یافته است.



شکل (۱۴). نرخ محرمانگی در برابر ضریب اختصاص توان و آنتن

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع معماری مدولاسیون جهتی مانند تنظیم ساختار تشعشعی، تنظیم تحریک آرایه، سنتز آزاد، بردار متعامد و جداسازی الگوی تشعشعی اطلاعات از الگوی تشعشعی تداخل بیان گردید. تنظیم ساختار تشعشعی آنتن به دلیل ساختار بزرگ و نبود تابع با فرم بسته برای پیاده‌سازی، کارایی ندارد. در روش آرایه فازی، مدولاسیون جهتی در آنتن انجام می‌شود و پرتو با استفاده از شیفت دهنده‌های آنالوگ و دیجیتال، به سمت هدف هدایت می‌شود. در روش بردار متعامد، مدولاسیون جهتی به جای آنتن در باند پایه پیاده‌سازی می‌گردد. در همه معماری‌ها، صورت فلکی سیگنال ارسالی فقط در جهت گیرنده مجاز به صورت استاندارد باقی می‌ماند و در سایر جهات، تحریف می‌گردد. در این مقاله از نویز مصنوعی برای ایجاد مدولاسیون جهتی در باند پایه استفاده گردید که بر بردار کانال گیرنده‌های مجاز عمود است به همین دلیل در آشکارسازی سیگنال در گیرنده‌های مجاز مزاحمتی ندارد. جهت‌دهی سیگنال‌های اصلی نیز به گونه‌ای است که اطلاعات ارسالی برای گیرنده‌های مجاز که در جهت‌های متفاوت هستند، روی همدیگر اثر هم‌شنوایی ندارند. علاوه بر موارد فوق، نرخ امنیت اطلاعات نسبت به دیگر روش‌ها و مقالات حداقل یک بیت بر ثانیه بر هر تتر افزایش یافته و احتمال خطا در جهت گیرنده‌های مجاز نیز حداقل $0.1 \cdot 10^{-5}$ (در برابر 10^{-3}) بهبود یافته است. با تلفیق DM و نویز مصنوعی احتمال خطای بیت در جهت‌های غیرمجاز نسبت به حالت فقط DM، افزایش و پهنای پرتو نیز کاهش می‌یابد. هر چه تعداد آنتن فرستنده افزایش یابد، توان موردنیاز برای اختصاص به نویز مصنوعی کمتر می‌شود اما نرخ محرمانگی سیگنال و کارایی توان افزایش می‌یابد.

- [20] F. Shu, X. Wu, J. Li, R. Chen, & B. Vucetic, "Robust synthesis scheme for secure multi-beam directional modulation in broadcasting systems," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6614-6623, 2016.
- [21] S. Wan, F. Shu, J. Lu, G. Gui, J. Wang, G. Xia, ... & J. Wang, "Power allocation strategy of maximizing secrecy rate for secure directional modulation networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 38794-38801, 2018.
- [22] X. Zhou, H. Wang, Q. Cheng, S. Wang, & L. Zheng, "Secure beamforming and power efficient artificial noise optimization for multi-beam directional modulation," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 32(1), e4156, 2021.
- [23] Y. Ding & V. Fusco, "Orthogonal vector approach for synthesis of multi-beam directional modulation transmitters," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, no. March, pp. 1330-1333, 2015.
- [24] M. A. Kamari, & H. R. Khodadadi, "Improving the Security in Cellular Communications Networks with Artificial Noise Addition by Non-Orthogonal Resource Allocation Techniques" *Journal of Electronical & Cyber Defence*, vol. 9, no. 2, pp. 135-142, 2021. (In Persian)
- [14] J. Xie, B. Qiu, Q. Wang, & J. Qu, "Broadcasting directional modulation based on random frequency diverse array," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [15] J. Gao, Z. Yuan, B. Qiu, & J. Zhou, "Secure Multi users Directional Modulation Scheme Based on Random Frequency Diverse Arrays in Broadcasting Systems," *Secure. Commun. Networks*, vol. 1, no. 11, 2020.
- [16] F. Shu, X. Wu, J. Hu, J. Li, R. Chen, & J. Wang, "Secure and Precise Wireless Transmission for Random- Subcarrier- Selection- Based Directional Modulation Transmit Antenna Array," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 4, pp. 890-904, 2018.
- [17] Y. Xiao, W. Tang, Y. Xiao, H. Zhang, G. Wu, & W. Xiang, "Directional modulation with cooperative receivers," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 34992-35000, 2018.
- [18] R. M. Christopher & D. K. Borah, "Physical Layer Security for Weak User in MISO NOMA Using Directional Modulation (NOMAD)," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 5, pp. 956-960, 2020.
- [19] J. Hu, F. Shu, & J. Li, "Robust Synthesis Method for Secure Directional Modulation with Imperfect Direction Angle," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 6, pp. 1084-1087, 2016.