



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 4, No. 1, pp.: 1-9  
2024

DOI:  
10.22034/jssta.2024.427804.1147

## Article Info

Received: 2023-12-02

Accepted: 2024-02-19

## Keywords

Beamforming of Time-Modulated Antenna Array using Convolutional Neural Networks

## How to Cite this article

M. Mashayekhi, H. Soleimani, I. Aryanian, "Beamforming of Time-Modulated Antenna Array using Convolutional Neural Networks", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 4 (1), p.: 1-9, 2024.

# Beamforming of Time-Modulated Antenna Array using Convolutional Neural Networks

Mohammad Mashayekhi<sup>1</sup>, Hossein Soleimani<sup>2\*</sup>, Iman Aryanian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.  
[m\\_mashayekhi76@iust.ac.ir](mailto:m_mashayekhi76@iust.ac.ir)

<sup>2</sup> \*School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.  
[hsoleimani@iust.ac.ir](mailto:hsoleimani@iust.ac.ir)

<sup>3</sup> Iran Telecommunication Research Center and Iran Space Research Center, Tehran, Iran.  
[aryanian@itrc.ac.ir](mailto:aryanian@itrc.ac.ir), [aryanian@isrc.ac.ir](mailto:aryanian@isrc.ac.ir)  
\* Corresponding Author

## Abstract

In this article, the synthesis of the two-dimensional radiation pattern of multi-beams in the time-modulated planar antenna array is discussed. With the aim of reducing the time of numerical calculations of multi-beam synthesis and eliminating the traditional and optimization approaches, which are mostly complicated and time-consuming, the convolutional neural network approach has been investigated. In this study, the simultaneous shaping of multiple beams as desired in the time modulated antenna array is presented for the first time. By using the method of switching elements and their time modulation, which is based on the Chabi-Sheff distribution, to use and realize multi-beams such as the fundamental beam and the first and second harmonics with low side lobe level and steering at different spatial angles, create various random data. After that patterns and modulations like them are stored. After that, by presenting and designing a model of the convolutional neural network, learning the model for the relationship between the main beam pattern and the first two harmonic patterns with the time modulation of each element has been done. The presented neural network has been able to learn the relationship between the time modulation parameters of the antenna array elements with the main beam patterns and the first and second harmonics with a mean square error of about 0.03. In order to evaluate this model, a random sample of data has been selected to give its patterns to the input of the network. The output of the network has estimated the time modulation sequence of each element. Finally, the modulation pattern of the estimated elements is compared with the main patterns of the comparison and shows the closeness of the original pattern to the estimated pattern. This method provides a good capability for arbitrary control of multiple beams for applications that require establishing multiple connections.



## شکل دهی پرتو آرایه آنتن مدوله شده زمانی با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشن

محمد مشایخی<sup>۱</sup>، حسین سلیمانی<sup>۲\*</sup>، ایمان آریانیان<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران m\_mashayekhi76@iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران hsoleimani@iust.ac.ir

۳- پژوهشگاه ارتباطات ایران و پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران aryanian@itrc.ac.ir , aryanian@isrc.ac.ir

\* نویسنده مسئول

دو فصلنامه

علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال چهارم، شماره ۱، صفحه ۹-۱  
بهار و تابستان ۱۴۰۳

DOI:

10.22034/jsssta.2024.427804.1147

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

واژه‌های کلیدی

شکل دهی پرتو، آرایه آنتن، مدوله  
شده زمانی، شبکه‌های عصبی  
کانولوشن

نحوه استناد به این مقاله

محمد مشایخی، حسین سلیمانی،  
ایمان آریانیان، "شکل دهی پرتو آرایه  
آنتن مدوله شده زمانی با استفاده از  
شبکه‌های عصبی کانولوشن"،  
دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای  
فضایی، جلد چهارم، شماره اول،  
صفحات ۹-۱، ۱۴۰۳.

### چکیده

در این مقاله به سنتز پترن تشعشی دوبعدی چند بیم در آرایه آنتن صفحه‌ای مدوله زمان می‌پردازیم. با هدف کاهش زمان محاسبات عددی سنتز چند بیم و حذف رویکردهای سنتی و بهینه‌سازی که به‌طور عمده پیچیدگی زیادی داشته و زمان‌بر بوده‌اند، رویکرد شبکه عصبی کانولوشنال مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، شکل دهی هم‌زمان چند بیم به‌صورت دلخواه در آرایه آنتن مدوله زمان برای نخستین بار ارائه شده است. ابتدا با استفاده از نحوه سویچینگ عناصر و مدولاسیون زمانی آن‌ها مبتنی بر توزیع چبی‌شف، برای تحقق چند بیم از قبیل بیم اصلی و هارمونیک اول و دوم با سطح گلبرگ فرعی پایین و در زاویه‌های فضایی مختلف، داده‌های تصادفی گوناگونی را ایجاد می‌نماییم. سپس با استفاده از این داده‌ها، پترن‌ها و مدولاسیون نظیر آن‌ها تولید شده است. پس از آن یک مدل شبکه عصبی کانولوشنال برای یادگیری رابطه بین پترن‌های بیم اصلی و دو هارمونیک اول با مدولاسیون زمان هر عنصر ارائه می‌شود. شبکه عصبی ارائه شده می‌تواند با میانگین توان دوم خطای حدود ۰.۰۳، رابطه بین پارامترهای مدولاسیون زمان عناصر آرایه آنتن با پترن‌های بیم اصلی و هارمونیک اول و دوم را یاد بگیرد. در راستای ارزیابی این مدل، یک نمونه تصادفی از داده‌ها انتخاب شده و مشخصات پترن آن به ورودی شبکه داده شود. خروجی شبکه، توالی مدولاسیون زمان هر عنصر را تخمین می‌زند. سپس مشخصات پترن به‌دست آمده از مقادیر تخمین زده شده مدولاسیون زمانی عناصر با پترن‌های اصلی مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مشخصات پترن به‌دست آمده از مقادیر تخمین زده شده به‌خوبی با مشخصات پترن اصلی مطابقت دارند. این روش قابلیت خوبی برای کنترل دلخواه چند بیم برای کاربردهایی که نیاز به ایجاد چندین ارتباط دارند فراهم می‌نماید.

## ۱- مقدمه

آرایه‌های آنتن مدوله زمان به‌طور گسترده در زمینه میدان و امواج کارایی داشته‌اند و دلیل آن توانایی آن‌ها در کاهش بسیار خوب سطح گلبرگ فرعی و هدایت پرتو بدون استفاده از شیفت دهنده فاز بوده است [3][2][1]. استفاده از مدولاسیون زمان باعث تولید هارمونیک‌هایی در اطراف فرکانس مرکزی می‌شود و از این جهت می‌توان به عنوان یک قابلیت در مخابرات ماهواره، سیستم‌های راداری و مخابرات بیسیم استفاده شود [8][7][6][5][4]. مزیت کلیدی آرایه‌های مسطح، توانایی آنها در هدایت پرتو در هر دو زاویه سمت و ارتفاع است، در نتیجه انعطاف‌پذیری در یافت و انتقال سیگنال را بهبود می‌بخشد [11][10][9].

در سال‌های اخیر، تکنیک‌های بهینه‌سازی مختلفی برای به دست آوردن سوئیچینگ بهینه برای آرایه آنتن به منظور کنترل بهتر بیم اصلی و پترن هارمونیک‌ها ارائه شده است [15][14][13][12]. با این حال، در این روش‌ها زمان بسیار زیادی برای بهینه‌سازی استفاده شده است و هرچه قدر که تعداد عناصر آرایه بیشتر شود، زمان بهینه‌سازی بیشتری نیز لازم است. اخیراً، شبکه‌های عصبی توانایی بالایی را در زمینه حل مسائل الکترومغناطیس از قبیل طراحی آنتن و شکل‌دهی بیم از خود به نمایش گذاشته‌اند [18][17][16] [23][22][21][20][19]. در این بین شکل‌دهی بیم آرایه آنتن را می‌توان به دو دسته شکل‌دهی بیم مستقیم و شکل‌دهی بیم معکوس تقسیم‌بندی کرد. در شکل‌دهی بیم مستقیم شبکه عصبی قادر به تخمین بسیار سریع نتایج شبیه‌سازی الکترومغناطیسی می‌باشد. برای نمونه در [18]، یک شبکه عصبی گراف برای یادگیری ساختار آرایه‌های مختلف و تخمین پترن تشعشعی هر کدام از دامنه، فاز و موقعیت عناصر آرایه ارائه شد. شکل‌دهی معکوس بیم، از شبکه عصبی برای تخمین دامنه و فاز سیگنال متناسب برای پترن تشعشعی دلخواه مطرح می‌شود [23-22]. این پیشرفت‌ها باعث بهبود ظرفیت طراحی و تحلیل در مسائل الکترومغناطیسی شده است.

شبکه‌های عصبی کانولوشنال سابقه بسیار درخشانی در پردازش تصاویر داشته‌اند [25][24]. در نتیجه قابلیت خوبی برای سنتز پترن تشعشعی دوبعدی در آرایه‌های صفحه‌ای با استفاده از

این مدل فراهم می‌شود. در [21] آرایه آنتن فازی ۸ در ۸ با آنتن پیچ میکرواستریپ ارائه شده است. فاز عناصر به نحوی تولید شده که بیم در زاویه ارتفاع بین ۰ تا ۴۵ درجه و در زاویه سمت بین ۰ تا ۳۶۰ چرخش داشته باشد. در این راستا حدود ۱۶۵،۰۰۰ نمونه تولید شده است. پترن هر نمونه بر حسب مقدار خطی و دبی ارائه شده است. در نهایت مدل CNN ارائه شده است که توانسته روابط بین فاز عناصر و پترن‌های تشعشعی را به خوبی یاد بگیرد. در [22] نیز یک آرایه صفحه‌ای با ۱۴۹ عنصر ارائه شده است و با روش بهینه‌سازی دامنه و فاز عناصر توانسته است بیم و نال پترن را کنترل نماید. حدود ۱۲۰،۰۰۰ نمونه تولید شده است در حالی که بیم اصلی در زاویه ارتفاع و سمت بین ۱۵- تا ۱۵ درجه، و زاویه چرخش نال بیم ۲/۵ تا ۱۰ درجه در ارتفاع و سمت تغییر کنند. در آخر، مدل CNN ارائه شده است که رابطه بین نمونه پترن‌های تشعشعی با دامنه و فاز را به خوبی یاد گرفته است. در [23] نیز یک آرایه ۸ در ۸ در نظر گرفته شده است و با روش Wiener ۱۳۰،۵۰۰ نمونه به ازای دامنه و فاز های مختلف تولید شده است. با این تفاوت که تمرکز اصلی بر روی نال گذاری در پترن تشعشعی بوده است و در نهایت با شبکه CNN، مدل را با داده‌ها آموزش داده و ارزیابی کرده است که نتایج قابل قبولی را نشان داده است.

اما در هیچ کدام از کارهای انجام شده، عناصر آرایه با سوئیچ‌های RF ترکیب نشده است. استفاده از مدولاسیون زمان باعث ایجاد هارمونیک‌های مختلف می‌شود و به نوعی تمام پترن‌ها قابل کنترل می‌باشند. در این مقاله، قصد داریم تا در یک آرایه ۵ در ۵ مدوله زمان با سوئیچینگ شیفت داده شده، پترن تشعشعی بیم اصلی، هارمونیک اول و دوم را توسط مدل CNN کنترل نماییم. استفاده از چند بیم قابلیت خوبی در کاربردهای مختلفی خواهد داشت. همچنین می‌توان مشکلات آنتن‌های آرایه فازی اعم از تلفات، هزینه و پیچیدگی را با استفاده از آرایه آنتن مدوله زمان بهبود بخشید.

## ۲- فرمولاسیون آرایه آنتن مدوله زمان

برای به دست آوردن فرمول آرایه آنتن صفحه‌ای مدوله زمان، عناصر آنتن را ایزوتروپیک در نظر می‌گیریم و از پترن تشعشعی آنتن بخصوص و کولپینگ آنها صرف‌نظر می‌کنیم. در نظر بگیریم که عناصر در صفحه  $yz$  قرار

(۴)

که برای  $q = 0$  برابر است با:

$$\xi_{0mn} = \frac{t_{mn}^2 - t_{mn}^1}{T_p} = \frac{\tau_{mn}}{T_p} \quad (۵)$$

که  $\tau_{mn}$  نشانگر عرض پالس است و برای  $q \neq 0$  برابر است با:

$$\xi_{qmn} = \frac{\tau_{mn}}{T_p} \text{sinc}(q\pi f_p \tau_{mn}) e^{-jq\pi f_p (2t_{mn}^1 + \tau_{mn})} \quad (۶)$$

فاکتور آرایه برای  $q = 0$  را پترن بیم اصلی می‌نامیم و برابر خواهد بود با:

$$AF_0(\theta, \phi, t) = e^{j2\pi f_0 t} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\tau_{mn}}{T_p} e^{j\beta_0(n d \sin \theta \sin \phi + m d \cos \theta)} \quad (۷)$$

فاکتور آرایه برای  $q$  امین هارمونیک یا باند کناری نیز برابر خواهد بود با:

$$AF_q(\theta, \phi, t) = e^{j2\pi (f_0 + f_p)t} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\tau_{mn}}{T_p} \text{sinc}(q\pi f_p \tau_{mn}) \dots e^{j\beta_0(n d \sin \theta \sin \phi + m d \cos \theta)} e^{-jq\pi f_p (2t_{mn}^1 + \tau_{mn})} \quad (۸)$$

از این رو سنتز بیم اصلی و هارمونیک‌ها را می‌توان با  $(\tau_{mn}, t_{mn}^1)$  محقق کرد.

### ۳- تولید داده

در تحقیقات گذشته توزیع چبی شیف برای سنتز بیم آرایه آنتن مدوله زمان استفاده شده است [26]. این قابلیت در آرایه های مدوله شده زمانی میتواند مقدار SLL را کاهش دهد بدون اینکه مشکلاتی از قبیل نسبت دامنه عناصر DRR ایجاد شود. در این مقاله با استفاده از این روش به تولید داده و یا پترن های مختلفی از بیم اصلی و هارمونیک اول و دوم خواهیم پرداخت. با این حال توزیع چبی شیف معمولاً برای بیم اصلی اعمال شده است. در این راستا، توزیع چبی شیف را برای هارمونیک اول اعمال کرده ایم تا هم بیم اصلی و هم هارمونیک اول از SLL مناسبی برخوردار باشند. اگر مقادیر توزیع چبی شیف برای یک آرایه

گرفته‌اند و ابعاد آرایه برابر است با  $M \times N$ ، به طوری که  $M$  تعداد عناصر در راستای محور  $z$  و  $N$  تعداد عناصر آرایه در راستای محور  $y$  می‌باشد. فاکتور آرایه  $y$  این ساختار به شکل زیر خواهد بود:

$$AF(\theta, \phi, t) = e^{j2\pi f_0 t} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} U_{mn}(t) e^{j\beta_0(n d \sin \theta \sin \phi + m d \cos \theta)} \quad (۱)$$

به طوری که  $\theta$  و  $\phi$  و  $t$  به ترتیب نشانگر زاویه ارتفاع، زاویه سمت و زمان می‌باشند. فرکانس مرکزی  $f_0$  است. پارامترهای  $m$  و  $n$  نشانگر اندیس عناصر آرایه هستند. عدد موج نیز  $\beta_0$  است و  $d$  فاصله عناصر از یک دیگر است که نصف طول موج در نظر گرفته شده است. تابع سوئیچینگ مبتنی بر زمان نیز با  $U_{mn}(t)$  نشان داده شده است. این تابع نشان می‌دهد که سوئیچ مرتبط با هر عنصر و با اندیس مشخص، در هر بازه زمانی، به چه صورت روشن یا خاموش است. برای این تابع خواهیم داشت:

$$U_{mn}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t_{mn}^1 \leq t \leq t_{mn}^2 \leq T_p \\ 0, & \text{other wise} \end{cases} \quad (۲)$$

در فرمول بالا،  $t_{mn}^1$  زمان وصل بودن سوئیچ و  $t_{mn}^2$  زمان قطع شدن سوئیچ است،  $T_p$  زمان تناوب سوئیچ‌ها و تکرار پالس‌ها می‌باشد که معکوس فرکانس سوئیچ‌زنی  $f_p$  است. این فرکانس بسیار کوچک‌تر از  $f_0$  است. توالی روشن و خاموش شدن متناوب سوئیچ‌ها قابلیت تفسیر تابع سوئیچ عناصر را در حوزه سری فوریه می‌دهد:

$$U_{mn}(t) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} \xi_{qmn} e^{jq(2\pi f_p)t} \quad (۳)$$

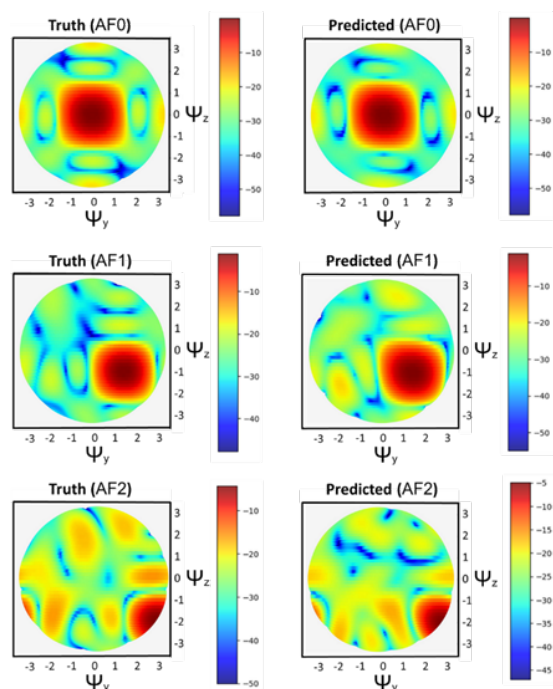
به طوری که  $q$  مرتبه باندهای کناری یا هارمونیک‌های ایجاد شده است. پارامتر  $\xi_{qmn}$  نیز ضریب دامنه فوریه برای هر عنصر و هر هارمونیک بوده که برابر است با:

$$\xi_{qmn} = \frac{1}{T_p} \int_{t_{mn}^1}^{t_{mn}^2} U_{mn}(t) e^{-jq2\pi f_p t} dt$$



(۱۲)

استخراج شده است. بر اساس مشخصات سوئیچینگ تخمین زده شده، پترن تشعشعی بیم اصلی و دو هارمونیک اول کشیده شده است (Predicted). زمان تخمین چنین خروجی حدود ۱ میلی‌ثانیه بوده است.

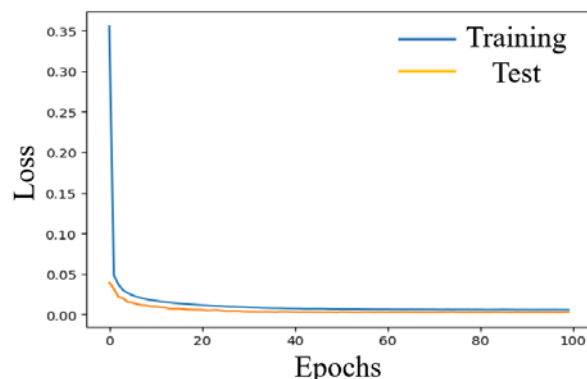


شکل ۴: مقایسه پترن های اصلی (Truth) با پترن های تخمین زده شده (Predicted) از بیم اصلی و دو هارمونیک اول برای یک آرایه پنج در پنج.

با مقایسه پترن بیم اصلی (AF0)، هارمونیک اول (AF1) و هارمونیک دوم (AF2) برای نمونه اصلی و تخمین زده شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده CNN به خوبی قادر به تخمین سوئیچینگ مورد نیاز برای پترن تشعشعی دلخواه بیم اصلی و دو هارمونیک اول برای آرایه آنتن صفحه‌ای است. این قابلیت می‌تواند برای استفاده در ارتباطات ماهواره با ایستگاه زمینی با بیم اصلی و ارتباطات ماهواره با اطراف خود و یا حتی چند ایستگاه زمینی با استفاده از هارمونیک‌های اول و دوم استفاده شود.

برای مقایسه بهتر، مشخصات اصلی پترن‌های اصلی و تخمینی از قبیل SLL بیم اصلی و دو هارمونیک اول، و همچنین زاویه ارتفاع و سمت دو هارمونیک اول در جدول ۱ به صورت

به طوری که  $f_i$  مقادیر تخمین زده شده از ۵۰ خروجی و  $y_i$  مقادیر اصلی خروجی است. این مدل در ۱۰۰ epoch اجرا شده و تعداد بسته‌های مدل ۶۴ در نظر گرفته شده است. بهینه‌ساز شبکه "آدام" بوده و یادگیری حدود ۵ ساعت به طول انجامیده است. نتایج یادگیری مدل در شکل ۳ ارائه شده است.

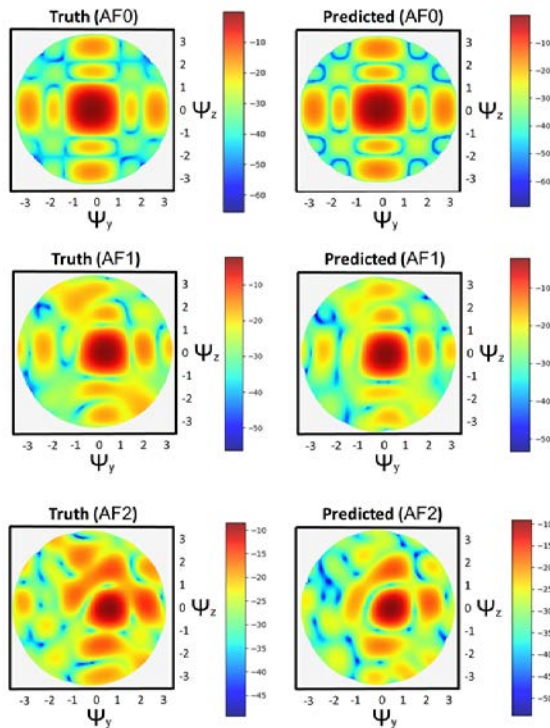


شکل ۳: نمودار یادگیری مدل CNN برای داده های آموزش (نمودار آبی) و داده های ارزیابی (نارنجی) برای آرایه پنج در پنج.

همان‌طور که در این شکل مشخص است، MSE در داده‌های یادگیری و داده‌های ارزیابی بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند و این دلیلی بر نبود بیش برازش در مدل و صحت عملکرد یادگیری هر دو نوع داده می‌باشد. همچنین مقدار MSE در داده‌های یادگیری و ارزیابی به ترتیب برابر است با ۰.۰۰۵۷ و ۰.۰۰۲۷ است که تاییدی بر نزدیک بودن مقادیر تخمین زده شده عرض و تاخیر پالس‌های عناصر با مقادیر واقعی آن‌ها است.

## ۵- ارزیابی مدل CNN آموزش دیده

پس از یادگیری مدل بلید به ارزیابی آن پرداخته شود. در این راستا یک نمونه از داده‌های تست را به صورت تصادفی انتخاب کرده‌ایم به طوری که SLL بیم اصلی، هارمونیک اول و دوم به ترتیب برابر با ۱۸.۷۳ و ۱۷.۸۴ و ۱۱.۵ دیبی بوده‌اند. هارمونیک اول و دوم نیز در راستای ارتفاع به ترتیب ۱۱۴ و ۱۴۶ درجه و راستای سمت به ترتیب ۱۸ و ۹۰ درجه تنظیم شده بوده‌اند. پترن‌های متناظر با سوئیچینگ داده اصلی (Truth) به مدل CNN در ورودی داده شده است و در خروجی شبکه سوئیچینگ (عرض پالس و تاخیرهای عناصر) تخمین زده شده



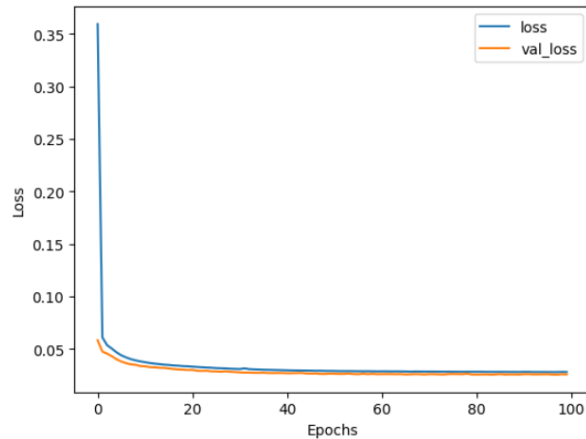
شکل ۶: مقایسه پترن‌های اصلی (Truth) با پترن‌های تخمین زده شده (Predicted) از بیم اصلی و دو هارمونیک اول برای یک آرایه شش در شش.

جدول ۱: مقایسه مشخصات پترن‌های نمونه ارزیابی و تخمینی.

$\varphi_2$	$\varphi_1$	$\theta_2$	$\theta_1$	SLL <sub>2</sub>	SLL <sub>1</sub>	SLL <sub>0</sub>	نوع پترن
۹۰	۱۸	۱۴۶	۱۱۴	-۱۱	-۱۷/۸	-۱۸/۷	پترن‌های ارزیابی (آرایه پنج در پنج)
۹۰	۱۹	۱۴۴	۱۱۴	-۱۱/۵	-۱۷/۱	-۱۸/۲	پترن‌های تخمین CNN (آرایه پنج در پنج)
0	0	۱۰۵	۹۷/۵	-۵/۶	-۱۱/۵	-۱۴/۸	پترن‌های ارزیابی (آرایه شش در شش)
0	0	۱۰۰	۹۵	-۶/۸	-۱۲/۳	-۱۴/۷	پترن‌های تخمین CNN (آرایه شش در شش)

دقیق گزارش شده است. این نتایج نشان از دقت خوب سوئیچ‌های تخمین زده شده جهت تحقق پترن موردنظر است. این قابلیت می‌تواند در تحقق چند پترن به صورت کاملاً دلخواه بسیار کاربردی باشد.

در راستای بررسی و ارزیابی آرایه‌های بزرگ یک آرایه شش در شش نیز لحاظ شده است و همان مراحل که برای تولید دیتا در آرایه پنج در پنج اجرا شد را تکرار کردیم. مقدار MSE یادگیری مدل به ۰.۰۲ رسیده است. در این مدل تعداد خروجی برابر است با ۷۲ که ۳۶ خروجی اول مربوط به عرض پالس عناصر و ۳۶ خروجی دوم مربوط به تاخیر پالس عناصر می‌باشد. نمودار یادگیری این مدل در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵: نمودار یادگیری مدل CNN برای داده‌های آموزش (نمودار آبی) و داده‌های ارزیابی (نارنجی) برای آرایه شش در شش.

برای ارزیابی عملکرد آن یک نمونه تصادفی را از داده‌های تست را انتخاب کرده و در شکل ۵ ارائه کرده‌ایم. همچنین تخمین آن از مدل گرفته و پترن آن را در کنار پترن‌های اصلی نمایش داده شده است. مقایسه مشخصات پترن‌های اصلی و تخمین زده شده برای آرایه شش در شش نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

- [5] R. Maneiro-Catoira, J. Brégains, J. A. García-Naya, and L. Castedo, "Time modulated arrays: From their origin to their utilization in wireless communication systems," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 3, pp. 1–14, 2017, doi: 10.3390/s17030590.
- [6] Y. Liu, C. He, X. Liang, W. Zhu, J. Geng, and R. Jin, "Multiuser Communication by Electromagnetic Vortex Based on Time-Modulated Array," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 2, pp. 282–286, 2020, doi: 10.1109/LAWP.2019.2960058.
- [7] L. Poli, P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa, "Harmonic beamforming in time-modulated linear arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 7, pp. 2538–2545, 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2152323.
- [8] C. He, Q. Chen, A. Cao, J. Chen, and R. Jin, "Application of the time modulated array in satellite communications," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, no. 2, pp. 24–30, 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800287.
- [9] P. Rocca, L. Poli, G. Oliveri, and A. Massa, "Synthesis of time-modulated planar arrays with controlled harmonic radiations," *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 24, no. 5–6, pp. 827–838, 2010, doi: 10.1163/156939310791036304.
- [10] Y. Ma, C. Miao, Y. H. Li, and W. Wu, "A Partition-Based Method for Harmonic Beamforming of Time-Modulated Planar Array," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 4, pp. 2112–2121, 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3026893.
- [11] L. Poli, P. Rocca, L. Manica, and A. Massa, "Time modulated planar arrays - Analysis and optimisation of the sideband radiations," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 4, no. 9, pp. 1165–1171, 2010, doi: 10.1049/iet-map.2009.0379.
- [12] A. Chakraborty, G. Ram, and D. Mandal, "Time-modulated linear array synthesis with optimal time schemes for the simultaneous suppression of sidelobe and sidebands," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, 2021, doi: 10.1017/S175907872100088X.
- [13] A. Chakraborty, G. Ram, and D. Mandal, "Multibeam steered pattern synthesis in time-modulated antenna array with controlled harmonic radiation," *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, vol. 31, no. 5, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1002/mmce.22597.
- [14] Z. J. Jiang, S. Zhao, Y. Chen, and T. J. Cui, "Beamforming Optimization for Time-Modulated Circular-Aperture Grid Array with de Algorithm," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2434–2438, 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2877470.
- [15] L. Poli, P. Rocca, L. Manica, and A. Massa, "Handling

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، به قابلیت استفاده از مدولاسیون زمان در آرایه آنتن صفحه‌ای به منظور تولید و استفاده از چند بیم پرداخته شده است. به دلیل این که کنترل چند بیم با بهینه‌سازی بسیار زمان بر است، روشی مبتنی بر یادگیری عمیق در قالب مدل CNN ارائه شد. این مدل قابلیت این را دارد که در لحظه مدولاسیون زمان عناصر آرایه جهت تحقق پترن مورد نیاز برای بیم اصلی و دو هارمونیک اول را مشخص نماید. کنترل هم زمان و آنی چند بیم با سمتگرایی قابل کنترل فوق‌العاده‌ای را برای کاربردهای مخابراتی بخصوص مخابرات ماهواره فراهم می‌کند و از آن می‌توان برای ارتباط هم‌زمان ماهواره با ایستگاه‌های زمینی و رهگیری سایر اهداف مورد نظر استفاده کرد. در آخر، این روش با ارائه خطای یادگیری مدل و ارزیابی مدل با یک نمونه تصادفی و تخمین آن نمونه صحت نتایج و توانایی مدل یادگیری عمیق ارائه شده برای کنترل هم‌زمان چند بیم در آن واحد را تایید می‌نماید.

## تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

## مراجع

- [1] H. E. Shanks and R. W. Bickmore, "FOUR-DIMENSIONAL ELECTROMAGNETIC RADIATORS," *Can. J. Phys.*, vol. 37, no. 3, pp. 263–275, 1959, doi: 10.1139/p59-031.
- [2] W. H. Kummer, A. T. Villeneuve, T. S. Fong, and F. G. Terrio, "Ultra-Low Sidelobes from Time-Modulated Arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 11, no. 6, pp. 633–639, 1963, doi: 10.1109/TAP.1963.1138102.
- [3] G. Li, S. Yang, Y. Chen, and Z. Nie, "A Novel Electronic Beam Steering Technique in Time Modulated Antenna Array," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 97, pp. 391–405, 2009.
- [4] C. Shan, Y. Ma, H. Zhao, and J. Shi, "Time modulated array sideband suppression for joint radar-communications system based on the differential evolution algorithm," *Digit. Signal Process. A Rev. J.*, vol. 97, p. 102601, 2020, doi: 10.1016/j.dsp.2019.102601.

1263–1270, 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2967272.

- [26] L. Poli, D. Masotti, M. A. Hannan, A. Costanzo, and P. Rocca, "Codesign of Switching Sequence and Diode Parameters for Multiple Pattern Optimization in Time-Modulated Arrays," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 11, pp. 1852–1856, 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3010824.



## COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

sideband radiations in time-modulated arrays through particle swarm optimization," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 4, pp. 1408–1411, 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2041165.

- [16] A. Massa, D. Marcantonio, X. Chen, M. Li, and M. Salucci, "DNNs as Applied to Electromagnetics, Antennas, and Propagation - A Review," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 11, pp. 2225–2229, 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2916369.
- [17] M. Mashayekhi, M. Mashayekhi, P. Kabiri, and A. Nooramini, "A Reconfigurable Graphene Patch Antenna Inverse Design at Terahertz Frequencies," *Sci. Rep.*, pp. 0–8, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-35036-4.
- [18] J. Jin, Q. Su, Y. Xu, Z. He, and Y. Lu, "Efficient Radiation Pattern Prediction of Array Antennas Based on Complex-Valued Graph Neural Networks," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 21, no. 12, pp. 2467–2471, 2022, doi: 10.1109/LAWP.2022.3197441.
- [19] T. Iye, P. Van Wyk, T. Matsumoto, Y. Susukida, S. Takaya, and Y. Fujii, "Neural Network-Based Phase Estimation for Antenna Array Using Radiation Power Pattern," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 21, no. 7, pp. 1348–1352, 2022, doi: 10.1109/LAWP.2022.3167697.
- [20] J. H. Kim and S. W. Choi, "A Deep Learning-Based Approach for Radiation Pattern Synthesis of an Array Antenna," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 226059–226063, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3045464.
- [21] R. Lovato and X. Gong, "Phased antenna array beamforming using convolutional neural networks," *2019 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Usn. Radio Sci. Meet. APSURSI 2019 - Proc.*, pp. 1247–1248, 2019, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888573.
- [22] S. Bianco, P. Napoletano, A. Raimondi, M. Feo, G. Petraglia, and P. Vinetti, "AESA Adaptive Beamforming Using Deep Learning," in *IEEE National Radar Conference - Proceedings*, 2020, vol. 2020-Septe, doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266516.
- [23] T. Sallam and A. M. Attiya, "Convolutional neural network for 2D adaptive beamforming of phased array antennas with robustness to array imperfections," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 13, no. 10, pp. 1096–1102, 2021, doi: 10.1017/S1759078721001070.
- [24] M. T. McCann, K. H. Jin, and M. Unser, "Convolutional neural networks for inverse problems in imaging: A review," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 34, no. 6, pp. 85–95, 2017, doi: 10.1109/MSP.2017.2739299.
- [25] A. Palfy, J. Dong, J. F. P. Kooij, and D. M. Gavrilu, "CNN Based Road User Detection Using the 3D Radar Cube," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp.