

پرتوسازی در آرایه‌های استوانه‌ای با چیدمان زیگزاگ با رویکرد تجزیه آرایه

سیدحمید یزدانی^۱، محمود پاداش^۲، امیرمسعود مشکسار^۳ و بیژن عباسی آرند^۴

^۱ کارشناس ارشد دانشگاه یزد، seyedhamidyazdani@stu.yazd.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد دانشگاه سیستان و بلوچستان، mahmood.padash2013@gmail.com

^۳ کارشناس ارشد دانشگاه شیراز،

^۴ دانشیار دانشگاه تربیت مدرس abbasi@modares.ac.ir

چکیده - آرایه‌های استوانه‌ای از ساختارهای پر کاربرد در آنتن‌های آرایه فازی و از نوع آرایه‌های تطبیقی (Conformal arrays) می‌باشند. نحوه چیدمان حسگرها، فاصله میان این حسگرها در هر حلقه یا هر ستون آنتن و پهنای 3 dB الگوی پرتو هر کدام از این حسگرها پارامترهای اصلی تعیین کننده الگوی پرتو کل آرایه هستند. در چیدمان های زیگزاگ بر خلاف چیدمانهای معمول، در دو ستون مجاور حسگرها به صورت زیگزاگ چیده شده اند که این امر باعث نصف شدن تعداد حسگرها می گردد. در چیدمان زیگزاگ نمی توان مانند آرایه استوانه‌ای با چیدمان معمولی، تجزیه آرایه را به صورت حاصلضرب یک آرایه خطی در آرایه دایروی انجام داد. در این مقاله، روابط مرتبط با الگوی پرتو آرایه استوانه‌ای با چیدمان زیگزاگی (lattice) با استفاده از حسگرهای جهتی استخراج شده و با ارائه تجزیه آرایه برای حالت زیگزاگ، شکل دهی پرتو برای این آرایه شبیه سازی و ارائه می گردد.

کلید واژه- شکل دهی پرتو، الگوی پرتو، آرایه استوانه‌ای زیگزاگ.

مربوط به بدست آوردن الگوی تشعشعی آرایه استوانه‌ای زیگزاگی آورده می‌شود. در این مقاله، هدف اصلی تحلیل الگوی آرایه استوانه‌ای زیگزاگ به کمک تجزیه آرایه می‌باشد.

۱- مقدمه

آرایه‌های تطبیقی (Conformal arrays)، آرایه‌هایی هستند که حسگرهای آن بر روی سطوح غیرمسطح و غیرصفحه‌ای (مانند سطح فضاپیما) منطبق می‌شوند. این نوع آرایه‌ها در حال پیشرفت در سیستم‌های راداری و مخابراتی نسل آینده هستند [۱]. این اتفاق به این دلیل است که اینگونه آرایه ها، مزایای زیادی از قبیل استتار و عدم تداخل بین عملکرد آیرودینامیکی (Aerodynamic performance) و عملکرد آنتن دارند. تحلیل آرایه‌های تطبیقی، یکی از زمینه‌های مورد علاقه محققین بوده و می‌باشد. تکنیک‌های تحلیل الگوی تشعشعی مورد استفاده در آرایه‌های خطی و صفحه‌ای به خوبی نمی‌توانند در آرایه‌های تطبیقی به کار گرفته شوند. برای مواجهه با این مشکل، تکنیک‌های مختلفی در مراجع مختلفی پیشنهاد شده است [۳-۵]. در مراجع مختلفی از جمله [۴-۱] به آرایه‌های استوانه‌ای با چیدمان متداول پرداخته شده که در بعضی از آنها به موضوع الگوی تشعشعی این آرایه‌ها نیز اشاره شده است [۳-۴]. آرایه های استوانه ای قابلیت پوشش ۳۶۰ درجه ای محیط پیرامون خود و همچنین عدم تغییر بیم در چرخش بیم را دارا می باشد. این گونه آرایه ها قابلیت نصب روی بدنه دستگاه ها و تطبیق روی ماشین ها را دارند [۶]. به همین دلیل کاربرد وسیعی در سیستم های آرایه ای دارند. ابتدا روابط و تئوری

۲- آرایه استوانه‌ای معمولی و روابط آن

در [۴] روشی مبتنی بر آرایه‌های خطی و دایروی برای بدست آوردن الگوی آرایه استوانه‌ای مطرح شده که در اینجا به شرح و بیان روابط آن می‌پردازیم. یک آرایه خطی با M حسگر دارای الگوی پرتو (beam pattern) برابر رابطه (۱) زیر می‌باشد:

$$BP_{linear}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M b_m e^{j(kd_m \cos \theta + \beta_m)} \quad (1)$$

در این رابطه، b_m ضرایب تحریک (Excitation coefficients) هر حسگر، d_m فاصله بین حسگرها تا مبدأ و β_m فاز تحریک هر حسگر است. همچنین یک آرایه دایروی با N حسگر، دارای الگوی پرتو برابر با فرمول زیر است؛

$$BP_{circular}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j(kr[\sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n)] + \alpha_n)} \quad (2)$$

در این رابطه، 'r' شعاع، I_n ضرایب تحریک هر حسگر، α_n فاز تحریک هر حسگر و φ_n زاویه بین محور x و حسگر شماره n در صفحه $x-y$ می‌باشد.

دایروی می‌باشد. با جایگزین کردن رابطه (۴) در رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$BP(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M b_m e^{j(d_m \cos \theta + \beta_m)} \sum_{n=1}^N I_n e^{j\alpha_n jkr \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n)} = \sum_{m=1}^M b_m e^{j(d_m \cos \theta + \beta_m)} \sum_{n=1}^N I_n e^{j\{kr \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) + \alpha_n\}} = BP_{linear}(\theta, \varphi) \cdot BP_{circular}(\theta, \varphi) \quad (5)$$

از رابطه (۵)، مشخص است که الگوی پرتویک آرایه استوانه‌ای معادل با حاصلضرب الگوی پرتو مربوط به آرایه‌های خطی و دایروی است. بنابراین، سطح تحلیل الگوی مورد نظر ما، به دو شاخه تحلیل الگوی مجزا کاهش می‌یابد: تحلیل آرایه دایروی و تحلیل آرایه خطی عمودی.

حال می‌توان با توجه به روابط بدست آمده، الگوی تشعشی کل آرایه استوانه با در نظر گرفتن الگوی هر حسگر بدست آورد. الگوی نهایی به صورت رابطه زیر که نتیجه روابط قبلی می‌باشد، تعریف شده است [۱]:

$$BP(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} f_{mn}(\theta, \varphi) \times \exp(jk [R \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m)]) \times \exp(jk z_{mn} \cos \theta + j\psi_{mn}) \quad (6)$$

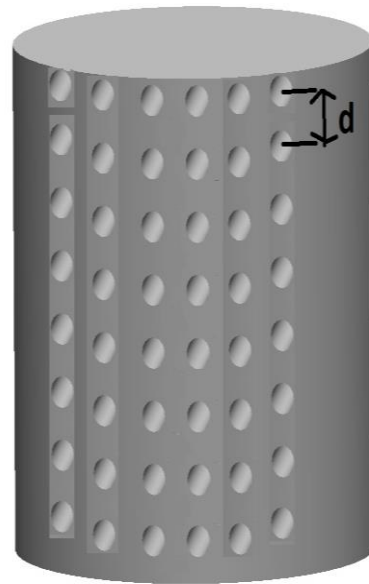
که در رابطه فوق I_{mn} مقدار حقیقی تحریک هر حسگر، ψ_{mn} فاز تحریک هر حسگر، $f_{mn}(\theta, \varphi)$ الگوی هر حسگر و φ_{mn} و z_{mn} مختصات زاویه و ارتفاع هر حسگر می‌باشد.

۳- استخراج روابط برای شکل‌دهی پرتو آرایه استوانه‌ای زیگزاگ و تجزیه آرایه

آرایه استوانه‌ای زیگزاگ مشابه آرایه استوانه‌ای متداول شامل تعدادی ستون و در هر ستون نیز شامل تعدادی حسگر است. در این نوع آرایه به منظور تحلیل و شبیه‌سازی و همچنین پیاده‌سازی الگوریتم شکل‌دهی پرتو از ابتدا روابط مربوط به این آرایه را بدست می‌آوریم. شکل ۲ شماتیکی از نحوه چیدمان آرایه‌های استوانه‌ای زیگزاگ را نشان می‌دهد.

در مختصات دکارتی بردار یکه عمود بر جبهه موج (u) و بردار مکان هر سنسور (r) نسبت به مبدأ مختصات به صورت زیر می‌باشند؛

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، قرار دادن آرایه‌های دایروی به صورت متوالی و با فاصله یکسان به صورتی عمودی و روی هم، منجر به ایجاد یک آرایه استوانه‌ای می‌شود که حسگرها به صورت خطی در راستای عمود زیر هم قرار گرفته‌اند و در راستای افقی آرایه‌های دایروی تشکیل می‌دهند.



شکل ۱- آرایه استوانه‌ای با چیدمان متداول

برای این آرایه، الگوی پرتو کلی، حاصلضرب الگوی پرتو خطی در الگوی پرتو دایروی می‌باشد [۸]. الگوی پرتویک آرایه دایره‌ای در صفحه $x - y$ در رابطه (۲) و الگوی پرتویک خطی قرار گرفته روی محور z در رابطه (۱) آورده شده است. با در نظر گرفتن یک استوانه تشکیل شده از M آرایه دایروی یکسان، الگوی پرتویک آرایه استوانه‌ای با کمک روابط (۱) و (۲) به صورت رابطه (۳) بدست می‌آید؛

$$BP(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \left[\sum_{n=1}^N c_{nm}(\theta) e^{jkr \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n)} \right] \quad (3)$$

در رابطه (۳)، شرایط ناحیه میدان دور در نظر گرفته شده است و الگوی پرتوهر آرایه دایروی برابر با آرایه دایروی در صفحه $x - y$ می‌باشد. با این وجود، توزیع عمودی حسگرها، یک اختلاف فاز بین آرایه‌های دایروی را باعث می‌شود که ناشی از اختلاف فاز بین حسگرهای آرایه خطی می‌باشد. بنابراین؛

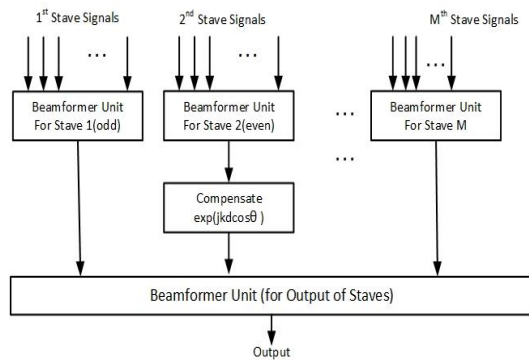
$$c_{nm}(\theta) = I_n e^{j\alpha_n} b_m e^{j(kd_m \cos \theta + \beta_m)} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، عبارت $b_m e^{j(kd_m \cos \theta + \beta_m)}$ از حسگر m ام عمودی و عبارت $I_n e^{j\alpha_n}$ ضرایب تحریک حسگر n ام آرایه

$$b(f, u) = \sum_s \exp(jkR \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_s)) \quad (11)$$

$$[\sum_{n,s=odd} I_{sn} \exp(j\alpha_{sn}) \exp(jk(2d)(n-1)\cos\theta) + \exp(jkdcos\theta) \sum_{n,s=even} I_{sn} \exp(j\alpha_{sn}) \exp(jk(2d)(n-1)\cos\theta)]$$

با توجه به رابطه (۱۱) نشان داده شد که با تفکیک ستون ها به ستون های زوج و فرد می توان آرایه استوانه زیگزاگ را تجزیه کرد. عبارت $\exp(jkdcos\theta)$ تفاوت بین دو آرایه خطی ستون ها می باشد. دو ستون زوج و فرد را می توان مانند هم جبران سازی فاز انجام داد و تفاوت بین دو ستون را نیز با یک اختلاف فاز جبران کرد. بدین منظور بلوک دیاگرام زیر نشان دهنده روند تفکیک آرایه زیگزاگ را نشان می دهد:



شکل ۳ - بلوک دیاگرام تجزیه آرایه پیشنهادی برای چیدمان زیگزاگ

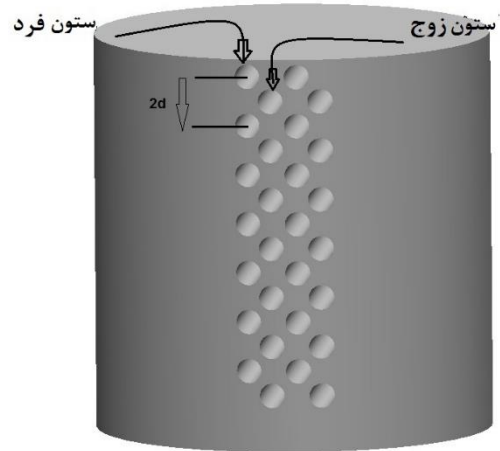
یکی از راه های پیاده سازی شکل دهنده پرتو جمع کردن سنسورهای یک ستون و در نهایت جمع کردن خروجی ستون ها می باشد. با این کار پیچیدگی سیستم (نسبت به پردازش روی تمام المان ها به صورت یکجا) کاهش می یابد.

نکته مهم در این قسمت این است که ستون ها نیز به دو قسمت ستون زوج و فرد تقسیم می شوند. ستون های فرد ستون هایی هستند که بالاترین حسگر در راستای عمود در این ستون ها قرار دارند.

برای شبیه سازی از حسگرهایی که فرم بسته الگوی تشعشی آنها در (۱۴) آورده شده است؛

$$F(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (14)$$

که در روابط فوق، a شعاع حسگر، k عدد موج و λ طول موج است. F نشان دهنده الگوی حسگر می باشد.



شکل ۲- آرایه استوانه ای با چیدمان زیگزاگ

$$u = [\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta] \quad (7)$$

$$r_{sj} = [R \cos(\varphi_{sn}), R \sin(\varphi_{sn}), z_{sn}] \quad (8)$$

که در روابط فوق، s نشان دهنده شماره ستون و n نشان دهنده شماره سنسور در آن ستون است. با در نظر گرفتن روابط فوق، الگوی پرتو آرایه به فرم زیر در می آید؛

$$b(f, u) = \sum_s \sum_n I_{sn} \exp(j\alpha_{sn}) \exp(jk r_{sn} \cdot u) \quad (9)$$

$$= \sum_s \sum_n I_{sn} \exp(j\alpha_{sn}) \exp(jk(R \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_{sn}) + z_{sn} \cos \theta))$$

همانطور که از رابطه فوق مشخص است، به دلیل وابسته بودن عبارت z_{sn} به s و n نمی توان این معادله را مانند استوانه معمولی تجزیه کرد. این امر باعث می شود که برای چرخش الگوی پرتو در یک جهت خاص باید برای تمام حسگرها اختلاف فاز مجدد حساب گردد که باعث پیچیدگی می شود. اما رابطه z_{sn} را اگر برای ستون های زوج و فرد جداسازی کنیم و همچنین فرض کنیم که ضرایب تحریک حسگر را بتوان به صورت

$$I_{sn} \exp(j\alpha_{sn}) = I_{sn,1} \exp(j\alpha_{sn,1}) I_{sn,2} \exp(j\alpha_{sn,2})$$

تجزیه کرد، با توجه به اینکه φ_{sn} تنها به شماره ستون وابسته است، رابطه (۹) به این صورت خواهد شد:

$$b(f, u) = \sum_s \exp(jkR \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_s)) \sum_n I_{sn} \exp(j\alpha_{sn}) \exp(jkz_{sn} \cos \theta) \quad (10)$$

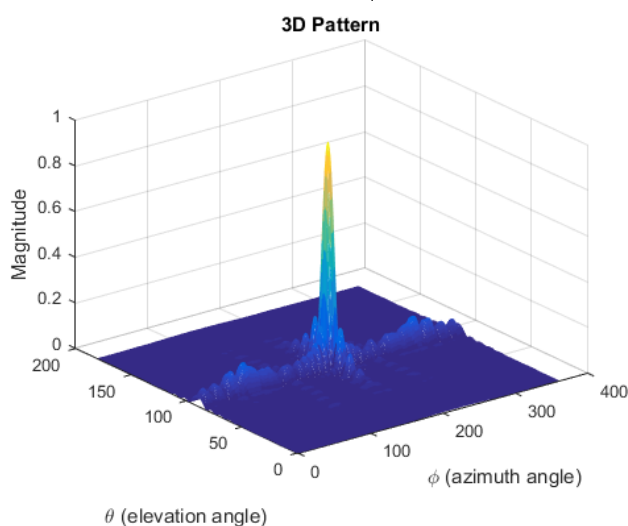
و در ادامه خواهیم داشت:

۴- شبیه سازی

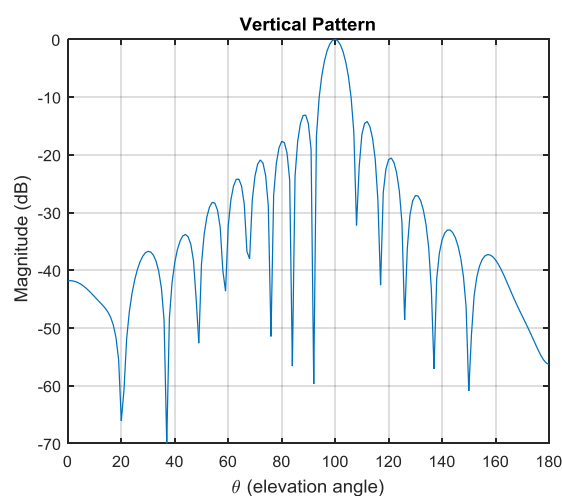
در ادامه نمونه ای از استفاده از تجزیه آرایه پیشنهادی آورده شده است.

جدول ۲- سناریوهای شبیه سازی

شماره آزمایش	۱	۲	۳
ابعاد حسگر	قطر 0.576λ	قطر 0.576λ	قطر 0.576λ
تعداد ستون * تعداد المان های ستون	۱۰*۵۴	۱۰*۵۴	۱۰*۵۴
فاصله میان ستون ها	0.56λ	0.56λ	0.56λ
فاصله میان المان های هر ستون ها	0.72λ	0.72λ	0.72λ
پهنای 3 dB پترن هر المان (درجه)	۸۰	۸۰	۸۰
نوع پنجره دامنه	ندارد	چپبی شف	چپبی شف
		(20 dB)	(20 dB)
زوایای تشکیل پرتو	$\varphi = 180^\circ$ $\theta = 90^\circ$	$\varphi = 180^\circ$ $\theta = 100^\circ$	$\varphi = 180^\circ$ $\theta = 115^\circ$
میزان چرخش عمودی پرتو	0°	-10°	-25°

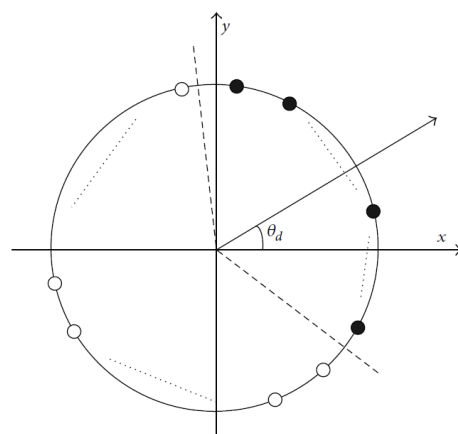


شکل ۵- الگوی پرتو سه بعدی آرایه استوانه ای زیگزاگ آزمایش



شکل ۶- الگوی پرتو عمودی آرایه استوانه ای زیگزاگ آزمایش ۲

بمنظور شبیه سازی ها، آرایه دارای ۵۴ ستون و هر ستون دارای ۱۰ حسگر در نظر گرفته شده است و یک قطاع ۱۲۰ درجه ای از کل آرایه فعال باشد. شکل دهی پرتو تنها در حسگرهایی اعمال می شود که در محدوده زاویه مشخصی حول زاویه ارسال و در این قطاع قرار دارند. این موضوع در شکل ۳ نمایش داده شده است. علاوه بر انتخاب زیرمجموعه ای از حسگرها، پنجره گذاری دامنه (مانند پنجره چپبی شف) نیز در این سناریو مورد بررسی قرار گرفته است به این صورت که روی حسگرهای مؤثر در شکل دهی پرتو یک پنجره مناسب و دلخواه اعمال می شود. در شبیه سازی ها از روش تأخیر و جمع (Delay and Sum Beamformer (DSB) استفاده شده و تنها فازها جبران شده اند.



شکل ۴- ستون های فعال در شکل دهی پرتو برای یک زاویه سمت مورد نظر

۵- نتایج شبیه سازی و ارزیابی

نتایج مربوط به شبیه سازی الگوی پرتو آرایه استوانه ای برای حالت های مختلفی در ادامه آورده شده است. سناریوهای مورد استفاده نیز آورده شده اند. در جدول ۱ بیانگر طول موج است. در جدول ۱ مقایسه بین زمان مورد نیاز برای شبیه سازی پترن آرایه زیگزاگ بدون استفاده از تجزیه آرایه و با تجزیه آرایه پیشنهادی با هم مقایسه شده است. شبیه سازی ها در نرم افزار Matlab در یک سیستم با پردازنده intel cor i5-3470 انجام شده است.

جدول ۱- مقایسه سنتز با و بدون استفاده از تجزیه آرایه

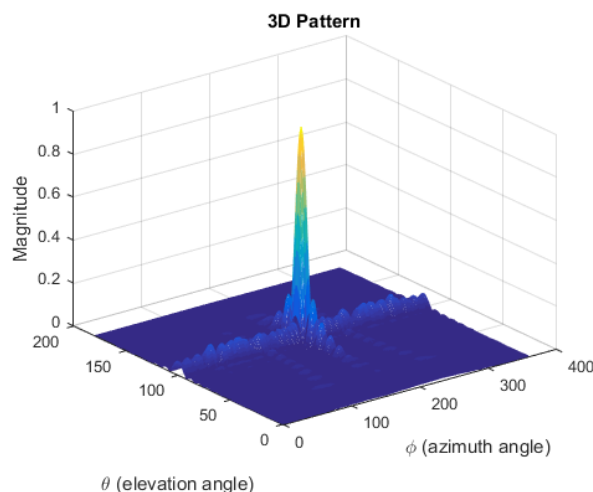
نوع سنتز پترن	زمان اجرای کد
بدون استفاده از تجزیه آرایه	۲۹/۶۴ ثانیه
با تجزیه آرایه پیشنهادی	۱/۳ ثانیه

۶- نتیجه‌گیری

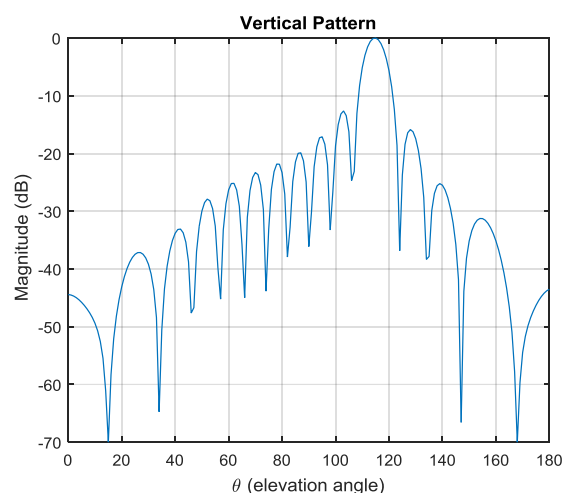
در این مقاله، روابط مرتبط با الگوی پرتو آرایه استوانه‌ای با چیدمان زیگزاگی (lattice) با استفاده از حسگرهای جهتی استخراج شده و شکل‌دهی پرتو برای این آرایه شبیه‌سازی و ارائه گردید. در این مقاله نشان داده شد که می‌توان پترن آرایه زیگزاگ را به دو قسمت شکل‌دهی پرتو در ستون‌ها و سپس در آرایه دایره‌ای نهایی تفکیک کرد. با تجزیه فوق پیاده‌سازی آرایه زیگزاگ نیز مشابه با آرایه استوانه‌ای ساده با تفاوت کوچکی نسبت به هم عملی شد.

۷- مراجع

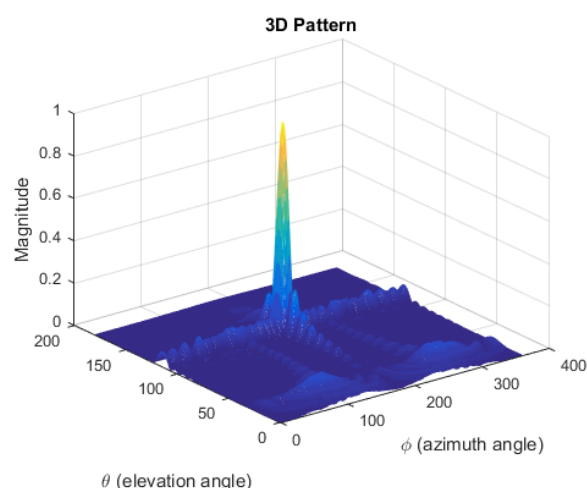
- [1] Z. B. Lu, A. Zhang, and X. Y. Hou, "Pattern synthesis of cylindrical conformal array by the modified particle swarm optimization algorithm", *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 79, 415–426, 2008.
- [2] He, Q. Q., H. D. He, and H. Lan, "An efficient pattern synthesis method for cylindrical phased array antennas," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 23, No. 4, 473–482, 2009.
- [3] Vaskelainen, L. I., "Constrained least-squares optimization in conformal array antenna synthesis," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 55, 859–867, 2007
- [4] K. Y. Kabalan, E. Yaacoub and A. El-Hajj, "Synthesis of Cylindrical Antenna Arrays Using Simulated Annealing", *SETIT 2007, 4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications*, Mar. 25-29, 2007 – Tunisia
- [5] C. Liu, Z. Ding, and X. Liu, "2-D Pattern synthesis for cylindrical arrays", *PIERS Proceedings, Suzhou, China*, Sep.12-16, 2011
- [6] A. M. Meshksar, and M. Karimi, "A beamforming method for cylindrical array based on the array decomposition approach", *ICEE2012*
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory and Design*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1997
- [8] E. Yaacoub, K. Y. Kabalan, A. El-Hajj, and A. Chehab, "Cylindrical Antenna Arrays for WCDMA Downlink Capacity Enhancement", *IEEE ICC 2006*
- [9] L. Josefsson, P. Persson, "Conformal array antenna theory and design", *IEEE Antennas and Propagation Society*



شکل ۷- الگوی پرتو سه‌بعدی آرایه استوانه‌ای زیگزاگ آزمایش ۲



شکل ۸- الگوی پرتو عمودی آرایه استوانه‌ای زیگزاگ آزمایش ۳



شکل ۹- الگوی پرتو سه‌بعدی آرایه استوانه‌ای زیگزاگ آزمایش ۳