



Wideband RCS Reduction Metasurface based on Polarization Conversion

Mojtaba Mighani^{1*}

¹ Assistant Professor, Shahid Sattari Aviation University, Tehran, Iran. (*Correspondence: mojtaba.mighani@gmail.com)

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: ۲۰ May ۲۰۲۰

Revised: ۰۵ July ۲۰۲۰

Accepted: ۰۵ July ۲۰۲۰

Available online: ۲۳ August ۲۰۲۰

*Correspondence:

mojtaba.mighani@gmail.com

Keywords:

Metasurface

Radar Cross-Section

Polarization Conversion

Scattering Cancelation

ABSTRACT

In this study, a metasurface is proposed to reduce the radar cross-section bandwidth using polarization conversion and scattering cancelation. The polarization conversion is performed based on the cruciform square ring unit cell. In this structure, a ۱۱-cell subarray based on the cruciform square ring cell and its rotation are used as supercell units to construct a metasurface with a checkerboard structure. The proposed structure can reduce the radar cross-section for all angles of the radiation wave. Finally, the introduced metasurface has been fabricated and measured. The results of simulation and measurement show that the proposed structure can achieve a ۱۰dB radar cross-section reduction in the bandwidth of ۸.۹ to ۲۲ GHz.

Cite this article: Mighani, M.[©] (۲۰۲۰). Wideband RCS Reduction Metasurface based on Polarization Conversion. Journal of Applied Electromagnetics. ۲۰۲۰; ۱۳ (۱):۱۲۹-۱۳۴.

DOI: <https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۴.۴.۱۳.۱.۱.۶>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.



فرا سطح کاهنده سطح مقطع راداری پهن باند بر مبنای تبدیل قطبش

مجتبی میقانی^{*۱}^۱ استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران (نویسنده مسئول: mojtaba.mighani@gmail.com)

مشخصات مقاله	چکیده (استایل عنوان چکیده)
تاریخچه مقاله: نوع مقاله: علمی پژوهشی دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰ ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱	در این پژوهش، یک فرا ماده سطحی برای کاهش پهن باند سطح مقطع راداری با استفاده از روش تبدیل قطبش و حذف پراکندگی ارائه شده است. تبدیل قطبش بر اساس سلول واحد حلقه مربعی صلیبی انجام می‌شود. در این ساختار از یک زیر آرایه ۱۶ تایی مبتنی بر سلول حلقه مربعی صلیبی و چرخش یافته آن، به عنوان واحدهای ابر سلولی برای ساختن یک فرا سطح با ساختار صفحه شطرنجی استفاده شده است. ساختار ارائه شده می‌تواند به سطح مقطع راداری پشتی قطبش هم‌راستا را برای تمام زوایای موج تابشی کاهش دهد. در انتها فرا سطح معرفی شده ساخته و اندازه‌گیری گردیده است. نتایج شبیه‌سازی و ساخت نشان می‌دهد، ساختار ارائه شده می‌تواند در پهنای باند ۸.۹-۲۲GHz، کاهش سطح مقطع راداری پشتی ۱۰dB را محقق نماید.
• کلیدواژه‌ها: فرا سطح سطح مقطع راداری تبدیل قطبش	

استناد: میقانی، مجتبی. فرا سطح کاهنده سطح مقطع راداری پهن باند بر مبنای تبدیل قطبش. الکترومغناطیس کاربردی. (۱۴۰۴)؛ ۱۳ (۱): ۱۳۴-۱۲۹.

<https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۱۵۳.۱۴۰۴.۱۳.۱.۱۱.۶>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).

۱- مقدمه

یعنی عناصر ۰ و ۱ را به دست آوریم. سپس سطح به صورت شطرنجی با عناصر ۰ و ۱ پر شده است. تحلیل مدی این ساختار در مراجعی نظیر [۲۱] ارائه گردیده است. نتایج شبیه سازی تمام موج نشان می دهد که این فرا سطح می تواند به کاهش سطح مقطع راداری در باند فرکانسی وسیع دست یابد. نمونه ای از این فرا سطح ساخته شده و نتایج اندازه گیری به خوبی با نتایج شبیه سازی شده مطابقت دارد و نشان می دهد که سطح طراحی شده می تواند در پهنای باند ۸۴٪ کاهش سطح مقطع راداری را در باند ۸.۹-۲۲GHz با ضخامت ۱.۶mm محقق نماید.

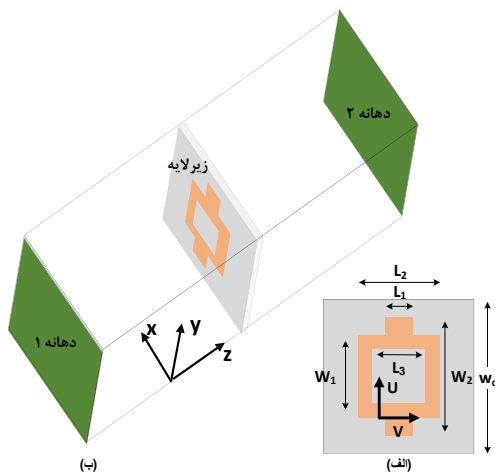
۲- طراحی

شکل ۱ ساختار سلول واحد پایه را نشان می دهد که از یک مربعی صلیبی بر روی یک زیر لایه FR۴ با ضریب گذردهی الکتریکی نسبی ۴.۴ و یک زمین فلزی تشکیل شده است. همان طور که نشان داده شده، بردار میدان الکتریکی موج فرودی قطبی شده را می توان به دو محور مختصات متعامد u و v تجزیه نمود. بنابراین، میدان الکتریکی فرودی را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\vec{E}_i = E_{iu}e^{j\phi} \vec{u} + E_{iv}e^{j\phi} \vec{v} \quad (1)$$

که در آن زاویه موج تابشی، $E_{iu} = E_{iv}$ به ترتیب دامنه مؤلفه های میدان الکترومغناطیسی در امتداد محورهای \vec{u} و \vec{v} هستند. بردارهای \vec{u} و \vec{v} به ترتیب بردارهای واحد محورهای u و v هستند. سپس میدان الکتریکی بازتاب شده را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\vec{E}_r = r_u E_{iu} e^{j(\phi + \phi_u)} \vec{u} + r_v E_{iv} e^{j(\phi + \phi_v)} \vec{v} \quad (2)$$



شکل (۱): سلول واحد پایه پیشنهادی (الف) هندسه سلول از نمای بالا (ب) ساختار شبیه سازی.

که در آن به ترتیب r_u و r_v اندازه و ϕ_u و ϕ_v فاز ضریب بازتاب راستای محورهای u و v هستند. از آنجایی که ساختار سلول واحد ناهمسانگرد است، یک اختلاف فاز بین دو راستا وجود دارد. با توجه به معادله (۲)، محور قطبش موج الکترومغناطیسی بازتاب شده به طور کامل به محور u تبدیل می شود اگر $r_u = r_v$ و $\phi_u = \phi_v$ باشد [۵].

فرا سطح ها سطوح نازک مصنوعی هستند که توسط آرایه های دوبعدی متناوب یا شبه تناوبی از ساختارهای مسطح با ابعاد کمتر از طول موج ساخته می شوند [۱]. در دهه گذشته، فرا سطح ها توجه مداوم را به خود جلب کردند زیرا می توانند دامنه، فاز، قطبش، راستای انتشار موج الکترومغناطیسی را تغییر دهند [۲]-[۵]. قابلیت های جذاب فرا سطح ها، منجر به کاربرد گسترده آن ها در زمینه های مختلف می شود، به عنوان مثال. فناوری پنهان کاری، رادار گریزی، تصویربرداری هولوگرافیک، ارتباطات و غیره [۱]-[۵].

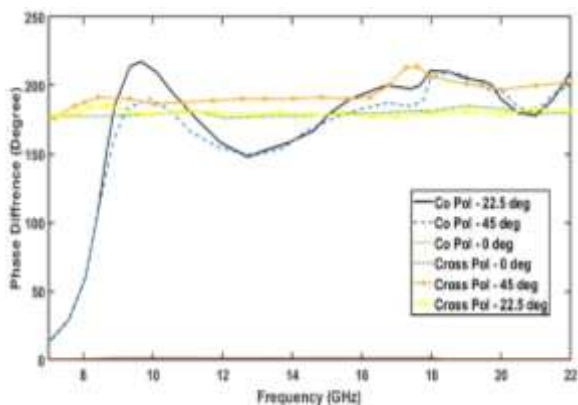
کاهش سطح مقطع راداری یک موضوع مهم در رادار گریزی و پنهان کاری است [۶-۱۷]. به عنوان مثال، در [۷]، فرا سطح با تلفات مقاومتی معرفی شد که می تواند کاهش سطح مقطع راداری پهن باند را با جذب موج تابشی محقق کند. علاوه بر جذب، فرا سطح های بدون تلفات همچنین می توانند با تغییر فازهای موج الکترومغناطیسی منعکس شده توسط هر سلول واحد، به کاهش سطح مقطع راداری دست یابند. در [۸] یک فرا سطح گرادینان فاز با بازتاب غیرعادی برای تحقق کاهش سطح مقطع راداری پهن باند ارائه شد. در [۹-۱۰] یک فرا سطح متشکل از دو عنصر پایه مرتب شده تصادفی با اختلاف فاز بازتابی ثابت ۱۸۰ درجه معرفی شد که می تواند باعث انتشار موج بازتابی و کاهش سطح مقطع راداری شود. اخیراً، محققان برخی فرا سطح های پهن باند را بر اساس ساختارهای تبدیل قطبی پیشنهاد کردند که در آن موج منعکس شده به قطبش متعامد تبدیل شده و توسط یکدیگر حذف می شوند [۱۱-۱۲]. این روش علاوه بر کاهش سطح مقطع راداری، در کاربردهایی نظیر طراحی آنتن های آرایه انعکاسی بسیار پهن باند، کاربرد دارد [۱۸].

در [۱۹] با استفاده از روش تبدیل قطبش، یک فرا سطح در باندهای ۱۵.۳-۲۶GHz و ۲۸.۳-۳۵.۴GHz ارائه شده است. همان طور که در این مقاله قابل مشاهده است به دلیل آن که در آن فقط از روش تبدیل قطبش استفاده شده است کاهش سطح مقطع راداری به صورت نوعی حدود ۵dB است که در عمل معمولاً کافی نیست. لذا به نظر می رسد ترکیب روش تبدیل قطبش با روشی دیگر الزامی است. به همین دلیل در پژوهش هایی از قبیل [۲۰]، تبدیل قطبش با روش حذف پراکنندگی ترکیب شده و در پهنای باند ۹.۲-۲۱.۲GHz بیش از ۱۰dB سطح مقطع راداری نسبت به سطح فلزی معادل کاهش پیدا نموده است.

در این پژوهش، با ادغام تبدیل قطبش و حذف پراکنندگی، یک فرا سطح برای کاهش سطح مقطع راداری پهن باند پیشنهاد گردیده است. ساختار سلول واحد طراحی شده یک حلقه مربعی صلیبی است که با چرخش آن می توان فاز و سایر مشخصات موج بازتابی را تغییر داد. پارامترهای این ساختار برای تحقق تبدیل قطبش باند پهن بهینه شده است. طبق اصل فاز پانکراتام-بری، آرایه های ۴×۴ ساختار تبدیل قطبش طراحی شده و ساختار چرخش یافته آن انتخاب گردیده تا دو عنصر اصلی با اختلاف فاز منعکس شده ۱۸۰ درجه،

همچنین ضرایب انعکاس قطبش هم‌راستا کمتر از -10 dB از 8.5 تا 22 GHz به دست آمد، به این معنی که این ساختار می‌تواند به‌طور مؤثر سطح مقطع راداری قطبش هم‌راستا را کاهش دهد.

در شکل ۴ ویژگی‌های فازی ابر سلول برحسب زوایای مختلف ϕ در دو قطبش هم‌راستا و متعامد شبیه‌سازی گردیده است.



شکل (۴): اختلاف‌فاز ابر سلول‌ها برای قطبش‌های متعامد و هم‌راستا.

همان‌طور که نشان داده شده، اختلاف‌فاز ضرایب بازتاب قطبش هم‌راستا بین 180 ± 37 درجه از 8.5 تا 22 GHz در ϕ برابر 22.5 و 45 درجه است. در عین حال، اختلاف‌فاز ضرایب بازتاب قطبش متعامد در حدود 180 درجه برای تمام زوایای افقی ϕ به دلیل اصل فاز پانکراتنام‌بری [۱۳] است. بنابراین، تابع تغییرات سطح برای موج الکترومغناطیسی، در زوایای افقی مختلف ϕ متفاوت است. برای ϕ در حدود 0 درجه، فرا سطح یک مبدل قطبش خوب است و ضریب بازتاب قطبش هم‌راستا آن بسیار پایین خواهد بود زیرا موج تابشی به قطبش متعامد تبدیل شد. برای ϕ در حدود 45 درجه، ضرایب بازتاب قطبش هم‌راستا کل فرا سطح نیز به دلیل حذف پراکندگی بین امواج الکترومغناطیسی منعکس شده توسط دو ابر سلول، که دامنه و اختلاف‌فاز یکسانی بین 180 ± 37 درجه دارند، بسیار کم خواهد بود. برای ϕ بین 0 و 45 درجه، فرا سطح می‌تواند هم تبدیل قطبش و هم عملکرد حذف پراکندگی را انجام دهد. بنابراین، ضریب بازتاب قطبش هم‌راستا آن برای ϕ در حدود 0 و 45 درجه کم خواهد بود.

۳- نتایج اندازه‌گیری

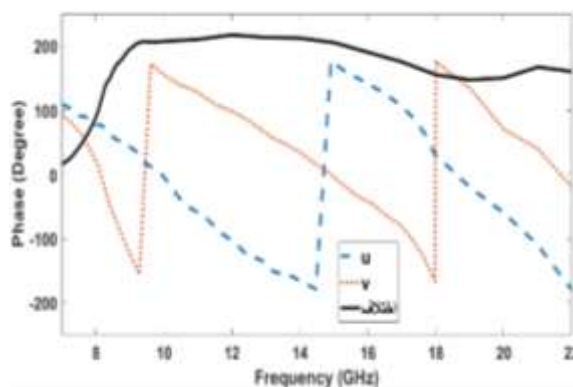
در ادامه فرا سطح با ساختار شطرنجی روی یک زیرلایه FR4 با ثابت عایقی نسبی 4.4 ساخته شد. سطح از دو نوع مختلف ابر سلول تشکیل شده که هریک آرایه‌ای 4×4 از حلقه‌های مربعی صلیبی مطابق شکل ۱ به‌عنوان ابر سلول 0 و نمونه چرخیده شده آن به‌اندازه $\phi = 45^\circ$ به‌عنوان ابر سلول ۱ هستند. در شکل ۵ نمایی از چینش 6×8 سطح و چینش اندازه‌گیری نمایش داده شده است. ضریب بازتاب قطبش هم‌راستا نمونه از 7 تا 22 GHz در یک اتاق آنتن و توسط یک تحلیل‌گر شبکه ZVA-24 اندازه‌گیری گردید.

برای به دست آوردن تبدیل قطبش در باند فرکانسی وسیع، پارامترهای ساختار سلول واحد به‌منظور رسیدن به حداکثر پهنای باند یعنی محدوده‌ای که اختلاف‌فاز پاسخ سلول‌ها 180 ± 37 درجه باشد، بهینه‌سازی گردیده است. همچنین ابعاد هندسی نهایی در جدول ۱ ارائه گردیده است. این سلول بر روی زیر لایه FR4 با ضخامت 1.6 mm شبیه‌سازی و ساخته شده است.

جدول (۱): ابعاد هندسه سلول (برحسب mm).

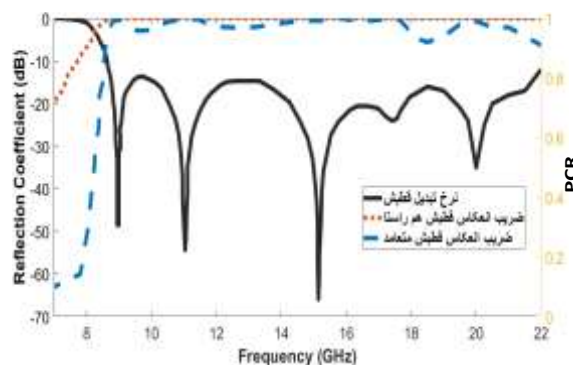
L_3	L_2	L_1	W_2	W_1	W_c
۳	۵	۲	۹	۵	۱۰

پاسخ موج الکترومغناطیسی این ساختار توسط نرم‌افزار تمام موج Ansys Electronic suite شبیه‌سازی شد. در شکل ۲ فازهای موج بازتاب شده در امتداد محورهای u و v برحسب فرکانس ترسیم گردیده است.



شکل (۲): فاز موج بازتابی از سلول در راستای محورهای u و v .

می‌توان دریافت که اختلاف‌فاز 180 ± 37 درجه از 8.5 تا 22 GHz است. در همین حال، نتایج شبیه‌سازی شده نشان داد که هر دو دامنه بازتابی در امتداد محورهای U و V نزدیک به 1 ، از 8.4 تا 22 GHz هستند. بنابراین، این ساختار می‌تواند بر اساس رابطه (۲) نرخ تبدیل قطبش (PCR) را بیش از 84% از 8.5 تا 22 GHz محقق سازد. علاوه بر این، ضرایب انعکاس r_{yy} و قطبش متقاطع r_{xy} برای تابش عمودی شبیه‌سازی گردیده که در شکل ۳ ترسیم شده است.



شکل (۳): نرخ تبدیل قطبش و اندازه ضریب بازتاب قطبش هم‌راستا و متعامد.

جدول (۲): مقایسه نتایج.

مرجع	محدوده فرکانسی (GHz)	درصد پهنای باند	روش
[۱]	۱۲.۷-۵.۹	۷۳	حذف پراکندگی
[۱۹]	۳۵.۴-۲۸.۳	۲۲	تبدیل قطبش
[۱۸]	۱۱-۷	۴۴	حذف پراکندگی + تبدیل قطبش
[۲۰]	۲۱.۲-۹.۲	۷۸	حذف پراکندگی + تبدیل قطبش
این مقاله	۲۲-۸.۹	۸۴.۷	حذف پراکندگی + تبدیل قطبش

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، یک فرا سطح کاهنده سطح مقطع راداری پهن باند ارائه گردیده است. این سطح با استفاده از یک سلول واحد حلقوی مربعی صلیبی و دوران یافته آن که در زیر آرایه‌هایی ۴ در ۴ قرار گرفته‌اند، به صورت صفحه شطرنجی ساخته شده است. فرا سطح می‌تواند بازتاب قطبش هم‌راستا را برای تمام زوایای افقی موج تابشی کاهش دهد زیرا تبدیل قطبش و توابع حذف پراکندگی را ترکیب می‌کند. نمونه فرا سطح با پارامترهای هندسی بهینه ساخته و اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی از تطابق خوبی برخوردار بودند به‌طور خاص، فرا سطح می‌تواند در پهنای باند ۸.۹-۲۲GHz سطح مقطع راداری را حداقل به مقدار ۱۰dB کاهش دهد.

۵- مراجع

- [۱] M Mighani, G Dadashzadeh, "Broadband RCS reduction using a novel double layer chessboard AMC surface," IET Electronics Letters, Vol. ۵۲, Issue ۱۴, July ۲۰۱۶, pp. ۱۲۵۳-۱۲۵۵. DOI: ۱۰.۱۰۴۹/el.۲۰۱۶.۱۲۱۴
- [۲] M Mighani, G Dadashzadeh, "Analytical Study and Experimental Verification of the Refraction Angle as a Function of Frequency Due to Surface Waves Incident onto a Tensor Impedance Sheet," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. ۶۷, Issue: ۷, July ۲۰۱۹, pp. ۴۶۴۲-۴۶۴۹. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TAP.۲۰۱۹.۲۹۰۵۷۷۹
- [۳] S. Yu, L. Li, G. Shi, C. Zhu, X. Zhou, and Y. Shi, "Design, fabrication, and measurement of reflective metasurface for orbital angular momentum vortex wave in radio frequency domain," Applied Physics Letters, vol. ۱۰۸, p. ۱۲۱۹۰۲, ۲۰۱۶. DOI: ۱۰.۱۰۶۳/۱.۴۹۴۷۸۹
- [۴] L. Liu, X. Zhang, M. Kenney, X. Su, N. Xu, C. Ouyang, and S. Zhang, "Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude," Advanced materials, vol. ۲۶, pp. ۵۰۳۱-۵۰۳۶, ۲۰۱۴. DOI: ۱۰.۱۰۰۲/adma.۲۰۱۴۰۱۴۸۴

مطابق شکل ۶ نتایج تجربی و شبیه‌سازی از تطابق خوبی برخوردارند. همان‌طور که نشان داده شده، فرا سطح پیشنهادی سطح مقطع راداری را ۱۰dB از ۲۲-۸.۹GHz کاهش می‌دهد. این کاهش سطح مقطع راداری، این سطح را به یکی از پهن‌بندترین فرا سطح‌های کاهنده سطح مقطع راداری تبدیل خواهد نمود که بخش بزرگی از سامانه‌های راداری باند X و Ku را شامل می‌شود. در جدول ۲ نتایج به دست آمده با برخی از مقالات دیگر ارائه شده مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کار انجام شده در این مقاله نسبت به تحقیقات مبتنی بر حذف پراکندگی، تبدیل قطبش و همچنین ترکیب هر دو پهنای باند بیشتری دارد.

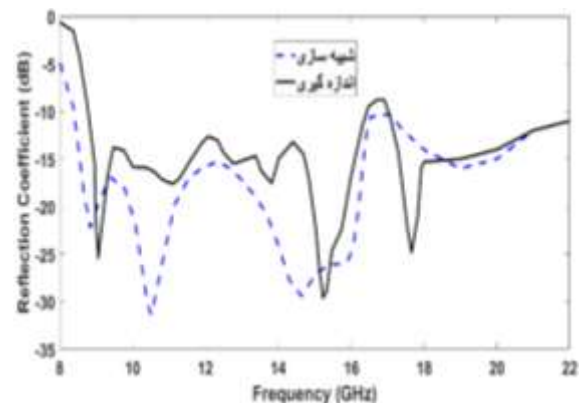
#1	#0	#1	#0	#1	#0	#1	#0
#0	#1	#0	#1	#0	#1	#0	#1
#1	#0	#1	#0	#1	#0	#1	#0
#0	#1	#0	#1	#0	#1	#0	#1
#1	#0	#1	#0	#1	#0	#1	#0
#0	#1	#0	#1	#0	#1	#0	#1

(الف)



(ب)

شکل (۵): (الف) چینش ابر سلول‌ها در فرا سطح (ب) نمایی از چینش اندازه‌گیری.



شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ضریب انعکاس فرا سطح پیشنهادی در قطبش هم‌راستا.

- Objects," Applied Electromagnetic, Vol. ۸, Issue ۱, ۲۰۲۰ (In Persian).
DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۳۹۹.۸.۱.۴.۴
- [۱۵] A. Sharifi, J. Khalilpour, "Patch Antenna Gain Enhancement with Meta-Material Split Ring Resonator Radome," Applied Electromagnetic, Vol. ۳, Issue ۳, ۲۰۱۵, (In Persian).
DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۳۹۹.۳.۳.۵.۴
- [۱۶] F. Mohajeri, M. E. Shariat, "Analysis and Simulation of Diffraction from Metamaterials Structures by Using of Surface Integral Equations and Multi-Level Fast Multipole Method (MLFMM) and Comparison with Moment Method," Applied Electromagnetic, Vol. ۲, Issue. ۲۵, ۲۰۲۲, (In Persian).
DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۴۰۱.۱۰.۲.۳.۹
- [۱۷] R. Zaker, T. Paifeshorkeh, "Wideband Reduction of Radar Cross Section in Compact Coupled Antenna Array by Loading an Array of Sequential Slots," Applied Electromagnetic, Vol. ۱, Issue. ۲۸, ۲۰۲۴, (In Persian).
DOR: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۴۰۳.۱۲.۱.۷.۵
- [۱۸] J. Tian, S. Li, C. He and etc., "Ultrabroadband and Multipolarized Electrically Reconfigurable Reflectarray Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. ۷۳, Issue. ۲, Feb. ۲۰۲۵, pp.۷۲۳-۷۳۲.
DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TAP.۲۰۲۴.۳۴۸۶.۱۴
- [۱۹] R. M. Goud, P. Paul; K. Krishnamoorthy; B. Majumder and etc., "Dual-Functional Reflective-Metastructure Array for Polarization Conversion and Stealth Application," ۲۰۲۴ IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Oct. ۲۰۲۴, Boston, MA, USA.
DOI: ۱۰.۱۱۰۹/ARRAY۵۸۳۷۰.۲۰۲۴.۱۰۸۸۰۴۶۰
- [۲۰] H. Chen; Q. Zhen; J. Chen and etc. "X-Band and Low-RCS Flexible Wideband Antenna Array Based on Metasurface," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. ۲۴, Issue. ۳, March ۲۰۲۵, pp.۵۶۷-۵۷۱.
DOI: ۱۰.۱۱۰۹/LAWP.۲۰۲۴.۳۵۰۷۶۱۹
- [۲۱] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas and etc., "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. ۴۷, Issue. ۱۱, Nov. ۱۹۹۹, pp.۲۰۵۹-۲۰۷۴.
DOI: ۱۰.۱۱۰۹/۲۲.۷۹۸۰۰۱
- [۲۲] C.P. Feiffer, and A. Grbic, "Bianisotropic metasurfaces for optimal polarization control: Analysis and synthesis," Physical Review Applied, vol. ۲, p.۰۴۴۰۱۱, ۲۰۱۴.
DOI: ۱۰.۱۱۰۳/PhysRevApplied.۲.۰۴۴۰۱۱
- [۲۳] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, "Radar cross section," SciTech Publishing, Inc. ۲۰۰۴.
- [۲۴] F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara, "Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. ۵۸, pp.۱۵۵۱-۱۵۵۸, ۲۰۱۰.
DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TAP.۲۰۱۰.۲۰۴۴۳۲۹
- [۲۵] Y. Li, J. Zhang, S. Qu, J. Wang, H. Chen, Z. Xu, and A. Zhang, "Wideband radar cross section reduction using two-dimensional phase gradient metasurfaces," Applied Physics Letters, vol. ۱۰۴(۲۲), p.۲۲۱۱۱۰, ۲۰۱۴.
DOI: ۱۰.۱۰۶۳/۱.۴۸۸۱۹۳۵
- [۲۶] P. Su, Y. Zhao, S. Jia, W. Shi, and H. Wang, "An ultra-wideband and polarization-independent metasurface for RCS reduction," Scientific Reports, vol. ۶, pp.۲۰۳۸۷, ۲۰۱۶.
DOI: ۱۰.۱۰۳۸/srep۲۰۳۸۷
- [۲۷] X. Liu, J. Gao, L. Xu, X. Cao, Y. Zhao, and S. Li, "A coding diffuse metasurface for RCS reduction," IEEE Antennas and wireless propagation letters, vol. ۱۶, pp.۷۲۴-۷۲۷, ۲۰۱۷.
DOI: ۱۰.۱۱۰۹/LAWP.۲۰۱۶.۲۶۰۱۱۰۸
- [۲۸] M. Long, W. Jiang, and S. Gong, "Wideband RCS reduction using polarization conversion metasurface and partially reflecting surface," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. ۱۶, pp.۲۵۳۴-۲۵۳۷, ۲۰۱۷.
DOI: ۱۰.۱۱۰۹/LAWP.۲۰۱۷.۲۷۳۱۸۶۲
- [۲۹] Y. L. Shu, Y. H. Zhang, G. Q. Zhu, S. Y. He, H. C. Yin, and H. Y. "Wideband RCS reduction based on polarization conversion unit cell" (in Chinese), Journal of radio science, vol. ۳۴, pp. ۱۲۶-۱۳۲, ۲۰۱۹.
DOI: ۱۰.۱۲۲۶۵/j.cjors.۲۰۲۱.۲۹
- [۳۰] H. H. Hsiao, C. H. Chu, and D.P. Tsai, "Fundamentals and Applications of Metasurfaces," Small Methods, vol. ۱, p. ۱۶۰۰۰۶۴, ۲۰۱۷.
DOI: ۱۰.۱۰۰۲/smt.۲۰۱۶.۰۰۶۴
- [۳۱] A. malakzadeh, M. Rezayatfam, "A New Light and Broadband Metamaterial Absorber with ۱.۴ mm Thickness for Reducing Radar Cross Section of