

بهبود سطح مقطع راداری بازتابنده های گوشه ای

سیدباقر نوربخش^۱، محمود کرمی^۲

۱- دکتری برق مخابرات میدان، دانشگاه علم و صنعت ایران

۱- دکتری برق مخابرات میدان، دانشگاه صنعتی سمنان

چکیده

بازتابنده های گوشه ای به عنوان یک هدف استاندارد به منظور تصویر برداری، ارزیابی و تنظیم سیستم های راداری استفاده می-شوند. میزان تغییرات سطح مقطع راداری این بازتابنده ها به ازای تغییرات زاویه آنها نسبت به راستای رادار، زیاد است. بنابراین هنگام انجام تست های راداری، در مواقعی که بازتابنده ها دارای چرخش می باشند، انجام تست در بسیاری از مواقع پیچیده و یا غیر ممکن می شود. در این مقاله با افزودن بازتابنده های دو وجهی باریک به بخش انتهایی بازتابنده های سه وجهی، یک مجموعه بازتابنده تمام جهتی با میزان تغییرات سطح مقطع راداری کم در زوایای مختلف ارائه شده است. با توجه به شبیه سازی ها و اندازه گیری های انجام شده، بازتابنده ی ارائه شده دارای ۴۲٪ بهبود در میزان تغییرات سطح مقطع راداری مربوط به خود در مقایسه با دیگر ساختارهای بازتابنده می باشد. همچنین به منظور انجام بررسی های بیشتر در این زمینه، با اعمال تغییرات بر روی ساختار بازتابنده ارائه شده، به طور همزمان یک مصالحه مناسب در میان برخی پارامترهای فیزیکی و الکترومغناطیسی این بازتابنده از قبیل وزن، ابعاد، یکنواختی سطح مقطع راداری و میزان سطح مقطع راداری انجام شده است. در نهایت یک نمونه از بازتابنده طراحی شده، ساخته شده که نتایج RCS اندازه گیری شده، نتایج شبیه سازی ها را تصدیق می نماید.

کلید واژه ها: بازتابنده، سطح مقطع راداری، رادار.

Radar Cross Section Improvement of Corner Reflectors

Bagher Noorbakhsh¹, Mahmood karami²

1- PhD, University of Semnan

1- Assistant Prof., School of Electrical and Computer Engineering, IUST

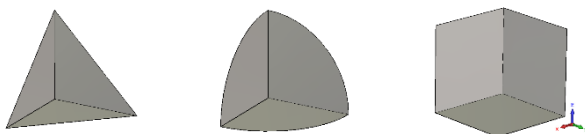
Abstract

Corner reflectors are used as a standard target for imaging, evaluating and adjusting radar systems. The radar cross-section variation of these reflectors is large for the changes in their angles in relation to the radar direction. Therefore, when conducting radar tests, when the reflectors are rotating, the test becomes complicated or impossible in many cases. In this article, by adding narrow dihedral reflectors to the end part of three-sided reflectors, an all-directional reflector set with low RCS variation at different angles is presented. According to the simulations and measurements, the presented reflector has a 42% improvement in the RCS variation compared to other reflector structures. Also, in order to carry out further investigations in this field, by applying changes to the structure parameters of the presented reflector, a suitable compromise between some physical and electromagnetic parameters of this reflector such as weight, dimensions, uniformity of the RCS and the RCS value has been done. Finally, a sample of the designed reflector was built, and the measured RCS results confirmed the results of the simulations.

Keywords: Reflector; Radar cross section; Radar

۱- مقدمه

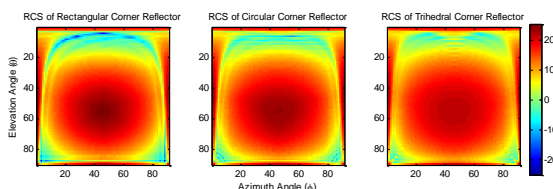
محدودیت حمل وزن در وسایل پرنده یاد شده، بایستی در طراحی- های صورت گرفته، وزن و ابعاد بازتابنده تا حد ممکن کاهش یابد. بنابراین یکی از مهمترین مشکلات در این نوع از تست‌های راداری، عدم امکان تطبیق محور مرکزی بازتابنده با سیستم رادار در زمان انجام اندازه‌گیری‌ها است. این عدم تطبیق ناشی از جابجایی و چرخش بازتابنده در اثر شرایط جوی و نحوه قرارگیری آن است. لذا بازتابنده، بایستی به صورتی طراحی شود که با انحراف از محور مرکزی، سطح مقطع راداری آن حداقل میزان تغییرات را داشته باشد. با توجه به مطالب ذکر شده، به منظور بررسی تاثیر عدم انطباق محور مرکزی بازتابنده بر روی میزان تغییرات سطح مقطع راداری، مطابق شکل ۱ سه نمونه از انواع پرکاربرد بازتابنده‌های گوشه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین منظور، یک شاخص جدید به نام کارایی سطح مقطع راداری با رابطه $\sigma_p = \frac{\sigma_c}{A}$ معرفی شده است، که در آن، σ_c مقدار میانگین مقادیر سطح مقطع راداری تا ۱۰ درجه انحراف از محور بازتابنده و A به عنوان مساحت کل بازتابنده در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- نمای بازتابنده‌ها در نرم‌افزار CST Microwave Studio

همچنین وزن کلی بازتابنده نیز تابعی از A ، ضخامت و جنس فلز تشکیل دهنده آن می‌باشد. سطح مقطع راداری این بازتابنده‌ها به ازای برخی از انحرافات محور مرکزی، با استفاده از روش SBR در نرم افزار CST Microwave Studio محاسبه شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

با استفاده از رابطه کارایی سطح مقطع راداری معرفی شده و بکارگیری برخی محاسبات آماری بر روی نتایج حاصل از محاسبات انجام شده، نتایجی مطابق جدول ۱ ارائه شده است.

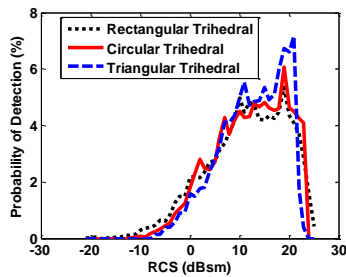


شکل ۲- سطح مقطع راداری انواع بازتابنده های گوشه ای (الف) سه گوش (ب) دایروی و (پ) مربعی مشهور، ابعاد هر ضلع 30cm است.

در سیستم های راداری از بازتابنده های گوشه ای به عنوان یک هدف استاندارد و یا پراکنده ساز مصنوعی امواج الکترومغناطیسی، در کاربردهای مختلفی از قبیل صحنه گذاری در اندازه گیری ها [۱]، مرجع تعیین موقعیت دقیق [۲]، کالیبره کردن عملکرد کلی سیستم [۳] مدل کردن برخی عوارض مصنوعی [۴] و افزایش سطح مقطع راداری [۵] استفاده می شود. به طور کلی، در طراحی یک بازتابنده گوشه ای ویژگی هایی از قبیل، اندازه، پهنای الگو، پایداری و حساسیت RCS بازتابنده نسبت به محل قرار گیری به همراه ابعاد فیزیکی آن، در چگونگی عملکرد بازتابنده به عنوان یک هدف استاندارد موثر می باشد [۶]. از طرفی با توجه به اینکه هر یک از این ویژگی ها دارای تاثیر متقابل بر یکدیگر می باشند، به منظور دستیابی به نتیجه مطلوب در طراحی بازتابنده، بایستی مصالحه مناسبی بین تمامی این ویژگی ها ایجاد شود. در برخی از کاربردهای بیان شده، بازتابنده بایستی به صورت معلق و بدون استفاده از سطوح مهار کننده در فضای آزاد نصب شود. این شرایط موجب می-گردد متناسب با شرایط جوی، بازتابنده در جهات مختلف حرکت و یا چرخش نماید. در بازتابنده های گوشه ای متداول، این چرخش ها موجب کاهش پایداری سطح مقطع راداری می شود. از طرفی در برخی کاربردها استفاده از بازتابنده های کروی، به دلیل ایجاد محدودیت هایی از قبیل میزان سطح مقطع راداری کم، ابعاد بزرگ، وزن زیاد، پیچیدگی ساخت و پوشش دهی مقدور نبوده و استفاده از بازتابنده گوشه ای ترجیح داده می شود.

۲- تعریف مسئله

استفاده از بازتابنده‌ها به دلیل دارا بودن خصوصیات مفید و ویژه، در کاربردهای تحقیقاتی، تجاری و نظامی متداول است. یکی از مهمترین این کاربردها، انجام تست‌های میدانی در سیستم‌های راداری می‌باشد. در اغلب تست‌های راداری، بازتابنده‌ها به عنوان یک هدف استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهینه بودن برخی پارامترهای فیزیکی و الکترومغناطیسی بازتابنده‌ها از قبیل وزن کم و ابعاد کوچک، داشتن مقدار سطح مقطع راداری زیاد و میزان تغییرات بسیار کم در سطح مقطع راداری به ازای انحرافات زاویه‌ای، موجب افزایش دقت و سهولت در روند انجام این تست‌ها می‌شود. در تست‌های راداری به منظور افزایش نسبت سیگنال به کلاتر، بازتابنده توسط یک وسیله پرنده از قبیل پهپاد و یا بالن به صورت معلق در فضای آزاد قرار داده می‌شود. با توجه به ابعاد کوچک و



شکل ۳- تابع چگالی توزیع احتمال سه نوع بازتابنده

۳- بهینه سازی سطح مقطع راداری

با توجه به پرکاربرد بودن بازتابنده های گوشه ای سه وجهی، در سال های اخیر به منظور محاسبه خصوصیات الکترومغناطیسی [۷] و [۸]، بهبود بازدهی [۹] و [۱۰] و بررسی تاثیر پارامترهای ساختار فیزیکی بر روی عملکرد این بازتابنده ها [۱۱]، تحقیقات بسیاری صورت پذیرفته است. لذا در این مقاله، ابتدا بر اساس نتایج بدست آمده از محاسبات صورت پذیرفته بر روی سه نوع بازتابنده معرفی شده، بازتابنده گوشه ای با وجوه مثلثی به عنوان بازتابنده مناسب برای استفاده در تست های راداری یاد شده انتخاب شده است. با این وجود همچنان میزان تغییرات سطح مقطع راداری در این بازتابنده با انحراف از محور آن، زیاد می باشد. مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۳، در صورتی که از مقادیر سطح مقطع راداری با احتمال رخداد بسیار کمتر از ۱ درصد صرف نظر شود، همچنان برای این بازتابنده در زوایای مختلف، میزان سطح مقطع راداری تا 23dBsm تغییر می کند. این میزان تغییرات در سطح مقطع راداری، بر اساس معادلات راداری قابل توجه بوده و موجب کاهش چشمگیر در میزان صحت نتایج بدست آمده از تست های راداری می شود. بنابراین در این مقاله، با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده در شکل ۲ و این موضوع که افزایش طول وجه ها در بازتابنده گوشه ای به نسبت دیگر پارامترها، دارای کمترین تاثیر در RCS می باشد [۱۲]، یک ساختار بازتابنده گوشه ای بهبود یافته مطابق شکل ۴ معرفی شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۲، سطح مقطع راداری در زوایای نزدیک به کناره های صفحات تشکیل دهنده بازتابنده گوشه ای سه وجهی مثلثی معمولی، به میزان بسیار زیادی کاهش می یابد. برای جبران این نقیصه، در بازتابنده بهبود یافته معرفی شده، در هر گوشه ای بازتابنده سه وجهی مثلثی معمولی، یک بازتابنده گوشه ای دو وجهی باریک مستطیلی مطابق شکل ۴ افزوده شده است.

به منظور بررسی نتایج بدست آمده از ساختار بازتابنده معرفی شده، با استفاده از روش عددی SBR محاسبات مورد نیاز در این زمینه انجام شده است. نتایج حاصل از این محاسبات به ازای

جدول ۱- مشخصات آماری اطلاعات RCS بازتابنده های مختلف (dBsm)

دایرو	مثلی	مرب	
۲۳,۳	۲۳,۵	۲۵,۲	RCS مرکز بازتابنده*
۸۶	۸۷	۹۳	RCS نسبی مرکز بازتابنده ($\frac{\sigma_C}{A}$)
-۷	-۱۲	-۲۱	حداقل RCS
۱۲,۵	۱۲,۱	۱۱,۴	میانگین RCS
۶,۴	۷,۲	۷,۹	انحراف از معیار RCS
۶	۸	۲	پهنای زاویه ای (درجه)**

* جایی که RCS بازتابنده در آنجا بیشینه است.

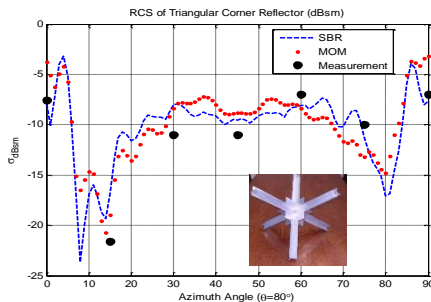
** انحراف مجاز از محور به ازای کاهش حداکثر 1dB از RCS

بر اساس نتایج بدست آمده، در بازتابنده گوشه ای با وجوه مستطیلی، میزان سطح مقطع راداری نسبت به سطح/وزن/ابعاد در برگیرنده آن، بیشتر از دو بازتابنده دیگر می باشد. ولی از طرفی این بازتابنده دارای پایداری سطح مقطع راداری کمی نسبت به تغییرات زوایای است. به عبارت دیگر، در بازتابنده مستطیلی با انحراف از محور مرکزی بازتابنده، مقدار سطح مقطع راداری به میزان زیادی تغییر می کند که این عامل مانع از بکارگیری این بازتابنده در کاربردهایی با میزان پایداری زوایای سطح مقطع راداری مناسب می شود. در شکل ۳، نمودار تابع توزیع چگالی احتمال (PDF) سطح مقطع راداری بازتابنده های گوشه ای مورد نظر، نشان داده شده است. در حالت کلی، در طراحی بازتابنده، هدف اصلی آن است که نمودار PDF سطح مقطع راداری مربوطه، تا جای ممکن متمایل به سمت راست محور افقی (سطح مقطع راداری بیشتر) و با میزان پهنای بسیار کم (احتمال آشکارسازی بیشتر) مربوط به خود باشد. به عبارت دیگر در نمودار PDF سطح مقطع راداری، هر چه میزان پهنای نمودار در نقاط بیشینه احتمال آشکارسازی بیشتر باشد، تغییرات سطح مقطع راداری بازتابنده نیز به ازای تغییرات زوایای بیشتر خواهد بود که این مسئله موجب کاهش چشمگیر عملکرد بازتابنده خواهد شد. لذا بازتابنده هایی که نمودار PDF سطح مقطع راداری آن ها، پهن تر بوده و نقاط بیشینه آن به سمت چپ محور افقی تمایل دارد، به نسبت از عملکرد مناسبی برخوردار نمی باشند. همان طور که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است، بازتابنده گوشه ای با وجوه مثلثی، به نسبت دو بازتابنده دیگر، در مجموع عملکرد بهتری را هم زمینه ایجاد سطح مقطع راداری زیاد و هم در پایداری زوایای مربوط به آن دارا می باشد.

۴- نتایج اندازه گیری

به منظور کاهش هر چه بیشتر میزان تغییرات در سطح مقطع راداری مورد استفاده در تست های راداری، با بکارگیری بازتابنده گوشه ای سه وجهی بهبود یافته معرفی شده، یک بازتابنده تمام جهتی مطابق شکل ۶ طراحی و ساخته شده است. این بازتابنده از ۸ عدد بازتابنده سه وجهی بهبود یافته تشکیل شده است. با بکارگیری روش عددی SBR میزان سطح مقطع راداری بازتابنده تمام جهتی محاسبه شده است. همچنین با استفاده از روش اندازه گیری استاندارد کمان NRL نیز میزان سطح مقطع راداری این بازتابنده اندازه گیری گردیده است.

شکل ۶ سطح مقطع راداری بازتابنده تمام جهتی معرفی شده را نشان می دهد. تطابق خوب نتایج ارائه شده در این شکل نشان دهنده درستی و صحت طراحی بازتابنده بهبود یافته معرفی شده می باشد.



شکل ۶- مقایسه نتایج اندازه گیری با شبیه سازی بازتابنده بهینه سازی شده

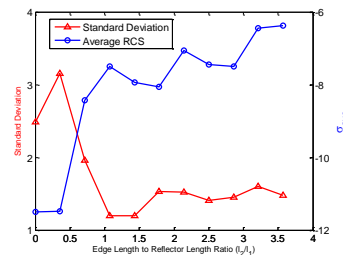
۵- نتیجه گیری

در این مقاله با افزودن بازتابنده های گوشه ای دو وجهی مستطیلی در ساختار بازتابنده گوشه ای سه وجهی مثلثی معمولی، یک بازتابنده بهبود یافته با میزان تغییرات سطح مقطع راداری کم در زوایای مختلف معرفی شده است. نتایج محاسبات و اندازه گیری ها، کاهش ۴۲٪ در میزان تغییرات RCS به ازای تغییر زاویه بازتابنده از رادار را نشان می دهد.

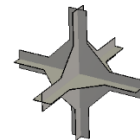
۶- مراجع

- [1] Y. Qin, D. Perissin, and L. Lei, "The design and experiments on corner reflectors for urban ground deformation monitoring in Hong Kong," International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2013, pp. 8, 2013.
- [2] X. Ye, H. Kaufmann, and X. F. Guo, "Landslide monitoring in the three Gorges area using D-INSAR and corner reflectors," Photogrammetric

تغییرات نسبت طول بازتابنده های گوشه ای دو وجهی مستطیلی به طول بازتابنده های گوشه ای سه وجهی مثلثی در شکل ۴ نمایش داده شده است. متناسب با افزایش طول نوار مستطیلی، دیگر پارامترهای فیزیکی بازتابنده معرفی شده از قبیل حجم و وزن کلی آن نیز افزایش می یابد. از این رو برای ایجاد مصالحه مناسب مابین پارامترهای فیزیکی و میزان کاهش تغییرات در سطح مقطع راداری، بر اساس نتایج نشان داده شکل ۴، مناسب ترین مقدار طول برای بازتابنده های گوشه ای دو وجهی مستطیلی زمانی است که این مقدار بیشتر از مقدار طول بازتابنده سه وجهی در نظر گرفته شود.



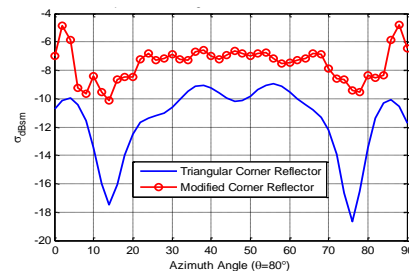
(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) بررسی تاثیر طول نوار دو گوش بر رفتار RCS کل بازتابنده (ب) نمای بازتابنده اصلاح شده

بر اساس نتایج بدست آمده، میزان سطح مقطع راداری یک بازتابنده گوشه ای سه وجهی مثلثی معمولی و یک بازتابنده گوشه ای سه وجهی بهبود یافته در باند X و در محدوده تغییرات زاویه افقی $0 < \theta < 90$ محاسبه گردیده و در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه RCS بازتابنده گوشه ای با نوع اصلاح شده آن

Performance Analysis of Dihedral Corner Reflectors for Slope Movements: A Case Study From Aniangzhai Landslide in China. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. PP. 1-1.

- [14] Fotiou, Kyriaki & Danezis, Chris. (2020). An overview of electronic corner reflectors and their use in ground deformation monitoring applications.
- Eng Remote Sens, Vol. 70, No. 10, pp. 1167–1172, 2004.
- [3] Y. K. Chan, B. K. Chung, and H. T. Chuah, "Transmitter and receiver design of an experimental airborne synthetic aperture radar sensor," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 49, pp. 203-218, 2004.
- [4] G. Schiavon, and D. Solimini, "Dihedral and trihedral corner reflector models for the interpretation of radar returns from urban manufacts," IEEE Proc. Int. Conf. on Geoscience and Remote Sensing. Honolulu, Vol. 7, pp. 2882-2884 ,2000.
- [5] W. Zhan-feng, L. Xu-liang, and J. Qi, "Radar cross-section enhancement of concrete specimen with trihedral corner reflector structure buried," IEEE Proc. Int. Conf. on Antennas, Propagation and EM Theory. Kunming, pp. 905 - 908, 2008.
- [6] K. Sarabandi, and T. C. Chiu, "Optimum corner reflectors design," IEEE Proc. Int. Conf. on Radar. Ann Arbor, pp. 148-153, 1996.
- [7] I. Hanninen, M. Pitkonen, K. I. Nikoskinen, and J. Sarvas, "Method of moments analysis of the backscattering properties of a corrugated trihedral corner reflector," IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 54, No. 4, pp. 1167-1173, 2006.
- [8] S. Sigismondi, "An automatic method for determining the cross section of a trihedral corner reflector in SAR images," IEEE Proc. Int. Conf. on Geoscience and Remote Sensing. Firenze, Vol. 1, pp. 83-84 ,1995.
- [9] A. C. Polycarpou, and C. A. Balanis, "A new approach to improve RCS patterns of trihedral corner reflectors," Proc. Int. Conf. on Antennas and Propagation Society, Vol. 3, pp. 2298-2301 ,1994.
- [10] K. Sarabandi, and T. C. Chiu, "Optimum corner reflectors for calibration of imaging radars," IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 44, No. 10, pp. 1348-1361, 1996.
- [11] J. ZHAO, C. LI, J. YIN, X. SHAN, G. ZHANG, and F. YE, "Effects Analysis of Machining Tolerance on RCS of Corner Reflectors " International Journal of Digital Content Technology and its Applications, Vol. 5, No. 7, 2011.he
- [12] C. Li, Z. Junjuan, J. Yin, Z. Guifan, and S. Xinjian, "Analysis of RCS characteristic of dihedral corner and triangular trihedral corner reflectors," Proc. Int. Conf. on Computer Science and Education. Hefei, pp. 40-43, 2010.
- [13] Xia, Zhuge & Motagh, Mahdi & Li, Tao. (2022).