

Анализ квадратного трёхгранного уголкового отражателя с помощью проводной сетки и МоМ со ступенчатыми базисными функциями

Т. Ф. Данг, А. Ф. Алхадж Хасан, Т. Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

dang.p.2213-2023@e.tusur.ru, alkhadz@tusur.ru, talgat.r.gazizov@tusur.ru

Аннотация. В данной работе проведен анализ характеристик электромагнитного рассеяния от идеально проводящих сплошных квадратных трехгранных уголкового отражателей, аппроксимированных проводными сетками, с использованием метода моментов и ступенчатых базисных функций. Точность такого анализа оценена путем сравнения его результатов с опубликованными: полученными экспериментально и численно. Показано хорошее согласование результатов расчета сечения обратного рассеяния. Сравнены характеристики рассеяния треугольных и квадратных трехгранных уголкового отражателей.

Ключевые слова: рассеиватель; проводная сетка; метод моментов; квадратный трёхгранный уголкового отражатель; ступенчатые базисные функции; поперечное сечение обратного рассеяния

I. ВВЕДЕНИЕ

Оценка деформации земной поверхности на различных рельефах с помощью интерферометрического радара с синтезированной апертурой (ИнРСА) часто становится затруднительной, если рассматривать только характеристики изображений ИнРСА, полученных на отражающих поверхностях рельефа. Это связано с тем, что изменение отражательной способности исследуемой территории является осложняющим фактором при использовании ИнРСА. Поэтому необходимо рассмотреть возможность использования отражателей, которые увеличивают отраженное поле для получения более четкого изображения. В настоящее время помимо перманентных рассеивателей (ПР) [1], которые являются стабильными отражателями в природе, в качестве рассеивающих структур в ИнРСА-приложениях используются уголкового отражатели (УО) [2]. Каждый из этих типов имеет свои особенности, которые могут быть использованы в различных случаях. Например, бетонные конструкции в городах считаются хорошими отражателями, но их трудно найти в не городских районах при отслеживании деформаций в сельской местности [3], поэтому в таких ситуациях используются УО. УО обычно изготавливаются из хорошего проводящего материала и имеют различные геометрические формы, такие как двугранные, трехгранные, пятиугольные УО [4].

Кроме того, что УО обладают большим поперечным сечением обратного рассеяния (ПСОП) в широком угловом диапазоне падающих волн, они также являются удобными пассивными устройствами с низкой стоимостью изготовления и простыми методами

обслуживания [5]. Благодаря этим свойствам они широко используются в качестве опорной цели для калибровки радарных систем в различных гражданских и военных приложениях, а в некоторых случаях – для улучшения характеристик направленности антенн с уголкового отражателем [6]. В военных приложениях эти структуры также позволяют маскировать наземные и воздушные цели (такие как корабли, самолеты, ракеты, вертолеты), чтобы обмануть противника, уменьшая поле рассеяния от этих целей, делая их невидимыми для обычных радаров [7, 8]. В гражданских приложениях исследователи рассматривают методы улучшения поля рассеяния УО, когда он используется для точного мониторинга тонких изменений в деформации поверхности земли [3].

Выбор оптимального УО – непростая задача, поскольку он зависит не только от области применения, но и от многих факторов [9]. Трехгранные УО (ТУО) широко используются в РСА-приложениях, особенно квадратные ТУО [10], поскольку они обеспечивают лучший ПСОП, чем двугранные УО [11]. Исследователи ранее анализировали рассеивающие свойства УО, используя методы геометрической оптики в сочетании с геометрической теорией дифракции или физической оптикой (ФО) вместе с физической теорией дифракции [12, 13]. В этих случаях анализ проводится, как если бы структура представляла собой двумерный объект [13]. Однако использование оптических методов для анализа УО имеет множество недостатков, основной из которых отмечен в [14]. Кроме того, исследование рассеивающих свойств ТУО требует полноволнового трехмерного анализа. Между тем, использование проводных сеток (ПС) на основе метода моментов (МоМ) со ступенчатыми базисными функциями (СБФ) упрощает анализ антенных структур [15] и даже рассеивающих УО [14].

В предыдущих работах анализ различных простых рассеивающих структур, включая двугранные УО с использованием ПС, проводился с помощью специального программного кода МоМ с СБФ [14, 16]. Однако при анализе более сложных структур, таких как ТУО, важно верифицировать результаты этого кода. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки компьютерного кода для проектирования новых разреженных рассеивателей [15]. Поэтому целью данной работы является верификация результатов анализа квадратных рассеивателей ТУО в виде ПС, полученных с помощью МоМ с СБФ. Эти результаты сравниваются с результатами, полученными численно с помощью CST [17], метода конечных разностей во временной области (МКРВО) [18], ФО и

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2023-0014.

метода эквивалентных токов (ФО_МЭТ) [18, 19], ФО [3], а также экспериментально [17, 19]. Кроме того, сравниваются характеристики рассеянного поля, создаваемого треугольными и квадратными ТУО, и обсуждается их использование в различных условиях. Данная работа организована следующим образом: в разделе II приведены параметры рассматриваемых квадратных ТУО и их эквивалентных ПС. В разделе III представлены результаты их ПСОР и сравнены с опубликованными в других работах, для оценки их точности. В разделе IV кратко изложены выводы и направления будущих исследований.

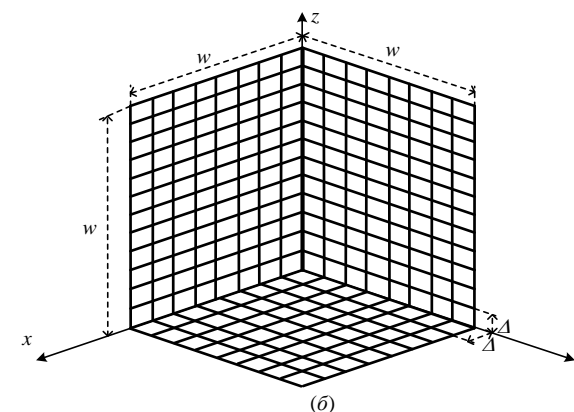
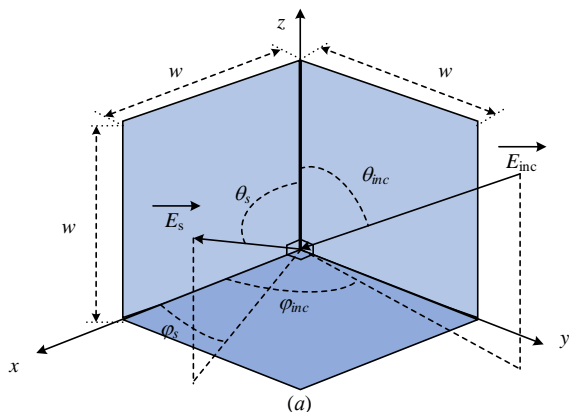


Рис. 1. Сплошной квадратный ТУО (а) и его эквивалентная ПС (б)

Каждая квадратная поверхность структуры ТУО из ПС разбита на ячейки, длина сторон которых равна Δ (рис. 1б) (каждая сторона ячейки ПС рассматривается как один провод, представленный одним сегментом длиной Δ). Значение Δ определяется как $\lambda/6 \geq \Delta \geq \lambda/20$ в соответствии с [20], а радиус провода a определяется по правилу равной площади как $a = \Delta/2\pi$ согласно [21]. Для возбуждения рассеивателей используются падающие плоские волны с линейной вертикальной поляризацией (θ -поляризацией) и направлениями, определяемыми

II. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ПС КВАДРАТНОГО ТУО

Изометрический вид исследуемого идеально проводящего квадратного ТУО показан на рис. 1а вместе с его геометрическими параметрами. Он состоит из трех квадратных поверхностей одинакового размера с длиной стороны w . Они расположены в плоскостях xOz , yOz , xOy и ортогональны друг другу, а начало системы координат совпадает с точкой их пересечения. На рис. 1б показаны ТУО, аппроксимированные с помощью ПС.

углами φ^{inc} и θ^{inc} . При этом рассеянные волны при рассмотрении ПСОР имеют направления $\varphi^s = \varphi^{inc}$ и $\theta^s = \theta^{inc}$. Стоит отметить, что единица измерения ПСОР указаны здесь в децибелах от квадратного метра (дБм²). В данной работе рассматриваются 6 квадратных структур ТУО с различными размерами. Их геометрические параметры вместе с направлениями падающих плоских волн, используемых для их возбуждения, приведены в табл. 1. В ней также указаны методы, использованные для анализа этих структур, в опубликованных работах.

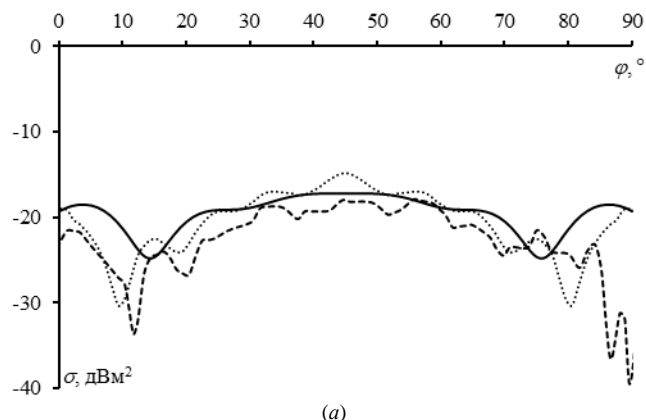
ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ АНАЛИЗА РАССМАТРИВАЕМЫХ КВАДРАТНЫХ ТУО

Структура	w , м	a , м	Δ , м	Количество ячеек	φ^{inc} , °	θ^{inc} , °	f , ГГц	Метод анализа
S_1 [17]	0,01	0,000047	0,0003	33×33×33	0–90	90	100	CST / измерение
S_2 [17]	0,015	0,000052	0,00033	45×45×45	0–90	90	100	CST / измерение
S_3 [17]	0,02	0,000052	0,00033	60×60×60	0–90	90	100	CST / измерение
S_4 [18]	5	0,016	0,1	50×50×50	0–90	66	0,003	МКРВО / ФО_МЭТ
					45	0–90		
S_5 [19]	7	0,016	0,1	70×70×70	0–90	70	0,003	МКРВО / ФО_МЭТ
					50	0–90		
S_6 [3]	0,2	0,032	0,0036	55×55×55	0–90	45	9,4	ФО
					45	0–90		

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ

Сначала анализируются ПСОР для S_{1-3} , полученные с помощью МоМ с СБФ на основе ПС. Эти результаты сравниваются с полученными с помощью CST и измеренными в [17] (рис. 2). Видно, что результаты ПСОР, полученные численно, хорошо согласуются, и разница между ними на максимальном уровне главного лепестка уменьшается с увеличением размера структуры (для S_1 разница 2,3 дБ, S_2 – 1,1 дБ, S_3 – 0,8 дБ). Однако эти результаты довольно сильно отклоняются от экспериментальных. Наибольшее отклонение результатов МоМ для S_1 составляет 20 дБ, S_2 – 11,6 дБ, S_3 – 13,4 дБ. С увеличением размера структуры увеличивается ПСОР. Наблюдаемые два пика (при $\varphi^s = 0$ и 90°) возникли из-за того, что падающая волна перпендикулярна поверхности ТУО. С увеличением

размера ТУО уровень этих пиков возрастает, а ширина уменьшается, что согласуется с теорией рассеяния.



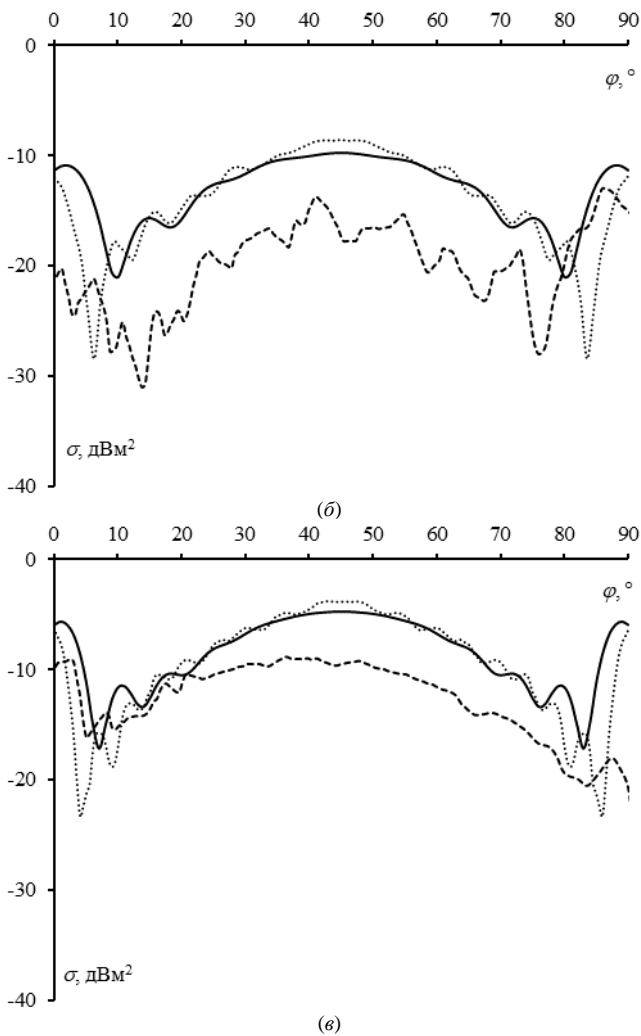


Рис. 2. ПСОР для S_1 (а), S_2 (б), S_3 (в), полученные экспериментально (---) и численно с помощью МоМ на основе ПС (—) и CST (···).

Далее ПСОР для S_4 , полученные с помощью МоМ с СБФ на основе ПС, сравниваются с полученными с помощью МКРВО и ФО_МЭТ в [18] (рис. 3). Видно, что сравниваемые результаты хорошо согласуются между собой. Когда падающая волна направлена в плоскости $\theta=66^\circ$, полученные результаты ПСОР симметричны относительно плоскости $\varphi=45^\circ$. С другой стороны, когда $\varphi=45^\circ$, результаты ПСОР несимметричны, и их максимумы достигаются при $\theta \approx 56^\circ$. Если падающая волна направлена в плоскости θ , значения ПСОР при $\theta < 20^\circ$ меньше, чем при $\theta > 80^\circ$, поскольку эффективная площадь меньше. Аналогичные наблюдения, отмеченные для S_5 , также применимы к S_4 . Это подтверждается сравнением ПСОР для S_5 , полученных с помощью МоМ с СБФ на основе ПС, с полученными экспериментально и численно с помощью ФО_МЭТ в [19] (рис. 4).

Затем результаты ПСОР для S_6 , полученные с помощью ПС на основе МоМ с СБФ, сравниваются с полученными с помощью ФО из [3] (рис. 5). Заметно, что результаты ПС значительно отличаются от результатов ФО. Однако, когда падающая волна направлена в плоскости $\varphi=45^\circ$, ПСОР ПС достигает максимума при $\theta^s=55^\circ$, что совпадает с результатами ФО. Отклонения максимумов ПСОР для ПС и ФО составляют около 0,6 дБ, когда падающая волна находится в плоскости $\theta=45^\circ$, и 2,6 дБ – в плоскости $\varphi=45^\circ$.

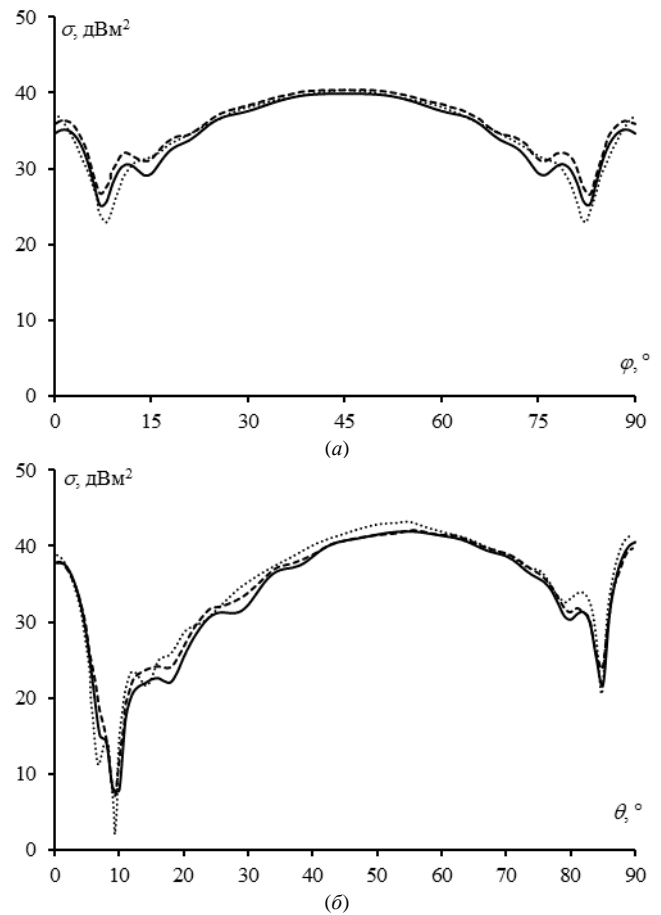


Рис. 3. ПСОР для S_4 , полученные с помощью МоМ на основе ПС (—), ФО_МЭТ (···), и МКРВО (---) в плоскостях $\theta=66^\circ$ (а) и $\varphi=45^\circ$ (б).

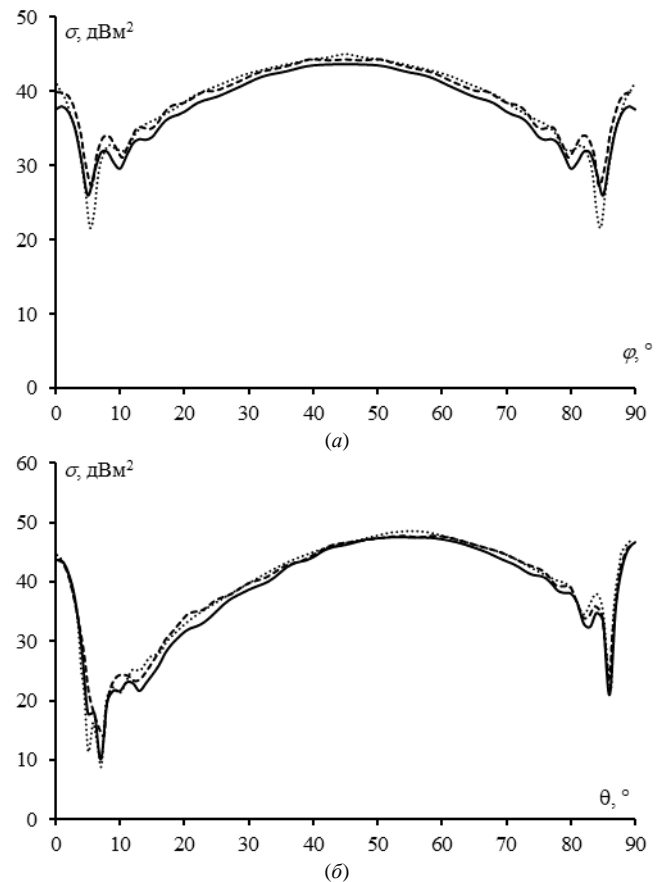


Рис. 4. ПСОР для S_5 , полученные экспериментально (---) и численно с помощью МоМ на основе ПС (—) и ФО_МЭТ (···) в плоскостях $\theta=70^\circ$ (а) и $\varphi=50^\circ$ (б).

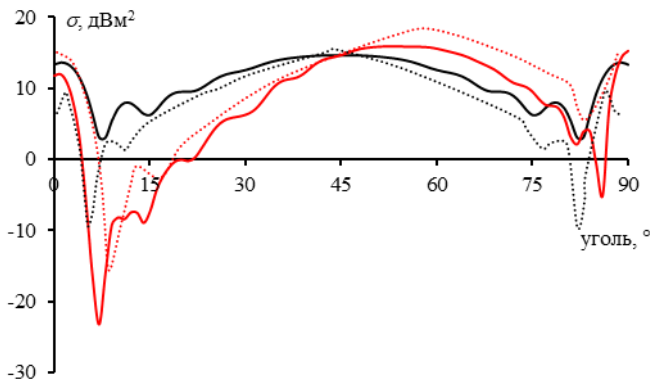


Рис. 5. ПСОР для S_6 , полученные с помощью МоМ на основе ПС (—) и ФО (---) в плоскостях $\theta=45^\circ$ (черные) и $\varphi=45^\circ$ (красные).

Наконец, для S_6 и треугольного ТУО, которые имеют аналогичные размеры, ПСОР получены с помощью МоМ на основе ПС с СБФ, когда падающая волна направлена в плоскости $\varphi=45^\circ$, и сравнены с данными, полученными с помощью ФО из [3] (рис. 6). Видно, что обе структуры достигают максимума ПСОР при $\varphi=45^\circ$, $\theta \approx 55^\circ$. Квадратный ТУО дает больший максимум главного лепестка, чем треугольный ТУО. В частности, для квадратного ТУО он равен 15,8 дБ, а треугольного – 7,8 дБ (на 8 дБ меньше). Это объяснимо тем, что квадратный ТУО имеет большую эффективную площадь поверхности, чем треугольный. Поэтому при идеальных углах падения ($\varphi=45^\circ$, $\theta=55^\circ$) использование квадратного ТУО для обнаружения предпочтительнее, чем треугольного. Однако большая эффективная площадь означает, что требуется больше материалов, они дороже, и на них легче влияют условия окружающей среды, такие как погода, рельеф и т. д.

Также можно заметить, что для квадратного ТУО уменьшение ПСОР в районе угла $\theta=55^\circ$ происходит быстрее, чем для треугольного ТУО. Это означает, что ширина главного лепестка ПСОР квадратного ТУО меньше, чем у треугольного. Чем больше эффективная площадь поверхности, тем меньше ширина главного лепестка. В частности, ширина главного лепестка на уровне минус 3 дБ от максимума ПСОР, следующая: для квадратного ТУО – 27° (при 12,8 дБ), а треугольного – 38° (при 4,8 дБ). Исходя из этого, можно сделать вывод, что, хотя квадратный ТУО дает более высокий ПСОР (большее поле рассеяния), его устойчивость к угловым отклонениям гораздо ниже, чем у треугольного ТУО, что ограничивает его применение, особенно на сложных участках местности (его сложнее обнаружить из-за узкого главного лепестка).

Кроме того, из приведенных выше результатов сравнения видно, что треугольный ТУО лучше квадратного выдерживает угловое отклонение падающей волны, сохраняя уровень ПСОР близким к максимальному при идеальных углах. Однако треугольный ТУО имеет гораздо меньшее чем квадратный, рассеянное поле. Поэтому решение о выборе конкретного ТУО для размещения в месте, где требуется мониторинг деформации рельефа, необходимо принимать с особой внимательностью.

Как уже упоминалось выше, помимо критерия большого поля рассеяния, необходимо учитывать непредсказуемые природные условия, такие как сезонная погода, изменения растительного покрытия и другие связанные с этим искусственные или природные

факторы. Поскольку треугольные ТУО могут быть применимы в районах со сложными условиями окружающей среды, квадратные ТУО, наоборот, идеально подходят для применения в районах с большим количеством помех со стороны окружающей среды, таких как городские жилые районы и районы, где требуется высокая точность обнаружения. Кроме того, такие районы более доступны и часто регулярно обслуживаются, что позволяет использовать весь потенциал ТУО и получать наиболее эффективные результаты наблюдения.

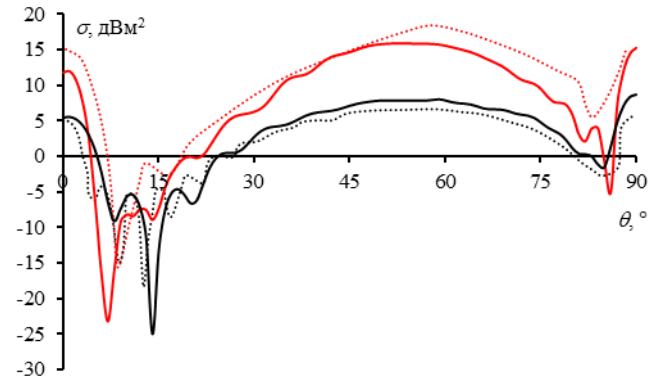


Рис. 6. ПСОР для S_6 (красные) и треугольный ТУО (черные), полученные с помощью МоМ на основе ПС (—) и ФО (---).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен комплексный сравнительный анализ характеристик рассеяния от сплошных идеально проводящих квадратных ТУО, аппроксимированных с помощью ПС. Основной вклад данной работы заключается в доказательстве эффективности использования МоМ с СБФ на основе ПС для анализа таких структур и демонстрации точности их результатов. Для верификации результатов выполнено их сравнение с полученными экспериментально и численно в других опубликованных работах. Сравнение показало хорошее согласие в расчетах поля рассеяния. Кроме того, сравнены характеристики рассеянного поля для треугольных и квадратных ТУО, а также обсуждены возможности их применения. В будущем МоМ с СБФ на основе ПС могут эффективно использоваться для создания разреженных рассеивающих структур ТУО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Nikaein T., Arefi H., Akbari V. Added value of multitemporal polarimetric UAVSAR data for permanent scatterers detection, // 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2018). Валенсия, Испания. 2018. С. 653–656.
- [2] Yuan Y., Ji L., Wang Z., Yang D., Zhang B., Wang H. Design of a High Precision Spaceborne Millimeter Wave SAR Corner Reflector // 2022 3rd China International SAR Symposium (CISS). Шанхай, Китай. 2022. С. 1–5.
- [3] Li C., Yin J., Zhao J., Zhang G., Shan X. The selection of artificial corner reflectors based on RCS analysis // Acta Geophysica. 2012. №. 60. С. 43–58.
- [4] Nohara E. L., Miacci M. A. S., Peixoto G. G., Martin I. M., Rezende M. C. Radar cross section reduction of dihedral and trihedral corner reflectors coated with radar absorbing materials (8–12 GHz) // Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2003). Бразилия. 2003. №. 1. С. 479–484.
- [5] Gennarelli C., Riccio G., Corona P., G. Ferrara. Evaluation of the field backscattered by loaded trihedral corner reflectors // Journal of electromagnetic waves and applications. 2003. №. 17. С. 529–550.
- [6] Harmouch A., El Moucary C., Ziade M., Finianos J., Akkari C., Ayoub S. Enhancement of directional characteristics of corner reflector antennas using metallic scatters // 2012 19th International

- Conference on Telecommunications (ICT). Джунья, Ливан. 2012. С. 1–4.
- [7] Ying Wang L., Jiang N., Sun Y. The mechanism analyzing and use of corner reflector against anti-ship missiles // 2017 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMSCCE 2017). 2017. С. 998–1002.
- [8] Kang H. J., Kweon H., Jo Y. C., Kim K. Feasibility study of corner reflector for radar countermeasures and deception for conventional forces // Journal of the Society of Naval Architects of Korea. 2005. №. 42, С. 421–426.
- [9] Sarabandi K., Tsen-Chieh Chiu. Optimum corner reflectors design // Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference. Анн Арбор, штат Мичиган, США. 1996. С. 148–153.
- [10] Crisp D. J. Robust absolute calibration for SAR // 2018 International Conference on Radar (RADAR). Австралия. 2018. С. 1–6.
- [11] Li C., Zhao J., Yin J., Zhang G., Shan X. Analysis of RCS characteristic of dihedral corner and triangular trihedral corner reflectors // 2010 5th International Conference on Computer Science & Education. Хэфэй, Китай. 2010. С. 40–43.
- [12] Anderson W. Consequences of nonorthogonality on the scattering properties of dihedral reflectors // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1987. №. 35. С. 1154–1159.
- [13] Knott E. RCS reduction of dihedral corners // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1977. №. 25, С. 406–409.
- [14] Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., Gazizov T. R. MoM scattering analysis of dihedral corner reflector: TALGAT verification // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Выборг, Россия. 2024. To be published.
- [15] Alhaj Hasan A. F., Nguyen M.T., Kuksenko S.P., Gazizov T.R. Wire-grid and sparse MoM antennas: past evolution, present implementation, and future possibilities // Symmetry. 2023. №. 15. С. 378.
- [16] Dang T. P., Alhaj Hasan A. F., T. R. Gazizov. Wire grid scatterer modeling: TALGAT verification // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Сочи, Россия. 2024. To be published.
- [17] Xueying N., Yuli Z., Feidi X., Jianguo, Lu Xin H. Cross section measurements of scale-model tactical targets by using 0.1 THz compact radar system // Chin. Opt. Lett. 2017. №. 15.
- [18] A. C. Polycarpou, C. A. Balanis and P. A. Tirkas. Radar cross section evaluation of the square trihedral corner reflector using PO and MEC // Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Анн Арбор, штат Мичиган, США. 1993. №. 3. С. 1428–1431.
- [19] Polycarpou A. C., Balanis C. A. Radar cross section of trihedral corner reflectors using PO and MEC // Annales Des Télécommunications, 1995. №. 50. С. 510–516.
- [20] Garthwaite M. C., Nancarrow S., Hislop A., Thankappan M., Dawson J.H., Lawrie S. The design of radar corner reflectors for the Australian geophysical observing system: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and SAR calibration at multiple microwave frequency bands // 2015.
- [21] Rubinstein A., Rachidi F., Rubinstein M. On wire-grid representation of solid metallic surfaces // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. №. 47. С. 192–195.