

14. *Semenikhin A.I. and Semenikhina D.V.* Cylindrical Anisotropic Metasurfaces with Pancharatnam-Berry Phase Bigradient Helical Coding and Anomalous Scattering, *2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2022*, pp. 337-340.
15. *Yang L.-J., Sun S. and Sha W.E.I.* Ultrawideband reflection-type metasurface for generating integer and fractional orbital angular momentum, in *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, March 2020, Vol. 68, No. 3, pp. 2166-2175.
16. *Jiang L., Yu S. and Kou N.* Asymmetric Transmission of OAM Vortex Waves by Cylindrical Janus Metasurface, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023.
17. *Meng Z.K. and Shi Y.* Antenna array design with self-adaptive in-band radar cross section reduction and beam scanning, in *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, Feb. 2023, Vol. 71, No. 2, pp. 1820-1831.
18. *Soric J.C., Alù A., Kerkhoff A. and Rainwater D.* Experimental demonstration of a conformal mantle cloak for radio-waves, *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, IL, USA, 2012*, pp. 1-2.
19. *Tay C.Y. and Chen Z.N.* Azimuthally inhomogeneous metasurface cloak for cylindrical objects, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Jan. 2021, Vol. 69, No. 1, pp. 254-262.
20. *Tay C.Y., Chen Z.N. and Hee D.* Single-layer dual-band microwave metasurface cloak of conducting cylinder, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, June 2019, Vol. 67, No. 6, pp. 4286-4290.
21. *Monti A., Soric J.C., Alù A., Toscano A. and Bilotti F.* Anisotropic mantle cloaks for tm and te scattering reduction, in *IEEE Trans. Antennas Propag.*, April 2015, Vol. 63, No. 4, pp. 1775-1788.
22. *Vellucci S., Monti A., Toscano A. and Bilotti F.* Scattering manipulation and camouflage of electrically small objects through metasurfaces, *Phys. Rev. Appl.*, Mar. 2017, Vol. 7, No. 3, p. 034032.
23. *Abramowitz M. and Stegun I.A.* Handbook of mathematical functions. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1046, 1972, pp. 358-374.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Семенихин Андрей Илларионович – Южный федеральный университет; e-mail: anilsem@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: + 79061831649; кафедра АиРПУ; к.т.н.; доцент.

Климов Алексей Владимирович – e-mail: avklimov@sfnu.ru; тел.: 89198745389; кафедра АиРПУ; к.т.н.; с.н.с.

Савицкий Алексей Николаевич – e-mail: savicky@sfnu.ru; тел.: + 79287780975; кафедра АиРПУ; аспирант.

Semenikhin Andrey Illarionovich – Southern Federal University; e-mail: anilsem@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: + 79061831649; the department of A&RTD; cand. of eng. sc.; associate professor.

Klimov Alexey Vladimirovich – e-mail: avklimov@sfnu.ru; phone: + 89198745389; the department of A&RTD; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Savitskiy Alexey Nikolaevich – e-mail: savicky@sfnu.ru; тел.: + 79287780975; the department of A&RTD; postgraduate student.

УДК 621.396.96

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-267-276

К.А. Синянян, Ю.В. Юханов, И.В. Ильин, И.В. Мерглодов

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛОЗАМЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ В БЭЭХОВОЙ КАМЕРЕ

Анализируются развитие мирового и российского рынков беспилотных летательных аппаратов, перспективы развития и роста рынка беспилотных летательных аппаратов. Подчеркивается важность достоверного измерения эффективной поверхности рассеяния малозаметных беспилотных летательных аппаратов. Рассматриваются методы уменьшения паразитного отражения от опорно-поворотного устройства внутри безэховой камеры –

использование колонны из радиопрозрачного материала и использование пилона из проводящего материала. Приведены результаты расчетов в HFSS применения колонны из радиопрозрачного материала и пилона из проводящего материала. Анализируется влияние учета фона безэховой камеры на достоверность измерения эффективной поверхности рассеяния малозаметных летательных аппаратов и существующие методы учета фона безэховой камеры, позволяющие снизить паразитные обратные отражения в безэховой камере при измерении малозаметных объектов. Рассматривается теньевая зона, возникающая на задней стенке безэховой камеры при измерении малозаметных объектов в безэховой камере. Анализируется вклад теньевой зоны, возникающей на задней стенке безэховой камеры при измерении эффективной поверхности рассеяния малозаметных объектов, на достоверность измерения эффективной поверхности рассеяния малозаметных объектов внутри безэховой камеры и демонстрируется необходимость учета вклада теньевой зоны при измерениях эффективной поверхности рассеяния малозаметных объектов в безэховой камере. Приведен классический метод учета фона безэховой камеры, являющийся основой предложенного нового метода. Разобран основной недостаток классического метода учета фона безэховой камеры. Предложен новый метод измерения моностатических диаграмм обратного рассеяния, позволяющий учесть недостаток классического метода учета фона безэховой камеры при измерении эффективной поверхности рассеяния малозаметных объектов внутри безэховой камеры. Суть этого метода заключается в использовании клина из проводящего материала, который располагается в теньевой зоне задней стенки безэховой камеры, непосредственно за измеряемым малозаметным объектом. Эффективность нового метода показана в программной среде HFSS, на созданной в HFSS модели безэховой камеры БЭК ЦКП ПЭДиАИ кафедры АиРПУ ЮФУ.

Малозаметные летательные аппараты; безэховая камера; эффективная поверхность рассеяния; измерение диаграммы обратного рассеяния; метод учета фона камеры.

K.A. Sinanyan, Yu.V. Yukhanov, I.V. P'in, I.V. Merglodov

DETECTION OF STEALTH OBJECTS IN AN ANECHOIC CHAMBER

The development of the global market of unmanned aerial vehicles and the Russian market of unmanned aerial vehicles is considered and analyzed. Prospects for the development and growth of the unmanned aerial vehicles market. The importance of reliable measurement of the effective scattering surface of stealth unmanned aerial vehicles is considered. The methods of reducing parasitic reflection from a pivoting support device inside an anechoic chamber are considered - the use of a column made of radio-transparent material and the use of a pylon made of conductive material. The results of calculations in HFSS using a column made of radio-transparent material and a pylon made of conductive material are presented. The effect of taking into account the background of an anechoic chamber on the reliability of measuring the effective scattering surface of stealth aircraft is considered. The existing methods of accounting for the background of an anechoic chamber are analyzed, which allow reducing parasitic back reflections in an anechoic chamber when measuring stealth objects. The shadow zone that appears on the back wall of an anechoic chamber when measuring objects in an anechoic chamber is considered. The contribution of the shadow zone arising on the back wall of the anechoic chamber when measuring objects to the reliability of measuring stealth objects inside the anechoic chamber is analyzed and the need to take into account the contribution of the shadow zone when measuring stealth objects in the anechoic chamber is shown. The classical method of accounting for the camera background, which is the basis of the proposed method, is described. The main drawback of the classical method of accounting for the background of an anechoic chamber is described. A new method for measuring mono static backscattering diagrams is proposed and described. The new method of measuring backscattering diagrams allows us to take into account the disadvantage of the classical method of accounting for the background of an anechoic chamber when measuring i stealth objects inside an anechoic chamber. The essence of the new method is to use a wedge of conductive material, which is located in the shadow zone of the back wall of the anechoic chamber, directly behind the measured stealth object. The effectiveness of the new method is shown in the HFSS software environment, based on the HFSS model of an anechoic chamber of the Southern Federal University.

Stealth aircraft; anechoic chamber; effective scattering surface; backscattering diagram measurement; camera background accounting method.

Введение. В настоящее время наблюдается тенденция роста рынка беспилотных воздушных судов (БВС). Согласно данным фонда «Центр стратегических разработок» (ЦСР), объем мирового рынка беспилотных авиационных систем (БАС) в 2021 г. составил 26,3 млрд долларов США. К 2026 г. прогнозируется рост рынка БАС до 41,3 млрд долларов США [1, 2]. По данным Asia Perspective [3], на которые ссылаются «Центр стратегических разработок», мировым лидером по производству БАС является Китай.

Согласно исследованиям Drone Industry Insight [4], отраслями, которые лидируют по количеству использования дронов на данный момент, являются энергетический сектор, строительство и сельское хозяйство. БАС применяются для геодезии и картографии, мониторинга и съемок.

В мировом рынке беспилотников доля России составляет 0,3 % по количеству БАС, по данным на 2022 год. По стоимости доля российского рынка в мировом рынке беспилотников составляла 2-3% [1, 5]. Количество поданных патентов на беспилотные летательные аппараты в России с 2012 по 2022 составляет 25984.

Основным мешающим фактором интеграции БАС в единое пространство России ресурс <https://nti-aeronet.ru> считает отсутствие апробированных стандартов и технологий для обнаружения, распознавания и предотвращения столкновения, а также управления, контроля, связи и навигации.

Возросшую интенсивность применения БАС показали современные военные конфликты [7–9].

Для обнаружения и распознавания беспилотных авиационных систем необходимо знать радиолокационные характеристики (РЛХ) БАС. Измерение РЛХ, в частности эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) беспилотных летательных аппаратов, требует правильного учета электромагнитного поля окружающих объектов и среды, чтобы они не вносили искажения в результат измерений.

Для точного измерения ЭПР малозаметного объекта часто используют метод учета фона камеры. Но как показывает практика, простое измерение фона и дальнейший вычет его из результата измерения объекта не совсем корректен. Прежде всего необходимо избавиться от паразитных отражений от опорно-поворотного устройства (ОПУ).

Рассмотрим два основных метода для уменьшения паразитных отражений от опорно-поворотного устройства в БЭК [10, 11]. Первый метод использует пилон из хорошо проводящего материала, например меди, второй – колонны из радиопрозрачного материала.

Исходя из представленных результатов (рис. 1) видно, что пилон из проводящего материала и колонна из радиопрозрачного материала рассеивают большую часть электромагнитной энергии, приходящейся на ОПУ, на заднюю стенку БЭК. Но форма диаграммы рассеяния колонны более направленная, и теневой лепесток более направленны, чем у пилон. Соответственно, рассеивающие свойства колонны хуже, чем у пилон.

Каким бы хорошим ни было качество радиопоглощающего материала (РПМ), часть ЭМ энергии, направленной на заднюю стенку БЭК, отразится обратно, что может внести существенные искажения в случае измерения малозаметных объектов [10]. Таким образом, использование пилон из проводящего материала целесообразнее для уменьшения паразитных отражений от ОПУ в сравнении с использованием колонны из радиопрозрачного материала.



Рис. 1. Сравнение бистатических диаграмм обратного рассеяния пилона и колонны

Проведен расчет БЭК кафедры АиРПУ ЮФУ с ОПУ в HFSS для выявления трассировки распространения отраженных лучей от ОПУ и при использовании пилона. Результаты можно увидеть на рис. 2 и 3.

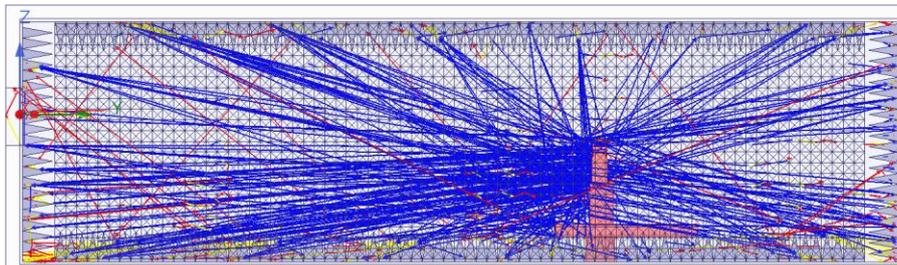


Рис. 2. Трассировка лучей ЭМ волны, полученная при моделировании в HFSS БЭК ЦКП ПЭДиАИ с ОПУ

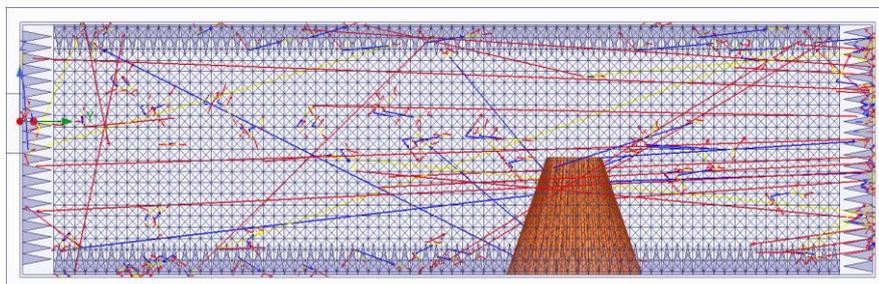


Рис. 3. Трассировка лучей ЭМ волны, полученная при моделировании в HFSS БЭК ЦКП ПЭДиАИ при использовании пилона

Описание проблемы. Рассмотрим метод учета фона. На рис. 4 изображена схема камеры для измерения фона БЭК. При измерении фона камеры, вся задняя стенка излучает обратно некоторую часть энергии, которая на нее попадает. Обозначим энергию, отраженную от задней стенки, через $\sigma_{ст}$, а энергию, отраженную от объекта, через $\sigma_{об}$. Так как объект малый, то при его измерении

$$\sigma_{ст} \gg \sigma_{об}. \quad (1)$$

возникает тень благодаря тому, что электромагнитная волна распространяется в БЭК по законам геометрической оптики, как показано на рисунке 5. В результате энергия, отраженная от теневой области, не учитывается в результатах измерения объекта.

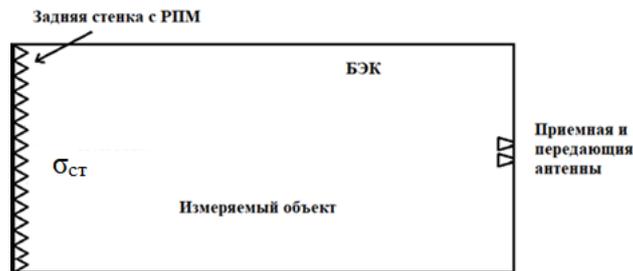


Рис. 4. БЭК

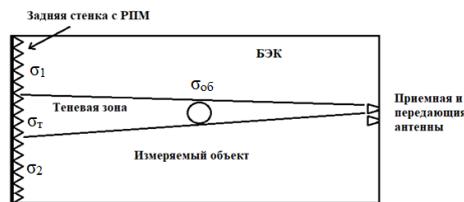


Рис. 5. Измерение объекта в БЭК

Энергия, отраженная от задней стенки БЭК, состоит из трех составляющих:

$$\sigma_{ст} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{т}, \quad (2)$$

где σ_1 и σ_2 – энергия, отраженная от соседних с теневой областью частей задней стенки, а $\sigma_{т}$ – энергия, отраженная от теневой области.

Рассмотрим отражения, которые возникают при измерении объекта:

$$\sigma_{изм} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_{об}. \quad (3)$$

Не трудно заметить, что в выражении (3) отсутствует составляющая $\sigma_{т}$ из-за того, что при измерении объекта электромагнитная волна не попадает в область задней стенки за объектом (электромагнитная волна распространяется в БЭК по законам геометрической оптики). Для получения результата, в котором учтен вклад фона, нужно из (3) отнять (2): $\sigma_{-фон} = \sigma_{изм} - \sigma_{ст}$. Тогда

$$\sigma_{-фон} = \sigma_{об} - \sigma_{т}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что ЭПР объекта, измеренное с учетом фона камеры, равно реальному ЭПР объекта минус ЭПР теневой зоны.

Как мы понимаем, результат измерения ЭПР объекта при помощи простого метода учета фона камеры не соответствует значению измеряемой величины. Следовательно, нужно найти метод, который позволит корректно учесть фон камеры.

Основной метод решения проблемы. Рассмотрим метод, позволяющий решить вышеуказанную проблему. Во время измерения фона камеры вместо объекта на опорно-поворотное устройство (ОПУ) установим РПМ, габаритами соответствующий объекту измерения, или же, не убирая объект, поставим перед ним РПМ. В этом случае при измерении фона камеры за объектом создается теневая зона, равная той, которая возникнет при измерении объекта. Тогда уравнение (2) преобразуется к виду:

$$\sigma_{\text{ст}} = \sigma_1 + \sigma_2. \quad (5)$$

Вычитая (5) из (3), получим:

$$\sigma_{\text{-фон}} = \sigma_{\text{изм}} - \sigma_{\text{ст}} = \sigma_{\text{об}}. \quad (6)$$

Таким образом, при использовании данного метода, при измерениях малогабаритных объектов с учетом фона камеры, суммарное отражение от объекта стремится к $\sigma_{\text{об}}$.

Недостатком метода является то, что РПМ, который ставится вместо/перед измеряемым объектом, должен иметь коэффициент отражения меньший, чем РПМ на задней стенке камеры. Соответственно, фон камеры при использовании РПМ вместо/перед измеряемым объектом и при измерении самого объекта будет отличаться, а значит, вычитать один из другого не корректно.

Новый метод решения проблемы. Рассмотрим метод, который позволяет избавиться от отражений в теневой зоне как при измерениях фона, так и при измерениях объекта. Для реализации этого метода используется металлический клин (рис. 6). Благодаря клину, часть электромагнитной волны, попадающая в теневую область, отражается от клина в потолок и пол.

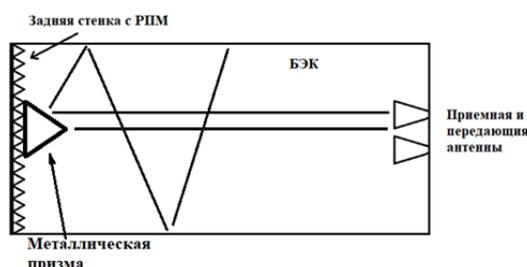


Рис. 6. Использование клина при измерении фона камеры

Улучшение нового метода решения проблемы. При измерении фона энергия луча, отраженного от вершины клина, будет присутствовать в энергии, отраженной от задней стенки камеры (рис. 7). А при измерениях объекта энергия луча, отраженного от вершины клина, в результатах присутствовать не будет. Необходимо учесть луч, отраженный от вершины клина. Это можно сделать, накрыв вершину клина РПМ малой площади, чтобы ЭПР этого куска РПМ был ничтожно мал по сравнению с ЭПР измеряемого объекта.

Устранить проблему отражения от вершины клина можно закрытием вершины клина РПМ (рис. 8). В этом случае при измерении фона отражением от вершины клина можно пренебречь. Такой метод уменьшения отражения от краев и ребер объектов описан у Балабуха Н.П. [11].

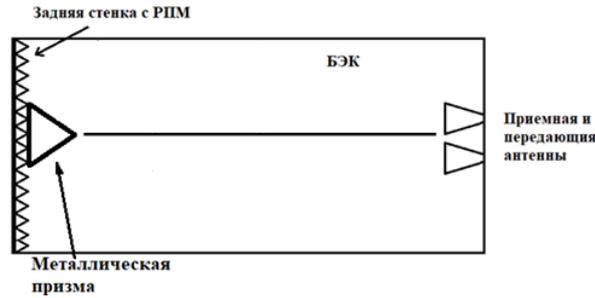


Рис. 7. Отражение от вершины при использовании клина для измерения фона камеры

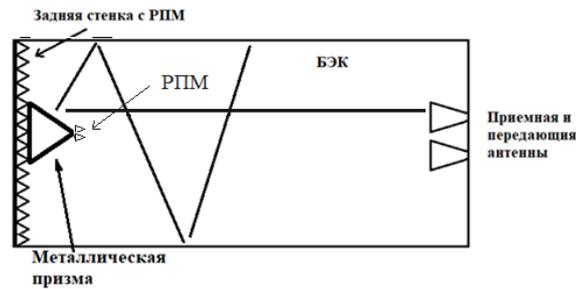


Рис. 8. Использование клина и ЭПР при измерении фона камеры

Результаты моделирования данного метода можно видеть на рис. 9.

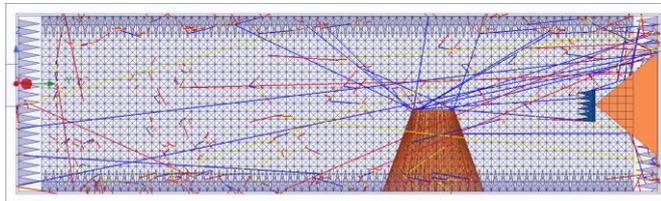


Рис. 9. Модель в HFSS использования клина и ЭПР при измерении фона камеры

Выводы. Проведенное моделирование в САПР HFSS использования пилона из проводящего материала для уменьшения паразитных отражений от ОПУ в БЭК наглядно показало эффективность использования пилона для снижения отражений от ОПУ.

При анализе основного метода учета фона камеры для измерения ЭПР малозаметных объектов, выявлен недостаток основного метода учета фона камеры: вклад отражения от теневой зоны отсутствует.

Предложен новый метод учета фона камеры, позволяющий избавиться от недостатка основного метода учета фона камеры – учет вклада теневой зоны. Метод предлагает помещать клин из проводящего материала в теневую зону БЭК.

Использование пилона позволяет уменьшить паразитные отражения от ОПУ, а клина – учесть вклад теневой зоны (рис. 9.) при измерении ЭПР малозаметных беспилотных летательных аппаратов. Это позволит получить достоверный результат измерения ЭПР малозаметных беспилотных летательных аппаратов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/> в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения Южного Федерального Университета».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Состояние и тенденции развития рынка беспилотных авиационных систем в мире и России. Фонд «Центр стратегических разработок» (ЦСР). – URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/bb5/kwsro7xx10x3qdt4yyiow17letsunt04.pdf>. – 2022. – С. 72.
2. Global drone market report 2022-2030 // Drone Industry Insight. – URL: <https://droneii.com/product/drone-market-report>. – 2022.
3. Drone industry overview // China's thriving drone industry. – URL: <https://www.asiaperspective.com/china-thriving-drone-industry/>. – 2021
4. What are the top drone applications? // Drone Industry Insight. – URL: https://droneii.com/top-drone-applications?utm_source=email&utm_medium=automated&utm_campaign=welcomeflow-q4-2021-second-email&utm_content=applications-blog-section&utm_term=applications-blog-cta&goal=0_8e282c8de0-9ac1367c8c-262019296&mc_cid=9ac1367c8c&mc_cid=7de2d2b5fe. – 2023.
5. Российский рынок технологий беспилотных авиационных систем. Особенности, проблемы, перспективы // Российские Беспилотники. – URL: <https://russiandrone.ru/publications/rossiyskiy-rynok-tekhnologiy-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem-osobennosti-problemy-perspektivy/>. – 2017.
6. <http://government.ru/docs/43502/>.
7. <https://alb.aero/about/articles/primenenie-bpla-v-usloviyakh-boevykh-deystviy/>.
8. https://irp.fas.org/program/collect/uas_2009.pdf.
9. <https://www.hsd1.org/c/abstract/?docid=747559>.
10. Ильин И.В., Мерглов И.В., Синяян К.А., Пеньковская Т.К. Моделирование элементов опорно-поворотного устройства для безэховых камер в системе автоматизированного проектирования Keysight Technologies EMPro // Всероссийская конференция «Технологии и методики Keysight Pathwave Design в проектировании и преподавании». – 2022. – 46 с.
11. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. – М.: Наука, 2007. – 271 с.
12. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. – 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 558 с.
13. Ronan Niemiec, Regis Hemon. Suppression of Measurement Undersired Echoes Using an Auto-Controlled Compensation Method // IEEE 6th European Conference on Propagation. – 2011. – P. 1387-1390.
14. Linxi Zhang, Rai Ding, Nanjing Li. High-resolution RCS Measurement inside an Anechoic Chamber // IEEE International Forum on Information Technology and Applications. – 2010. – P. 252-255.
15. Naobumi Michishita, Tadashi Chisaka, Yoshihide Yamada. Evolution of RCS Measurement Environment in Compact Anechoic Chamber // IEEE. – 2020. – P. 1-4.
16. Comblet F. Radar Cross Section Measurements in an anechoic chamber: Description of an experimental system and post processing // IEEE Conference on Antennas Measurements and Applications. – 2014. – P. 1-4.
17. Andre Bati, Long To, Don Hilliard. Advanced Radar Cross Section Clutter Removal Algorithms // IEEE 4th European Conference on Antennas and Propagation. – 2010. – P. 1-5.
18. Juha T. Toivanen, Tommi A. Laitinen, Pertti Vainikainen. Modified Test Zone Field Compensation for Small-Antenna Measurements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – P. 1-9.
19. Ville Viikari, Antti V. Raisanen. Antenna Pattern Correction Technique Based on Signal to Interference Ratio Optimization // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2006. – P. 1-5.
20. Бачурин В.С., Деменёв А.Д., Пышный В.Д. Экспериментальная оценка возможностей измерений характеристик рассеяния методом частотно-временных преобразований // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» - ИРЭ РАН. – 2010. – С. 781-789.

21. *Тоналов Ф.С.* Снижение поля обратного рассеяния телцилиндрической формы с помощью решеток Ван-Атта: дисс. ... канд. тех. наук: 05.12.07. – Таганрог, 2019.
22. *Juha T. Toivanen, Tommi A. Laitinen, Sergey Pivnenko.* Calibration of Multi-Prob Antenna Measurement System Using Test Zone Field Compensation // *IEEE 3rd European Conference on Antennas and Propagation.* – 2009. – P. 2916-2920.

REFERENCES

1. Sostoyanie i tendentsii razvitiya rynka bespilotnykh aviatsionnykh sistem v mire i Rossii. Fond «TSentr strategicheskikh razrabotok» (TSSR) [Foundation "Center for Strategic Research" (CSR)]. Available at: <https://www.csr.ru/upload/iblock/bb5/kwsro7xx10x3qdt4yyiowl7letsumt04.pdf>, 2022, pp. 72.
2. Global drone market report 2022-2030, *Drone Industry Insight*. Available at: <https://droneii.com/product/drone-market-report>, 2022.
3. Drone industry overview // China's thriving drone industry. Available at: <https://www.asiaperspective.com/china-thriving-drone-industry/>. – 2021
4. What are the top drone applications?, *Drone Industry Insight*. Available at: https://droneii.com/top-drone-applications?utm_source=email&utm_medium=automated&utm_campaign=welcome-flow-q4-2021-second-email&utm_content=applications-blog-section&utm_term=applications-blog-cta&goal=0_8e282c8de0-9ac1367c8c-262019296&mc_cid=9ac1367c8c&mc_eid=7de2d2b5fe, 2023.
5. Rossiyskiy rynek tekhnologiy bespilotnykh aviatsionnykh sistem. Osobennosti, problemy, perspektivy [Russian market for unmanned aerial systems technologies. Features, problems, prospects], *Rossiyskie Bespilotniki* [Russian UAVs]. Available at: <https://russiandrone.ru/publications/rossiyskiy-rynok-tekhnologiy-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem-osobennosti-problemy-perspektivy/>, 2017.
6. Available at: <http://government.ru/docs/43502/>.
7. Available at: <https://alb.aero/about/articles/primenenie-bpla-v-usloviyakh-boevykh-deystviy/>.
8. Available at: https://irp.fas.org/program/collect/uas_2009.pdf.
9. Available at: <https://www.hsdl.org/c/abstract/?docid=747559>.
10. *Il'in I.V., Merglodov I.V., Sinanyan K.A., Pen'kovskaya T.K.* Modelirovanie elementov opornopovorotnogo ustroystva dlya bezekhovyykh kamer v sisteme avtomatizirovannogo proektirovaniya Keysight Technologies EMPro [Modeling elements of a rotating bearing device for anechoic chambers in the Keysight Technologies EMPro computer-aided design system], *Vserossiyskaya konferentsiya «Tekhnologii i metodiki Keysight Pathwave Design v proektirovanii i prepodavanii»* [All-Russian conference "Technologies and techniques of Keysight Pathwave Design in design and teaching"], 2022, 46 p.
11. *Balabukha N.P., Zubov A.S., Solosin V.S.* Kompaktnye poligony dlya izmereniya kharakteristik rasseyaniya ob"ektov [Compact test sites for measuring the scattering characteristics of objects]. Moscow: Nauka, 2007, 271 p.
12. *Petrov B.M.* Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and radio wave propagation]. 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 558 p.
13. *Ronan Niemiec, Regis Hemon.* Suppression of Measurement Undersired Echoes Using an Auto-Controlled Compensation Method, *IEEE 6th European Conference on Propagation*, 2011, pp. 1387-1390.
14. *Linxi Zhang, Rai Ding, Nanjing Li.* High-resolution RCS Measurement inside an Anechoic Chamber, *IEEE International Forum on Information Technology and Applications*, 2010, pp. 252-255.
15. *Naobumi Michishita, Tadashi Chisaka, Yoshihide Yamada.* Evolution of RCS Measurement Environment in Compact Anechoic Chamber, *IEEE*, 2020, pp. 1-4.
16. *Comblet F.* Radar Cross Section Measurements in an anechoic chamber: Description of an experimental system and post processing, *IEEE Conference on Antennas Measurements and Applications*, 2014, pp. 1-4.
17. *Andre Bati, Long To, Don Hilliard.* Advanced Radar Cross Section Clutter Removal Algorithms, *IEEE 4th European Conference on Antennas and Propagation*, 2010, pp. 1-5.

18. Juha T. Toivanen, Tommi A. Laitinen, Pertti Vainikainen. Modified Test Zone Field Compensation for Small-Antenna Measurements, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, pp. 1-9.
19. Ville Viikari, Antti V. Raisanen. Antenna Pattern Correction Technique Based on Signal to Interference Ratio Optimization, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, pp. 1-5.
20. Bachurin V.S., Demenev A.D., Pyshnyy V.D. Eksperimental'naya otsenka vozmozhnostey izmereniy kharakteristik rasseyaniya metodom chastotno-vremennykh preobrazovaniy [Experimental assessment of the capabilities of measuring scattering characteristics by the method of frequency-time transformations], IV Vserossiyskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz» - IRE RAN [All-Russian Conference "Radarlocation and Radio Communication" - IRE RAS.], 2010, pp. 781-789.
21. Topalov F.S. Snizhenie polya obratnogo rasseyaniya teltsilindricheskoy formy s pomoshch'yu reshetok Van-Atta: disc. ... kand. tekhn. nauk [Reducing the cylindrical backscattering field using Van Atta gratings: cand. of eng. sc. diss.]: 05.12.07. Taganrog, 2019.
22. Juha T. Toivanen, Tommi A. Laitinen, Sergey Pivnenko. Calibration of Multi-Prob Antenna Measurement System Using Test Zone Field Compensation, *IEEE 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, 2009, pp. 2916-2920.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Синянян Карекин Амбарцумович – Южный федеральный университет; e-mail: sinanian@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885706087; кафедра АиРПУ; аспирант.

Юханов Юрий Владимирович – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru ; тел.: +79882546270; кафедра АиРПУ; зав. кафедрой АиРПУ; профессор.

Ильин Игорь Васильевич – e-mail: ivilin@sfedu.ru; тел.: +79889529676; кафедра АиРПУ; зав. лабораторией.

Мерглюдов Илья Владимирович – e-mail: ivmerglodov@sfedu.ru; тел.: +79054286667; кафедра АиРПУ; с.н.с.

Sinanyan Karekin Ambartsumovich – South Federal University; e-mail: sinanian@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885706087; the department of antennas and radio transmitting devices; graduate student.

Yuhanov Yuriy Vladimirovich – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; phone: +79882546270; head of the department of antennas and radio transmitting devices; professor.

Ilin Igor Vasil'evich – e-mail: ivilin@sfedu.ru; phone: +79889529676; the department of antennas and radio transmitting devices; head of laboratory.

Merglodov Ilya Vladimirovich – e-mail: ivmerglodov@sfedu.ru; phone: +79054286667; the department of antennas and radio transmitting devices; senior science master.

УДК 621.396.677

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-276-286

С.А. Шелкоплясов

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ РАСШИРЕННОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Проведен анализ существующих методов синтеза антенн по заданной диаграмме направленности, в которых формируемая диаграмма направленности представляет собой сумму парциальных лучей. Установлено, что в данных методах организован итерационный процесс, на каждом шаге которого к уже сформированному лучу добавляется новый дополнительный луч. При этом для определения параметров дополнительного луча используются алгоритмы поисковой оптимизации. Существование данных методов позволяет отдельно рассматривать алгоритмы определения параметров дополнительных лучей на ка-