

8. Shatri V. MATLAB Partial Element Equivalent Circuit Toolbox for Solving Coupled Electromagnetic-Circuit Problems / V. Shatri, R. Sefa, L. Kurtaj // International Journal of Current Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 3, No. 4.

9. Partial Element Equivalent Circuit (PEEC). CST Studio Suite Help [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://space.mit.edu/RADIO/CST_online/mergedProjects/PCB/pcbs/5_simulating_a_pcb/4_3dfefd.htm, свободный (дата обращения: 10.03.2023).

10. Altair Flux Цифровая трансформация предприятий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elm-c.ru/altair-flux>, свободный (дата обращения: 10.03.2023).

УДК 621.396

ОБЗОР ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АНТЕНН ПРОВОДНОЙ СЕТКОЙ

А.Н. Гилева, студентка каф. ТОР;

А. Алхадж Хасан, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, д.т.н., доцент, зав. каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, gileva2001@mail.ru*

Выполнен краткий обзор особенностей моделирования поверхностных антенн с использованием проводной сетки. Показана актуальность данного подхода при моделировании антенн и сформулирована база знаний, необходимая для проведения будущих исследований и оптимального использования преимуществ данного подхода при моделировании типовых антенн.

Ключевые слова: антенны, проводная сетка, метод моментов, численные методы.

Антенны являются важной частью радиоэлектронных устройств, и существует много видов антенн, каждая из которых имеет свои уникальные формы, размеры, области применения и ограничения. Несмотря на то, что оптимальное проектирование антенн является актуальной задачей в настоящее время, единой универсальной методологии для её решения не существует. Поэтому большую роль в этом играет моделирование, которое позволяет исследовать и оптимизировать характеристики и структуры антенн с целью повышения их эффективности.

Численные методы, которые используются в программных модулях для моделирования антенн, позволяют ученым значительно продвинуться в области их проектирования. Однако моделирование антенн требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому выбор численного метода, используемого при моделировании, сильно влияет на затраты. Существует много различных методов и подходов к моде-

лированию антенн, но наиболее используемым является метод моментов (МоМ), так как он способен давать приемлемые результаты с меньшими вычислительными затратами, чем другие методы.

Из-за его простоты предложено много подходов на его основе. Моделирование поверхностных антенн проводной сеткой (ПС) считается одним из наиболее эффективных подходов к моделированию антенн, основанных на МоМ. Исходя из этого, для проведения исследований в области развития данного подхода или разработки на его основе новых подходов важно учитывать вклад ученых в этом направлении и современное состояние их исследований. Между тем эти исследования довольно обширны. Поэтому, цель данной работы – выполнить краткий обзор особенностей моделирования поверхностных антенн ПС. Ученые исследовали электромагнитные свойства изготовленных ПС в общем [1, 2], в частности, оценивали их коэффициенты отражения и пропускания [3], их излучение [4] и влияние различных параметров на эти характеристики [5]. ПС применялись с сосредоточенными нагрузками для улучшения характеристик антенн [6], при проектировании линзовых антенн [7] и метаповерхностей тонких структур антенн [8], а также в разработке сложных искусственных материалов [9] и кристаллов [10]. Численные и математические методы показали, что ПС могут использоваться не только для проектирования, но и для моделирования антенн, что является ещё одним преимуществом их применения. Например, метод сопряженных градиентов [11] и быстрое преобразование Фурье [12] использовались раздельно и вместе для решения задач их электромагнитного рассеяния [13], излучения [14] и отражения [15] ПС. В целом анализ ПС проводится с помощью МоМ [16] или его гибридизации с другими методами, например геометрической теорией дифракции [17].

Использование численных методов при анализе ПС позволило исследователям рассмотреть широкий спектр различных типов и форм антенн. Например, ПС использовались при моделировании антенной решетки [18], элементов [19] и решетки [20] микрополосковых антенн, а также плоских антенн самолёта [21], вертолёта [22] и даже космических антенн [23]. Также ПС применялись в области обратного рассеяния для расчёта радиолокационного поперечного сечения [24] и удельного коэффициента поглощения [25]. ПС также использовались вместе с методами оптимизации при проектировании патч [26] и логопериодических антенн [27]. Более того, несколько исследований посвящено развитию этого подхода в отношении теории изображений [28], теории характеристических мод [29], теории СВЧ [30], моделированию диэлектриков [31], использованию различных типов сеток

[32] и даже исследованию их свойств не только в частотной, но и во временной области [33, 34]. Многие работы посвящены валидации результатов моделирования с использованием ПС путем сравнения их результатов с полученными другими методами или кодами [35, 36]. Однако моделирование с помощью ПС имеет ряд недостатков, например, связанных с точностью результатов [37] и их чувствительностью к параметрам моделирования [38], а также решением электрически больших задач [39]. Решение таких проблем учеными выполнялось с помощью итерационных методов [40], *LU*-разложения [41], а также распараллеливания кодов, использующих ПС [42]. Были также применены графические процессоры с поддержкой CUDA [43]. Рекомендации по использованию ПС при моделировании антенн собраны в некоторых работах, таких как [44–46].

Таким образом, большое количество работ высокого уровня, использующих ПС, доказывает актуальность их применения при моделировании антенн и подтверждает, что развитие данного подхода не прекращается. Более того, данная работа формирует обширную базу знаний, необходимую для будущих исследований, в результате выполненного краткого обзора особенностей моделирования поверхностных антенн с использованием ПС. В будущем планируется провести ряд исследований, которые позволят оптимально использовать преимущества подхода ПС при моделировании типовых антенн.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Larsen T. A Survey of the Theory of Wire Grids // *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1962. – Vol. 10, No. 3. – PP. 191–201. DOI: 10.1109/TMTT.1962.1125490.
2. Wait J. Electromagnetic scattering from a wire grid parallel to a planar stratified medium // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1972. – Vol. 20, No. 5. – PP. 672–675. DOI: 10.1109/TAP.1972.1140276.
3. James R. Wait. Reflection from a wire grid parallel to a conducting plane // *Canadian Journal of Physics*. – 1954. – No. 32(9). – PP. 571–579. <https://doi.org/10.1139/p54-061>.
4. Richmond J.H. Radiation and scattering by thin-wire structures in the complex frequency domain. – 1974. – № TR-2902-10.
5. Nagy A.W. An Experimental Study of Parasitic Wire Reflectors on 2.5 Meters // *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*. – 1936. – Vol. 24, No. 2. – PP. 233–254. DOI: 10.1109/JRPROC.1936.226415.
6. Ikonen P.M.T. Modeling and Analysis of Composite Antenna Superstrates Consisting on Grids of Loaded Wires / P.M.T. Ikonen, E. Saenz, R. Gonzalo, S.A. Tretyakov // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2007. – Vol. 55, No. 10. – PP. 2692–2700. DOI: 10.1109/TAP.2007.905926.

7. Sharp E. Electromagnetic theory of wire-grid lens HF antennas // 1964 Antennas and Propagation Society International Symposium, Long Island, NY, USA. – 1964. – PP. 7–12. DOI: 10.1109/APS.1964.1150167.

8. Saenz E. et al. Design of a planar meta-surface based on dipoles and wires for antenna applications. Proceed. EuCAP. – 2006.

9. Moses C.A. Electromagnetic wave propagation in the wire medium: a complex medium with long thin inclusions / C.A. Moses, N. Engheta // Wave Motion. – 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-2125\(01\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0165-2125(01)00095-6).

10. Belov P.A. Two-dimensional electromagnetic crystals formed by reactive-ly loaded wires / P.A. Belov, C.R. Simovski, S.A. Tretyakov // Physical Review. – 2002. – Vol. E 66.3. – P. 036610.

11. Sarkar T. The application of the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic scattering from arbitrarily oriented wire antennas / T. Sarkar, S. Rao // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1984. – Vol. 32, No. 4. – PP. 398–403. DOI: 10.1109/TAP.1984.1143331.

12. Cwik T. Spectral domain solution of scattering from periodic surfaces using the FFT / T. Cwik, R. Mittra // 1984 Antennas and Propagation Society International Symposium, Boston, MA, USA. – 1984. – PP. 913–916. DOI: 10.1109/APS.1984.1149217.

13. Christodoulou C. On the electromagnetic scattering from infinite rectangular grids with finite conductivity / C. Christodoulou, J. Kauffman // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1986. – Vol. 34, No. 2. – PP. 144–154. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143803.

14. Sarkar T. Application of FFT and the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic radiation from electrically large and small conducting bodies / T. Sarkar, E. Arvas, S. Rao // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1986. – Vol. 34, No. 5. – PP. 635–640. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143871.

15. Christodoulou C.G. Effects of the Schottky impedance of wire contact points on the reflection properties of a mesh / C.G. Christodoulou, S. Yin, J.F. Kauffman // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1988. – Vol. 36, No. 12. – PP. 1714–1721. DOI: 10.1109/8.14393.

16. Harrington R.F. The method of moments in electromagnetics // Journal of Electromagnetic waves and Applications. – 1987. – Vol. 1. – No. 3. – PP. 181–200.

17. Ferguson T.R. Efficient solution of large moments problems: wire grid modeling criteria and conversion to surface currents // The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES). – 2022. – Vol. 3(1). – PP. 55–81. Retrieved from <https://journals.riverpublishers.com/index.php/ACES/article/view/17871>.

18. Palmer K.D. Synthesis of the microstrip wire grid array / K.D. Palmer, J.H. Cloete // Tenth International Conference on Antennas and Propagation (Conf. Publ. №. 436), Edinburgh, UK. – 1997. – Vol. 1. – PP. 114–118. DOI: 10.1049/cp:19970220.

19. Conti R. The wire grid microstrip antenna / R. Conti, J. Toth, T. Dowling, J. Weiss // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1981. – Vol. 29, No. 1. – PP. 157–166. DOI: 10.1109/TAP.1981.1142541.

20. Hildebrand, Louis Trichardt. The analysis of microstrip wire-grid antenna arrays. Diss. University of Pretoria. – 2010.

21. Wang J. Application of wire-grid modelling to the design of low-profile aircraft antenna / J. Wang, C. Ryan // 1977 Antennas and Propagation Society International Symposium, Stanford, CA, USA. – 1977. – PP. 222–225. DOI: 10.1109/APS.1977.1147721.
22. Owen J. Wire grid modelling of helicopter HF aeriels // 1980 Antennas and Propagation Society International Symposium, Quebec, Canada. – 1980. – PP. 722–725. DOI: 10.1109/APS.1980.1148259.
23. Imbriale W.A. On the reflectivity of complex mesh surfaces (spacecraft reflector antennas) / W.A. Imbriale, V. Galindo-Israel, Y. Rahmat-Samii // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1991. – Vol. 39, No. 9. – PP. 1352–1365. DOI: 10.1109/8.99044.
24. Kolev N.Z. An application of the method of moments for computation of RCS of PEC wire-grid models of complicated objects // MMET Conference Proceedings. 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. MMET 98 (Cat. №.98EX114), Kharkov, Ukraine. – 1998. – Vol. 2. – PP. 499–501.
25. Lewis G. Bistatic radar scattering experiments of parallel wire grids / G. Lewis, J. Fortuny-Guasch, A. Sieber // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, ON, Canada. – 2002. – Vol. 1. – PP. 444–446. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1025067.
26. Abd-Alhameed R.A. A Wire-Grid Adaptive-Meshing Program for Microstrip-Patch Antenna Designs Using a Genetic Algorithm [EM Programmer's Notebook] / R.A. Abd-Alhameed, D. Zhou, C.H. See, P.S. Excell // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – Vol. 51, No. 1. – PP. 147–151. – 2009. DOI: 10.1109/MAP.2009.4939045.
27. Levent Gurel. Design and Simulation of Circular Arrays of Trapezoidal-Tooth Log-Periodic Antennas via Genetic Optimization // Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – Vol. 85. – PP. 243–260. DOI: 10.2528/PIER08081809.
28. Lindell I.V. Image Theory for Dipole Excitation of Fields above and below a Wire Grid with Square Cells / I.V. Lindell, V.P. Akimov, E. Alanen // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1986. – Vol. 28, No. 2. – PP. 107–110. DOI: 10.1109/TEMCP.1986.4307257.
29. Mayhan J.T. Characteristic modes and wire grid modeling // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1990. – Vol. 38, No. 4. – PP. 457–469. DOI: 10.1109/8.52263.
30. Chung A.M. Tray-shape effect in a computational model of microwave heating / A.M. Chung, K.G. Balmain // in Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. – 1995. – Vol. 20, No. 4. – PP. 173–178.
31. Tsunekawa K. Advanced wire grid method for solving the scattered field of a lossy dielectric object / K. Tsunekawa, A. Ando // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest, Chicago, IL, USA. – 1992. – Vol. 2. – PP. 797–800. DOI: 10.1109/APS.1992.221688.
32. Yung E.K.N. Scattering of electromagnetic waves by a wire grid of hexagonal meshes / E.K.N. Yung, C.C. Cheng // Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium, San Jose, CA, USA. – 1989. – Vol. 2. – PP. 730–733. DOI: 10.1109/APS.1989.134793.

33. Ghaffari-Miab M. et al. Time-domain MoM for the analysis of thin-wire structures above half-space media using complex-time Green's functions and band-limited quadratic B-spline temporal basis functions // *Engineering analysis with boundary elements*. – 2012. – Vol. 36. – No. 7. – PP. 1116–1124.

34. Rao S. A Simple and Efficient Method of Moments Solution Procedure for Solving Time-Domain Integral Equation–Application to Wire-Grid Model of Perfect Conducting Objects // *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*. – 2019. – Vol. 4. – PP. 57–63.

35. Trueman C.W. Wire-Grid Model Construction and Verification Using Programs MESHES, FNDRAD and CHECK // DREO Contract № W7714-7-5466/01, Technical Note TN-EMC-90-08, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Concordia University. – 1990.

36. Yang X.H. A comparison study on wire-grid model and point matching technique with subdomain basis functions / X.H. Yang, L. Shafai, A. Sebak // 1992 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, Winnipeg, MB, Canada. – 1992. – PP. 656–661. DOI: 10.1109/ANTEM.1992.7854316.

37. Lee K.S.H. Limitations of Wire-Grid Modeling of a Closed Surface / K.S.H. Lee, L. Marin, J.P. Castillo // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 1976. – Vol. EMC-18, No. 3. – PP. 123–129. DOI: 10.1109/TEMC.1976.303482.

38. Ludwig A. Wire grid modeling of surfaces // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1987. – Vol. 35, No. 9. – PP. 1045–1048. DOI: 10.1109/TAP.1987.1144220.

39. Ferguson T.R. Solution of Large Wire Grid Moments Problems / T.R. Ferguson, R.J. Balestri, // *IEEE 1976 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, USA. – 1976. – PP. 1–5. DOI: 10.1109/IEMC.1976.7568742.

40. Ferguson T. Efficient solution of large moments problems: Theory and small problem results / T. Ferguson, T. Lehman, R. Balestri // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1976. – Vol. 24, No. 2. – PP. 230–235. DOI: 10.1109/TAP.1976.1141314.

41. Fourie A.P.C. A fast sparse iterative method (SIM) for method of moments / A.P.C. Fourie, D.C. Nitch // *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting*, Seattle, WA, USA. – 1994. – Vol. 2. – PP. 1146–1149. DOI: 10.1109/APS.1994.407888.

42. Rubinstein A. A parallel implementation of NEC for the analysis of large structures / A. Rubinstein, F. Rachidi, M. Rubinstein, B. Reusser // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2003. – Vol. 45, No. 2. – PP. 177–188. DOI: 10.1109/TEMC.2003.810806.

43. Topa T. Using GPU With CUDA to Accelerate MoM-Based Electromagnetic Simulation of Wire-Grid Models / T. Topa, A. Karwowski, A. Noga // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2011. – Vol. 10. – PP. 342–345. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2144557.

44. Trueman C.W. Fields of complex surfaces using wire grid modelling / C.W. Trueman, S.J. Kubina // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1991. – Vol. 27, No. 5. – PP. 4262–4267. DOI: 10.1109/20.105043.

45. Rubinstein A. On wire-grid representation of solid metallic surfaces / A. Rubinstein, F. Rachidi, M. Rubinstein // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2005 – Vol. 47, No. 1. – PP. 192–195. DOI: 10.1109/TEMC.2004.838230.

46. Peng J. NEC and ESP codes: guidelines, limitations, and EMC applications / J. Peng, C.A. Balanis, G.C. Barber // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1993. – Vol. 35, No. 2. – PP. 124–133. DOI: 10.1109/15.229428.

УДК 621.391.825

ОПТИМИЗАЦИЯ АСИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА С ЛИЦЕВОЙ СВЯЗЬЮ ПО ВРЕМЕННОМУ КРИТЕРИЮ С УЧЕТОМ КОМБИНАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ

*А.С. Сарыглар, студент; Е.Б. Черникова, ассистент, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, aizasaryglar02@gmail.com*

Рассматривалась структура асимметричного модального фильтра (МФ) с лицевой связью и асимметрией оконечных нагрузок на пассивном проводнике, во временном отклике которого наблюдаются комбинационные импульсы. Впервые представлены результаты оптимизации параметров поперечного сечения МФ по временному критерию с учетом данных импульсов. Полученные параметры позволяют выравнять временные интервалы между всеми (в том числе комбинационными) импульсами разложения.

Ключевые слова: линии передачи, модальный фильтр, асимметричные структуры, временные интервалы, комбинационные импульсы.

В настоящее время разработка радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) развивается высокими темпами и находит широкое применение в самых различных сферах: наука, техника, медицина и др. Применение РЭА в различных отраслях, в том числе в системах радиосвязей, телерадиовещания и радиолокации приводит к обострению проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) из-за уязвимости аппаратуры к электромагнитным помехам. Помехи подразделяются, в зависимости от пути распространения, на излучаемые и кондуктивные. Кондуктивные помехи опасны тем, что проникают в РЭА непосредственно по проводникам, например, по сигнальным проводникам или через цепи питания [1]. Однако существуют кондуктивные помехи, длительность которых находится в наносекундном и субнаносекундном диапазонах. Такие помехи называются сверхкороткими импульсами (СКИ) [2, 3]. Для защиты от такого рода помех разрабатываются устройства, названные модальными фильтрами (МФ).