УДК 621.396

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА MARCHING ON-IN-TIME

М.И. Каткова, магистрант; А. Алхадж Хасан, аспирант

Научный руководитель С.П. Куксенко, проф. каф. ТУ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, katkova.m.111-m1@e.tusur.ru

Представлены особенности метода marching on-in-time (МОТ) и приведены примеры работ, где они отражены. Показаны его преимущества, исходя из результатов моделирования сферической проволочной сетки и сетки в форме квадратной пластины, полученных из других работ.

Ключевые слова: временная область, метод marching on-in-time, базисные и тестовые функции, временной шаг.

Развитие радиотехники, электроники, а также вычислительных, информационных и телекоммуникационных технологий послужило широкому внедрению во все сферы различных радиоэлектронных средств (РЭС). Поэтому требуется их быстрое и качественное производство. Однако с ростом сложности РЭС возникает необходимость использования автоматизированного проектирования, в основе которого лежит компьютерное моделирование. Для этого применяются различные математические методы, позволяющие решить интегральные уравнения в частотной и временной областях [1]. Численные решения интегральных уравнений во временной области (ИУВО) требуют меньших затрат времени и памяти в отличие от частотной (ИУЧО) [2]. Решением ИУВО занимаются уже много лет, особенно для решения электромагнитных задач [3]. Наиболее популярным методом решения ИУВО является метод marching on-in-time (МОТ) [4]. Между тем широкий ряд его вариантов и их специфика затрудняют их правильный выбор для реализации. Цель данной работы – представить особенности метода МОТ для решения электромагнитных задач.

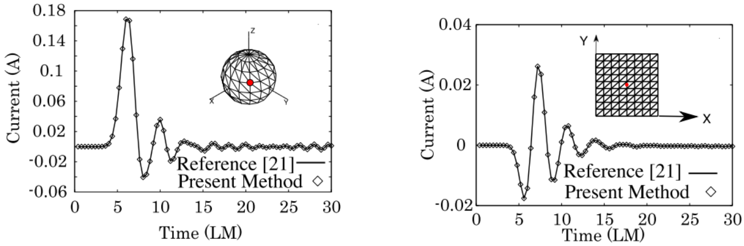
МОТ часто используется именно для нахождения неизвестных поверхностных токов за счет разложения плотности тока, используя локальные пространственно-временные базисные функции [5]. Если вставить полученное разложение в ИУВО и выполнить тестирование результирующего уравнения в пространстве и времени, то получится простая треугольная система уравнений, которую можно решить с помощью МОТ [6]. МОТ часто использует пространственные базисные и тестовые функции Rao-Wilton-Glisson (RWG) [7–10] или полиноминальные временные базисные функции [11–14], кусочно-постоянные базисные функции [15], а также базисные функции Raviart–Thomas [16, 17].

Схемы МОТ могут быть неявными или явными в зависимости от типов (пространственных и временных) базисных функций и схемы тестирования, а также размера временного шага [6]. Размер временного шага неявных схем определяется максимальной частотой падающего поля и не зависит от пространственной дискретизации, поэтому они более стабильны и способны использовать большие временные шаги без какого-либо ущерба для стабильности [18]. Однако они требуют решения матричного уравнения на каждом временном шаге в отличие от явных схем МОТ, которые для обеспечения стабильности используют гораздо меньший размер временного шага [4].

МОТ подвержен нестабильности из-за накопления ошибок на каждом временном шаге. Поэтому он эффективен для решения простых задач [19]. Много работ посвящено устранению этого недостатка [7–17, 20–33]. В большинстве их показано, что нестабильности, возникающие в МОТ, обусловлены низкочастотными и высокочастотными модами. Они возникают в решении и устраняются комбинацией пространственного и временного усреднения. В других же исследованиях показано, что нестабильность возникает из-за временной базисной функции, которая имеет богатое высокочастотное содержание. Однако пространственной дискретизации может быть недостаточно для этих высоких частот. В общем выявлено, что выбор временных и базисных функций может повысить стабильность [25, 30, 34].

Результаты, полученные с помощью данного метода и представленные в работе [19], показывают его точность и преимущество над ИУЧО [35]. Так, рассмотрена сферическая проволочная сетка радиусом 1 м, расположенная в плоскости *XY*, с центром проволочной сетки, совпадающим с центром координат. Сетка облучается гауссовой плоской волной. С использованием МОТ получен индуцированный ток на экваторе сферы (выделен точкой на рис. 1, *а*). Время решения с помощью МОТ составляет 9,68 с [19], а через обратное дискретное преобразование Фурье – 3813,2 с [35]. Также рассмотрена сетка в форме квадратной пластины размером 1×1 м^2, расположенная в плоскости *XY*. С использованием МОТ получен индуцированный ток в центре сетки (выделен точкой на рис. 1, *б*). Время решения с помощью МОТ составляет 7,452 с [19], а через обратное дискретное преобразование Фурье – 2126,2 с [35]. Результат, полученный с помощью МОТ, совпадает с решением через обратное дискретное образование Фурье. Это подтверждает, что данный метод дает точные результаты с меньшими затратами по времени.

В данной работе представлены особенности метода МОТ и приведены работы, где они отражены. Показаны его преимущества и примеры моделирования.



а *б*

Рис. 1. Ток, индуцированный на сетчатой модели сферы (*а*)
и на сетчатой модели квадратной пластины (*б*),
облученных гауссовой плоской волной (радиус провода 0,001 м) [19]

Поскольку метод непрерывно развивается, изучение его является актуальным. В дальнейшем планируется его реализация в MATLAB.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко А.П. Аналитические и численные методы прочностного анализа и проектирования автомобильных конструкций. – Казань: изд-во Казан. фед. ун-та, 2015. – 129 с.

2. Huang H. A novel time-domain electric field integral equation of thin wire structures in lossy half-space / H. Huang, L. Li, Z. Zhao // Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, 2010. – P. 1.

3. A comparison of marching-on in time method with marching-on in degree method for the TDIE solver / B.H. Jung, Z. Ji, T.K. Sarkar, M. Salazar-Palma, M. Yuan // Progress In Electromagnetics Research, PIER 70. – 2007. – 16 p.

4. Rao S.M. Time Domain Electromagnetics // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1999. – Vol. 41, No. 12. – 14 p.

5. Ülkü H.A. Marching On-In-Time Solution of the Time Domain Magnetic Field Integral Equation Using a Predictor-Corrector Scheme / H.A. Ülkü, H. Bağcı, E. Michielssen // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2013. – Vol. 61, No. 8. – 12 p.

6. An explicit marching-on-in-time scheme for solving the time domain Kirchhoff integral equation / R. Chen, S.B. Sayed, N. Alharthi, D.K. Hakan Bagci // Acoustical Society of America. – 2019. – 13 p.

7. Rao S.M. Numerical solution of time domain integral equations for arbitrarily shaped conductor/dielectric composite bodies / S.M. Rao, T.K. Sarkar // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2002. – Vol. 50, No. 12. – P. 1831–1837.

8. Stable electric field TDIE solvers via quasi-exact evaluation of MOT matrix elements / Y. Shi, M. Xia, R. Chen, E. Michielssen, M. Lu // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2011. – Vol. 59, No. 2. – P. 574–585.

9. Arda Ulku H. Application of analytical retarded-time potential expressions to the solution of time domain integral equations / H. Arda Ulku, A.A. Ergin // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2011. – Vol. 59, No. 11. – P. 4123–4131.

10. A space-time mixed Galerkin marching-on-in-time sScheme for the time-domain combined field integral equation / Y. Beghein, K. Cools, H. Bagci, D. De Zutter // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2011. – Vol. 61, No. 3. – P. 1228–1238.

11. Jung B.H. Time-domain EFIE, MFIE, and CFIE formulations using Laguerre polynomials as temporal basis functions for the analysis of transient scattering from arbitrarily shaped conducting structures / B.H. Jung, Y.S. Chung, T.K. Sarkar // Progr. Electromagn. Res. – 2003. – Vol. 39. – P. 1–45.

12. Time domain combined field integral equation using Laguerre polynomials as temporal basis functions / B.H. Jung, Y.S. Chung, T.K. Sarkar, M. Salazar-Palma, Z. Ji // Int. J. Numer. Model., Electron. Netw., Devices Fields. – 2004. – Vol. 17. – P. 251–268.

13. Chung Y.S. Solution of time domain electric field Integral equation using the Laguerre polynomials // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2004. – Vol. 52, No. 9. – P. 2319–2328.

14. Sekljic N.J. Spatially large and temporally entire-domain electric field integral equation method of moments for 3D scattering analysis in time domain / N.J. Sekljic, M.M. Ilic, B.M. Notaros // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2015. – Vol. 63, No. 6. – P. 2614–2626.

15. Davies P.J. Numerical stability and convergence of approximations of retarded potential integral equations // SIAM J. Numer. Anal. – 1994. – Vol. 31. – P. 856–875.

16. Davies P.J. On the stability of time-marching schemes for the general surface electric-field integral equation // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1996. – Vol. 44, No. 11. – P. 1467–1473.

17. Davies P.J. A stability analysis of a time marching scheme for the general surface electric field integral equation // Appl. Nume. Math. – 1998. – Vol. 27. – P. 33–57.

18. Chen R. An Explicit Time Marching Scheme for Efficient Solution of the Magnetic Field Integral Equation at Low Frequencies // Journal of latex class files. – 2015. – Vol. 14, No. 8. – 6 p.

19. Rao S.M. 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. – 7 p.

20. Tijhuis A.G. Toward a stable marching-on-in-time method for two-dimensional transient electromagnetic scattering problems // Radio Sci. – 1984. – Vol. 19. – 6 p.

21. Rynne B.P. Stability and convergence of time marching methods in scattering problems // IMA J. Appl. Math. – 1985. – Vol. 35. – 13 p.

22. Rynne B.P. Stability of time marching algorithms for the electric field equation / B.P. Rynne, P.D. Smith J. // Electromagn. Waves Applicat. – 1990. – Vol. 4. – P. 1181–1205.

23. Vechinski D.A. A stable procedure to calculate the transient scattering by conducting surfaces of arbitrary shape / D.A. Vechinski, S.M. Rao // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1992. – Vol. 40, No. 6. – 4 p.

24. Sadigh A. Treating the instabilities in marching on-in-time method from a different perspective / A. Sadigh, E. Arvas // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1993. – Vol. 41, No. 12. – P. 1695–1702.

25. Manara G. A space-time discretization criterion for a stable time-marching solution of the electric field integral equation / G. Manara, A. Monorchio, R. Reggiannini // IEEE Trans. Antennas and Propagat. – 1997. – Vol. 45, No. 3. – P. 527–532.

26. Rao S.M. Transient scattering by conducting cylinders-Implicit solution for transverse electric case / S.M. Rao, D.A. Vechinski, T.K. Sarkar. – Microw. Opt. Technol. Lett. – 1999. – Vol. 21. – P. 129–134.

27. Rao S.M. Implicit solution of time domain integral equations for arbitrarily shaped dielectric bodies / S.M. Rao, T.K. Sarkar. – Microw. Opt. Technol. Lett. – 1999. – Vol. 21. – P. 201–205.

28. Analysis of transient electromagnetic scattering from closed surfaces using a combined field integral equation / B. Shankar, A.A. Ergin, K. Aygun, E. Michielssen // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 2000. – Vol. 48, No. 7. – P. 1064–1074.

29. Hu J.-L. A new temporal basis function for the time-domain integral equation method / J.-L. Hu, C.H. Chan, Y. Xu // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., J.L. – 2001. – Vol. 11, No. 11. – P. 465–466.

30. A novel scheme for the solution of the time domain integral equations of electromagnetics / D.S Weile. G. Pisharody, N.W. Chen, B. Shanker, E. Michielssen // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 2004. – Vol. 52, No. 1. – P. 283–295.

31. Solving time domain electric field integral equation without the time variable / Z. Ji, T.K. Sarkar, B.H. Jung, M. Yuan, M. Salazar-Palma // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2021. – Vol. 54, No. 1. – P. 258–262.

32. Zhang G.H. Transient analysis of wire structures using time domain integral equation method with exact matrix elements / G.H. Zhang, M. Xia, X.M. Jiang // Prog. Electromagn. Res. – 2009. – Vol. 45. – P. 281–298.

33. Pray A.J. Stability properties of the time domain electric field integral equation using a separable approximation for the convolution with the retarded potential / A.J. Pray, N.V. Nair, B. Shanker // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2012. – Vol. 60, No. 8. – P. 3772–3781.

34. Rao S.M. A Stable Marching-on-in-Time Algorithm Capable of Handling Multiple Excitations – Application to Wire Junction Problems // 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – 2017. – 3 p.

35. Rao S.M. A stable marching-on-in-time algorithm capable of handling multiple excitations – Application to wire junction problems // IET J. Microw., Antennas Propag. – 2018. – Vol. 12, No. 4. – P. 472–478.