

旋转参照系下 Sagnac 效应仿真环境搭建研究

张心心¹ 蒋宏彬^{1,2*} 李正斌²

¹ 绵阳师范学院物理与电子工程学院, 四川 绵阳 621000

² 北京大学信息科学技术学院 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871

摘要 提出了一种旋转参考系中的时域有限差分算法,方便对光子学器件中的 Sagnac 效应进行系统研究,并通过集群系统设计平台下的软件仿真,验证了在不同旋转系下 Sagnac 相移与距离的关系及在时域有限差分算法中的稳定性。实验结果表明该算法能够有效地建模 Sagnac 效应,并可用于各种具有复杂几何结构和材料性质的器件在旋转参照系下的性能评估。

关键词 激光技术; Sagnac 效应; 时域有限差分算法; 并行计算

中图分类号 TN29; TN958.92 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.101402

Building of Simulation Environment for Sagnac Effect in Rotating Reference Frame

Zhang Xinxin¹ Jiang Hongbin^{1,2} Li Zhengbin²

¹ College of Physics and Electronic Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China

² State Key Laboratory of Local Fiber-Optic Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, School of Information Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract We propose a finite-difference time-domain algorithm in a rotating reference frame to facilitate systematic study of Sagnac effect in photonic devices. Through the design of software simulation on a cluster system platform, the relation between Sagnac phase shift and distance in different rotation systems and the stability of finite-difference time-domain algorithm are verified. The experimental results show that the algorithm is capable of modeling the Sagnac effect effectively, and can be used for various devices with complicated geometry and material properties in the rotating reference performance evaluation system.

Key words laser technique; Sagnac effect; finite difference time domain algorithm; parallel computing

OCIS codes 140.3290; 140.3370; 250.3750

1 引言

Sagnac 效应^[1]是法国人 Sagnac 在 1913 年首次发现并得到实验证实的。它是一种与光相对惯性空间运动有关的物理效应,它揭示了同一光路中两个对向传播的光的光程差与其旋转速度的解析关系。诸多研究表明在某些新型结构中 Sagnac 效应有很多新奇的表现,光纤陀螺就是以光的 Sagnac 效应为基础开发出来的。为了对光子学器件中的 Sagnac 效应进行系统的研究,需要建立一种具有普适性的建模方法,该方法可以适用于各种具有复杂结构和材料性质的光子学器件。本文提出一种旋转参考系中的时域有限差分(FDTD)算法^[2]。该算法基于旋转参考系下修正的本构关系,并重新对 Maxwell 方程离散化进而得到时域差分递推方程。FDTD 算法可以广泛应用于各种场合,具有普遍适用性,可以为旋转参考系中光子学器件

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-07-04; 网络出版日期: 2013-09-02

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z310)

作者简介: 张心心(1981—),女,硕士,讲师,主要从事电子信息和光电子信息等方面的研究。E-mail: 10707594@qq.com

* 通信联系人。E-mail: wdxjhb@yahoo.com.cn

的行为提供一种系统的分析工具。

在将 FDTD 算法用于计算具有复杂几何结构的光器件^[2]或者分析一些微弱效应时,为了提高精度,必须细化对计算网格的剖分。但网格的细化势必导致对计算能力和存储空间的更高要求。随着需解决的问题规模的增大,单台计算机的计算速度和存储容量远远不能满足科学计算和工程问题的需求,因此通过搭建一个由 7 台服务器组成的集群并行计算系统来提高计算能力。

2 旋转参照系 Sagnac 效应仿真研究环境建立

对于复杂器件的设计和分析^[3-5],需要稳定、高效且接口友好的 FDTD 计算软件。旋转系下 FDTD 算法实现程序设计的主要流程图如图 1 所示。

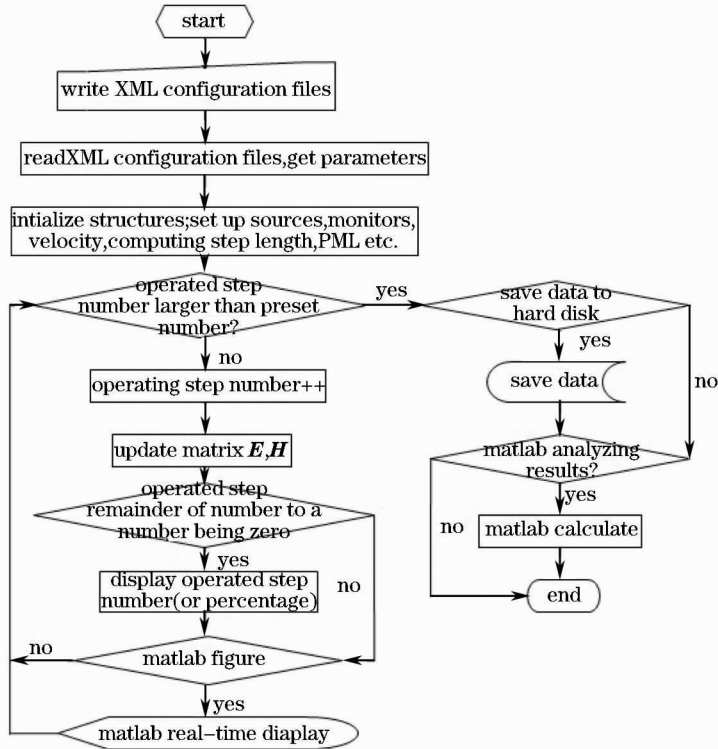


图 1 旋转系下 FDTD 算法实现程序流程图

Fig. 1 Program flow chart of the FDTD algorithm in rotation system

3 集群系统设计与实现

设计的集群系统^[6]是按照集群计算系统的原理进行设计的高性能计算集群。由实验室里的 7 台运行 Linux 操作系统的服务器构成,使用千兆网络交换机构建了一个局域交换网络互联。在每台主机上都配置有制导导航单元(GNU)的编程环境,并配置了消息传递接口(MPI)的并行计算编程环境和相应的工具包,能够进行串行作业和并行作业的计算。

由于本系统是一个小型集群系统,采用主从接口集群体系结构,因此将用户节点、控制节点、管理节点都设定为同一台计算机,使这台计算机成为主节点,主节点也同时参与运算,即也是计算节点。

集群系统由七台配置相同的服务器组成,如图 2 所示。每台服务器的基本配置如下: $2 \times$ AMD Opteron2350 四核处理器(主频 2.0 GHz), 4×1 GB DDR2667 ECC 内存, 500 GB 热插拔 SATA 硬盘。

本系统采用的是简单的星型网络拓扑结构,便于管理和集中控制,容易建网,易于维护。在这种拓扑结构中如果某台服务器因故障停机也不会影响到其他节点之间的通信。

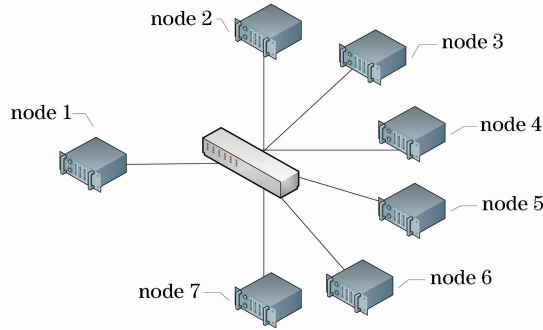


图2 集群系统网络拓扑结构图

Fig. 2 Cluster system network topology structure

4 软件平台搭建

集群中所有节点装有 Linux Ubuntu 8.04.2 server 版操作系统,便于 meep 等在 Linux 下开发的 FDTD 开源软件。装好系统之后,每台计算机都可以作为单台服务器独立使用。因为主要关注电磁数值计算,所以并没有安装配置各种复杂的集群管理软件,只是安装配置了与计算有关的一些软件。在每一个节点都安装了 Secure Shell (SSH), Network File System (NFS), MPICH 以及 Linux 下的各种编译器(C、C++、Fortrain 等)。主节点安装相应的服务器程序,各计算节点配置相应的客户端程序。在 NFS 服务器(node1)中安装 nfs-kernel-server, nfs-common 和 portmap,在 NFS 客户端中安装 nfs-common 和 portmap。这在 Ubuntu 系统中可以方便地通过 apt-get 得到,并且会自动安装依赖的程序。

5 性能分析

为了分析系统的计算能力,使用 FDTD 算法做了一系列仿真测试。采用的仿真结构是 $10 \times 10 \times 10$ 大小的一个立方体,每个单位长度又进一步剖分成更小的网格,剖分的粒度用 R 来描述,即每个单位长度的网格又剖分成 $R \times R \times R$ 大小的一个立方体,所以最终的计算大小应该是 $(10 \times R)^3$ 。

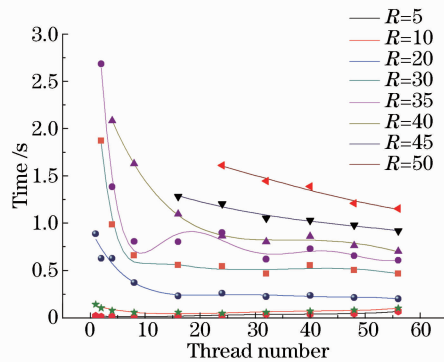


图3 集群性能分析曲线图

Fig. 3 Cluster analysis performance curve

首先测试的是 7 台服务器搭建的整个集群系统的计算能力。在测试中,通过改变 R 来改变计算规模的大小,同时改变计算线程的数量(Thread number)来改变参与计算的资源,等程序运行稳定之后记录计算每一步需要的时间。在计算中 R 分别采用 5, 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50。在画图的时候对各点进行拟合,计算结果如图 3 所示。

6 平台仿真效果验证

6.1 旋转系下二维波导的 FDTD 算法与 Sagnac 效应

Sagnac 效应^[7]表明当电磁波在一个加速运动的介质中传播时,与在静止介质中传播的情况相比,会累

积一些额外的相位偏移。该相移的大小取决于电磁波的传播矢量和介质速度矢量的点积,其微分表达式为 $\Delta\phi = 2\pi \cdot \Delta l / \lambda$ 。

一个已被人们广泛研究的结构是在旋转的介质材料中,两个相对传播的电磁波^[7-8]在一个环形路径传播。总的相移可以通过光路的积分来计算,即 $\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \oint \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{l}$ 。这个总相移具有以下特点:1)与光路的形状无关;2)与旋转中心无关;3)与光路的材料性质无关。

使用一个二维的硅介质直波导作为仿真结构。如图4所示,在直波导中放置一个连续点光源,并设置波导的宽度使得仅单模可以传输。在光源附近仍然存在很多模式。因为那些模式虽然不能传播,但也并没有很快的衰减掉,理论上应该在多模的情况下仍然成立。

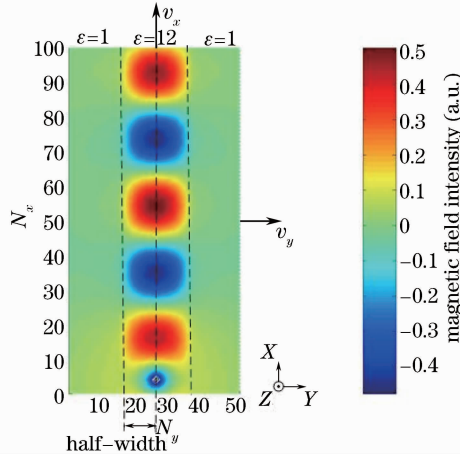


图4 H_x 的模场分布图

Fig. 4 Mode field distribution

仿真环境参数设置如下:吸收边界条件为2阶的 Berenger PML 边界条件; X 方向的网格数为 $N_x = 100$, Y 方向的网格数为 $N_y = 50$;PML的网格厚度 $N_b = 80$;空间差分 $\Delta x = \Delta y = \lambda/100$;Courant 稳定因数 $S = 0.5$;点光源波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。Sagnac 效应最直接的表现是附加相位偏移,因此与其他 FDTD 算法不同的是我们更关心场分量的相位信息,而不是幅度信息。对于某个位置 (I, j) ,每个时间步长点上的场分量都被保存,作为函数 $f(n\Delta t)$ ^[9]。而此时域信号的频谱可以通过傅里叶变换得到,即 $F(\omega) = \int_0^{N\Delta t} f(t) \exp(-j\omega t) dt \approx \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t) \exp(-j\omega n \Delta t) \Delta t$ 。而复数频率的幅角即代表了场分量的相位信息。因此,两个不同位置点 A 和 B 直接的相位差可以通过相应频谱的幅角相减得到,即 $\Delta\phi = \arg[F_A(\omega)] - \arg[F_B(\omega)]$ 。这种通过傅里叶变换求相差的方法是最简单的一种方法。

沿波导方向的 Sagnac 相移可以表示成 $\Delta\phi_{\text{sagnac}} = \Delta\phi_{\text{rotating}} - \Delta\phi_{\text{stationary}}$ 。仿真结果与理论一致,表明 Sagnac

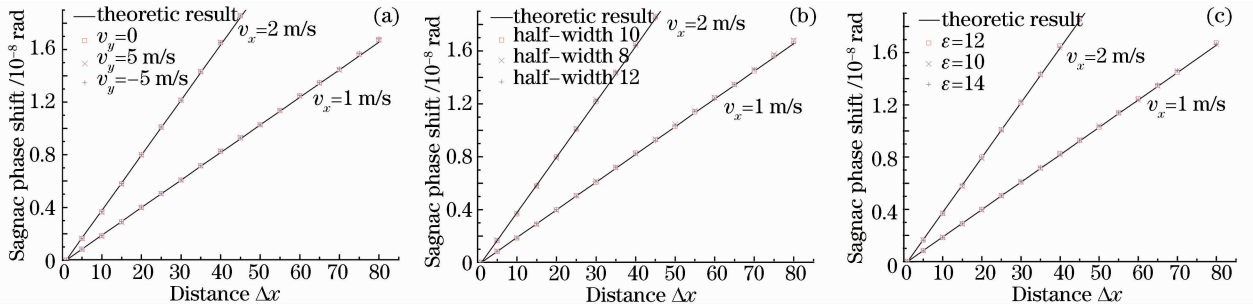


图5 不同情况下 Sagnac 相移与距离的关系。(a) 横向速度改变;(b) 波导宽度改变;(c) 波导介电参数改变

Fig. 5 Relation between Sagnac phase shift and distances under different circumstances. (a) Horizontal speed changes;

(b) waveguide width ϵ changes; (c) waveguide dielectric parameter changes

相移具有这些性质: 1) 与垂直波导方向的速度变化无关; 2) 与波导宽度和介质材料折射率变化无关。这些结果确切地证实了之前的理论分析, 如图 5 所示。

由于某些场分量没有在内存中存储, 我们应用了外推插值算法来获得这些场分量的值。模型的精度显然依赖于插值的精度。计算中采用简单的两点线性插值算法, 也可以引入其他更高级、更精确的插值算法, 以达到更高的精度。更高级的插值算法可能要求更多数据点进行插值, 这将导致更大数据存储空间和计算代价。

6.2 旋转参照系中 FDTD 算法稳定性

Sagnac 效应的基本表现形式是传播电磁波^[10-11]的附加相位积累。然而, 基于离散化网格的 FDTD 方法会引入额外的非物理的相位误差, 即数值色散。由于 Sagnac 附加相移很小, 因此大的数值色散可能对 Sagnac 附加相移计算有严重影响, 甚至会淹没需要计算的附加相移。因此, 需要仔细讨论数值色散对修正 FDTD 算法稳定性的影响。

经过数学推导(具体推导略), 可以发现当空间和时间步长趋近于 0 时, 旋转参考系中的数值色散关系和物理色散关系完全一致。这意味着足够细致的网格划分可以将数值色散减小到任意小的程度。这从理论上证明了修正 FDTD 方法在离散化的情况下对物理模型^[12]的描述是收敛的。

在静止参考系^[13](惯性参考系)二维和三维 FDTD 模型中, 二维(或三维)Yee 网格中传播的数值电磁波的传播速度与其传播方向有关。这是由于网格总是沿 x, y 方向的矩形, 这种离散化引入了各向异性的传播速度。对于旋转参考系中的 FDTD 算法, 也存在类似问题。这种误差是所有基于网格离散 Maxwell 方程求解算法共有的基本限制, 在建模大尺度的电磁目标时可能导致严重问题, 因此有必要对其进行深入的研究。

7 结 论

提出了一种旋转参考系中的 FDTD 算法, 该算法基于旋转参考系中修正的本构关系, 并重新对 Maxwell 方程离散化, 得到了一种对旋转光子器件中 Sagnac 效应建模的系统方法。计算了旋转参考系中沿直波导传播电磁波的 Sagnac 相移, 仿真结果与理论十分吻合。这证明提出的 FDTD 算法能够有效地建模 Sagnac 效应, 并可用于各种具有复杂几何结构和材料性质的器件在旋转参照系下的性能评估。对该算法涉及的如插值算法、数值稳定性、介质边界条件、完全匹配层边界条件等问题进行了讨论。相对传统 FDTD 算法, 旋转系下的 FDTD 算法的主要变化在于其场分量的差分递推方程。旋转参考系中 FDTD 算法的数值稳定性、介质边界条件、完全匹配层吸收边界条件都与传统情况非常类似。特别对于二维情形, 旋转轴垂直于电磁波传播平面时, 介质边界条件与无旋转情况完全一致。这意味着很多原有的 FDTD 程序都可以使用, 仅需要对其迭代部分应用旋转情形下修正差分递推方程。基于微扰理论的慢光 Sagnac 效应增强机理表明, 虽然高色散媒质对于谐振腔传感没有很好的效应, 但对高色散的谐振腔结构应该是有好处的。Sagnac 效应在谐振腔结构中引入了一个额外的相位差, 这个相位差可以理解为是对谐振腔结构的一个微扰。因其对额外的相位微扰非常敏感, 从而高色散谐振腔结构对旋转有灵敏的响应。该工作被认为是合理解释慢光陀螺^[14]机理的基础工作。

激光陀螺^[15]是运动系统不可或缺的部件, 在数控机床、火车、汽车、机器人、运载飞船、星际探测等系统中都迫切需要高精度的陀螺。本研究可为进一步研究超高精度陀螺提供借鉴。

参 考 文 献

- Zhang Xingzhou. Sagnac effect optical fiber gyro[J]. J Transducer Technology, 1998, 17(1): 59-62.
张兴周. Sagnac 效应光纤陀螺[J]. 传感器技术, 1998, 17(1): 59-62.
- Ge Debiao, Yan Yubo. Electromagnetic Wave Finite-Difference Time-Domain Method[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005, 341.
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005, 341.
- Zhou Jin, Gu Lingling, Yu Weikun, *et al.*. Study of the coupled-resonator slow light structures and their applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120607.
周 瑾, 谷玲玲, 于伟坤, 等. 基于耦合谐振系统的慢光结构及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 120607.
- Tang Yuanhe, Guo Ting, Gao Haiyang. Modulation transfer function of modified Sagnac imaging interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1651-1655.

- 唐远河, 郭挺, 郜海阳. 改型 Sagnac 成像干涉仪的调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1651-1655.
- 5 Jin Long, Zhang Weigang, TU Qinchang, *et al.*. Applications of interferential technique in designing optics fiber sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(7): 51-56.
- 金龙, 张伟刚, 涂勤昌, 等. 干涉技术在光纤传感器设计中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(7): 51-56.
- 6 Zheng Weimin, Shi Wei, Wang Dongsheng. High Performance Cluster Computing Architectures and Systems (Vol. 1)[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001. 256-280.
- 郑伟民, 石威, 汪东升. 高性能集群计算: 结构与系统(第一卷)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 256-280.
- 7 Wang Zinan, Wang Cuiyun, Wang Yujie, *et al.*. Optical fiber rotation sensing based on inscribed multi-point-coupling resonance loop structure slow light system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2492-2496.
- 王子南, 王翠云, 王玉杰, 等. 基于多点耦合内切的光纤谐振环慢光系统转动传感理论[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2492-2496.
- 8 Wan Shengpeng, He Xingdao. Temperature effects in a Brillouin fiber-optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 162-165.
- 万生鹏, 何兴道. 温度对布里渊光纤陀螺的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 162-165.
- 9 Xiang Libin, Yuan Yan, Lü Qunbo. Spectral transfer function of the Fourier transform spectral imager[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5399-5405.
- 相里斌, 袁艳, 吕群波. 傅里叶变换光谱成像仪光谱传递函数研究[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5399-5405.
- 10 Zou Yunlu, Xu Daxiong. Holographic coupler for fiber-optic Sagnac interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 1988, 8(8): 751-755.
- 邹运庐, 徐大雄. 用于光纤 Sagnac 干涉仪的全息耦合器[J]. 光学学报, 1988, 8(8): 751-755.
- 11 Wu Tiesheng, Wang Li, Wang Zhe, *et al.*. A photonic crystal fiber temperature sensor based on Sagnac interferometer structure[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1114002.
- 伍铁生, 王丽, 王哲, 等. 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1114002.
- 12 Li Xuyou, Hao Jinhui, Yang Hanrui, *et al.*. Research on the compensating fiber loop for eliminating vibration in Sagnac optic current sensor[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0205005.
- 李绪友, 郝金会, 杨汉瑞, 等. 消除萨尼亚克光纤电流传感器振动干扰的光纤补偿环研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205005.
- 13 Sun Guoxin, Zhou Kejiang. Virtual optical-fiber Sagnac interferometer and analogy-digital mixed demodulation system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 213-218.
- 孙国鑫, 周柯江. 虚拟光纤 Sagnac 干涉仪及其数模混合解调系统[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 213-218.
- 14 Hong Lingfei, Zhang Chunxi, Feng Lishuang, *et al.*. Frequency tracking and locking methods in resonator micro-optic gyro [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0905003.
- 洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽, 等. 谐振式微光学陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0905003.
- 15 Gao Feng, Zhao Lin, Tian Wei, *et al.*. Investigation on the principle of re-entrant IOG[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(3): 198-201.
- 高峰, 赵林, 田伟, 等. 再入式集成光学陀螺原理研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 198-201.