

利用积分方程快速傅氏变换方法分析 纳米天线特性

李 银 胡 俊 郭兰维 李乐伟

(电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要 由于纳米天线可以实现纳米尺度场空间局域增强, 在微纳传感探测、纳米光子器件设计等纳米光子学领域具有重要应用。纳米天线介电常数大, 结构精细, 几何网格剖分密度很大, 多层快速多极子方法由于低频数值崩溃问题导致计算效率不高。积分方程快速傅氏变换方法基于格林函数插值和 Toeplitz 矩阵特性实现高效计算, 没有低频数值崩溃问题。本文将积分方程快速傅里叶变换结合表面积分方法用于分析纳米天线特性, 并考察了近场增强效应及相关影响因素。

关键词 积分方程快速傅里叶变换; 表面积分方程; 纳米天线; 近场增强; 纳米电磁学
中图分类号 TN82

1. 引 言

纳米天线也称为光学天线。当入射光与金属纳米颗粒相互作用时, 金属表面的自由电子产生局域振荡, 形成表面等离激元共振。能量被束缚在金属表面附近, 从而实现了入射场与局域场的相互转换。

纳米天线可以实现纳米尺度超衍射极限的光传输的有效调控, 同时在纳米尺度上电磁能量局域汇聚放大, 其空间尺度受限、场空间局域增强的特点, 在微纳传感探测、纳米光子器件设计及其集成等纳米光子学领域具有重要应用。

由于纳米天线的实验的条件要求高而且实验的费用也很高, 所以大量研究工作采用数值模拟方法来研究纳米天线。纳米天线满足基本的电磁场的方程, 因此, 可以采用电磁学数值方法对其进行计算。当前, 大量的计算电磁学的方法都已经开始应用到纳米天线的研究中, 如时域有限差分(FDTD)^[1]、有限元法(FEM)^[2]、矩量法(MoM)^[3-4]等。由于纳米天线介质波长短, 结构精细, 纳米天线几何网格剖分密度很大, 使用传统多层(IE-FFT)可以将近区设置得很小, 因此, 它不存在低频数值崩溃问题^[5]。快速多极子方法(MLFMA)^[6]分析纳米天线, 由于要避免低频数值崩溃会导致大量的近区组, 附近组

直接计算部分占据绝大部分计算量。而积分方程快速傅氏变换方法没有低频数值崩溃问题。

本文利用 IE-FFT 结合表面积分方程方法(PMCHW)仿真计算了纳米天线, 研究了影响纳米天线近场特性的因素。

2. IE-FFT 和 PMCHW 结合

2.1 IE-FFT 方法

IE-FFT 方法可以分成四个步骤: 格林函数插值、映射矩阵计算、修正近区元素、FFT 加速矩矢相乘。插值格林函数可以使得源场分离, 接着就可以把基函数映射到空间中的均匀网格点上, 由于通过插值方法计算得到的近区基函数的相互作用不正确, 就需用矩量法的解来对它进行修正。

最终 IE-FFT 计算矩矢相乘的表达式为

$$\mathbf{Z} \cdot \mathbf{D} = (\mathbf{Z}_{N \times M}^{\text{new}} - \mathbf{Z}_{\text{IE-FFT}}^{\text{new}}) \cdot \mathbf{D} + \mathbf{Z}_{\text{IE-FFT}} \cdot \mathbf{D} \quad (1)$$

2.2 IE-FFT 和 PMCHW 结合

在 PMCHW 方程中有多个格林函数, 需要对每个格林函数进行差值, 并且对每一个格林函数均需要进行快速傅里叶变换(FFT)和逆快速傅里叶变换(IFFT)来加速矩矢相乘。

格林函数插值表达式如下

$$G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{ik_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \simeq \sum_{l=0}^{N_1-1} \sum_{l'=0}^{N_1-1} \beta_l^0(\mathbf{r}) G_{l,l'}^0 \beta_{l'}^0(\mathbf{r}') \quad (2)$$

$$G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{ik_1|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \simeq \sum_{l=0}^{N_1-1} \sum_{l'=0}^{N_1-1} \beta_l^1(\mathbf{r}) G_{l,l'}^1 \beta_{l'}^1(\mathbf{r}') \quad (3)$$

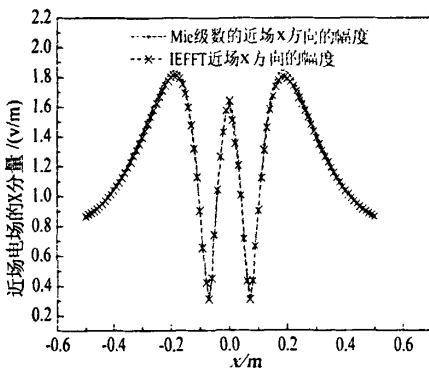
以 PMCHW 中 EFIE 为例, IE-FFT 的表达式如下

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{\text{IE-FFT}} \cdot \mathbf{D} = & -\omega k_0 \eta \Pi_1 \cdot \text{IFFT}\{\text{FFT}\{\mathbf{G}^0\} \cdot \\ & \text{FFT}\{(\Pi_2)^T \cdot \mathbf{D}\}\} + \frac{\omega \eta}{k_0} \Pi_3 \cdot \\ & \text{IFFT}\{\text{FFT}\{\mathbf{G}^0\} \cdot \text{FFT}\{(\Pi_4)^T \cdot \mathbf{D}\}\} - \\ & \omega k_1 \eta \Pi_1 \cdot \text{IFFT}\{\text{FFT}\{\mathbf{G}^1\} \cdot \\ & \text{FFT}\{(\Pi_2)^T \cdot \mathbf{D}\}\} + \frac{\omega \eta}{k_1} \Pi_3 \cdot \\ & \text{IFFT}\{\text{FFT}\{\mathbf{G}^1\} \cdot \text{FFT}\{(\Pi_4)^T \cdot \mathbf{D}\}\} \end{aligned} \quad (4)$$

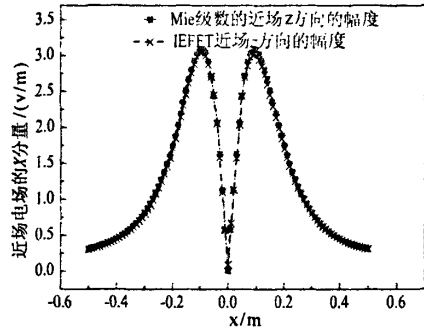
由上面的表达式可以看出,对于多套格林函数的 PMCHW 方程,可以使用同一套插值函数,其增加的只是插值格点上的格林函数的计算。

为说明本文方法正确性,我们考察了 0.2 m 介质球的近场结果并与 Mie 级数结果进行对比。该球介电常数 $\epsilon_r = -4.0$, 相对磁导率为 $\mu_r = 1.0$, 入射波的频率为 300 MHz, 入射波方向与 z 轴夹角为 0, 计算范围为: $x \in [-0.5, 0.5]$ m, $y = 0$ m, $z = 0.21$ m. x 分量和 z 分量的近场计算如下图 1 所示。

由图 1 可知采用 IE-FFT 加速 PMCHW 后,在计算近场时仍然能够保证很好的精度。



(a) x 分量结果



(b) z 分量结果

图 1 IEFFT-PMCHW 计算介质球近场

3. 数值结果

三个沿 x 轴均匀分布的纳米金球, 半径为 $r = 25$ nm, 球间隔为 $gap = 5$ nm, θ 为入射波的方向与 z 轴的夹角, 纳米天线的尺寸参考文献[7], 纳米天线的介电常数来自实验结果见文献[8], 纳米天线的分布形式如下图所示

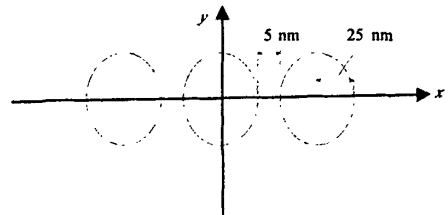


图 2 纳米天线排列示意图

3.1 激励波的频率对纳米天线近场增强特性的影响

当入射波的频率为 451 THz, $\theta = 0^\circ$, 极化方向沿着 x 轴, 背景为空气, 纳米天线的参数为 $\epsilon_r = -13.93 + 12.073i$, $\mu_r = 1.0$, 纳米天线的近场分布如下:

当入射波的频率为 515 THz, $\theta = 0^\circ$ 时, 极化方向沿着 x 轴, 背景为空气, 此时纳米天线的 $\epsilon_r = -8.11267 + 1.66054i$, $\mu_r = 1.0$, 纳米天线的近场分布如下:

当 $\theta = 0^\circ$ 时, 入射波的频率为 486 THz, 极化方向沿着 x 轴, 背景为空气时, 此时纳米天线的 $\epsilon_r = -10.662 + 1.37i$, $\mu_r = 1.0$ 纳米天线的近场分布如下

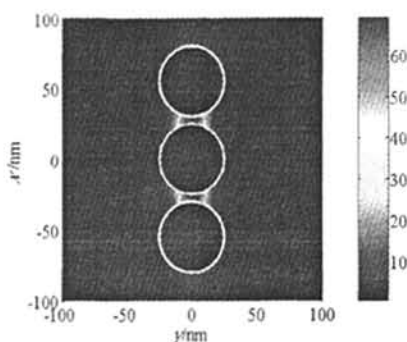


图3 频率为451 THz,入射角度为 $\theta=0^\circ$ 时,纳米天线的近场电场能量密度 $\|E\|/\|E_{inc}\|$ 分布

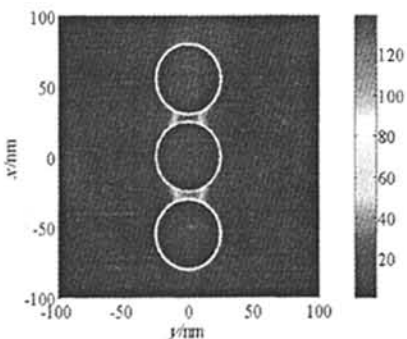


图4 频率为515 THz,入射角度为 $\theta=0^\circ$ 时,纳米天线的近场电场能量密度 $\|E\|/\|E_{inc}\|$ 分布

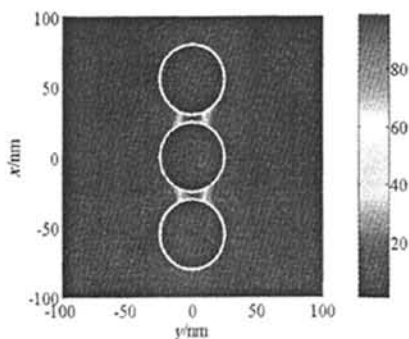


图5 频率为486 THz,入射角度为 $\theta=0^\circ$ 时,纳米天线的近场电场能量密度 $\|E\|/\|E_{inc}\|$ 分布

表1 列出了三种频率下最强场值对比

频率 (THz)	纳米天线相 对介电常数	最强场值 ($\ E_{max}\ /\ E_{inc}\ $)
451	$-13.9+12.07i$	65
486	$-10.6+1.37i$	98
515	$-8.1+1.66i$	134

由上可见,在激励波的频率很高的情况下,纳米天线的近场都有很强的增强特性,不同的频率下纳米天线的近场增强的特性不同。

3.2 背景对纳米天线近场增强特性的影响

当入射波的频率为515 THz, $\theta=0^\circ$ 时,极化方向沿着x轴,背景为 $\epsilon_r=2.25$,纳米天线的近场分布如下:

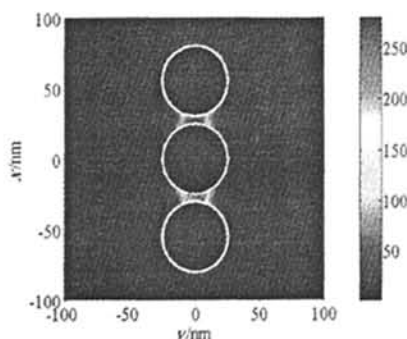


图6 入射波的频率为515 THz,背景为 $\epsilon_r=2.25$ 纳米天线的近场增强图

当 $\theta=0^\circ$ 时,入射波的频率为486 THz,极化方向沿着x轴,背景为 $\epsilon_r=2.25$,纳米天线的近场分布如下:

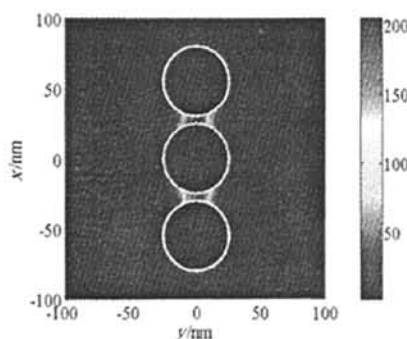


图7 入射波的频率为486 THz,背景为 $\epsilon_r=2.25$ 纳米天线的近场增强图

表2 列出了不同背景下最强场值对比

频率 (THz)	纳米天线相 对介电常数	背景的介 电常数	最强场值 ($\ E_{max}\ /\ E_{inc}\ $)
486	$-10.6+1.37i$	1	98
486	$-10.6+1.37i$	2.25	199
515	$-8.1+1.66i$	1	134
515	$-8.1+1.66i$	2.25	273

由上可以看出:当背景环境的介电常数增加时,

纳米天线的近场增强特性也会增加。

4. 结 论

本文采用 IE-FFT 和 PMCHW 结合,实现了纳米天线的高效计算,该方法没有低频数值崩溃问题,因此具有良好的计算效率。对于 PMCHW 方法中的多套格林函数插值,可以使用同一套插值函数来提高插值计算效率。数值结果表明:在激励波频率很高的情况下,近场的电场可以得到很大的增强,纳米天线的近场增强与激励波的频率以及背景的介电常数有关。

参考文献

- [1] RICO-GARCIA J M, LOPEZ-ALONSO J M, ALDA J. FDTD analysis of nano-antenna structures with dispersive materials at optical frequencies [DB/OL]. SPIE. Nanotechnology II. 2005, Sevilla, Spain. http://www.spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/5838/1/137_1.
- [2] KOTTMANN J, MARTIN O. Plasmon resonant coupling in metallic nanowires[J]. Optics Express, 2001, 8(12): 655-663.
- [3] KERN A M, MARTIN O J F. Surface integral formulation for 3D simulations of plasmonic and high permittivity nanostructures[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2009, 26(4): 732-740.
- [4] GALLINET B, KERN A M, MARTIN O J F. Accurate and versatile modeling of electromagnetic scattering on periodic nanostructures with a surface integral approach[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(10): 2261-2271.
- [5] YIN J, HU Z P, NIE X, et al. Floating interpolation stencil topology-based IE-FFT algorithm[J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2011, 16: 245-259.
- [6] 胡 俊, 聂在平, 王 军, 等. 三维电大目标散射求解的多层快速多极子方法[J]. 电波科学学报, 2004, 19(5): 509-514.
- [7] DEVILEZ A, STOUT B, AND BONOD N. Mode-balancing far-field control of light localization in nano-antennas[J]. Physical Review B, 2010, 81: 1-5.
- [8] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals [J]. Physical Review B, 1972 (6): 4370-4379.

作者简介

李 银 (1986—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要研究领域纳米电磁学。

胡 俊 (1973—), 男, 浙江人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究领域为计算电磁学, 电磁散射与辐射等。

(上接第 455 页)

- [2] WEI J X. Carbon fiber thermal conductivity measurement and analysis [R]. Foreign Technol. Div. Wright-Patterson AFB OH AD-A205 682/8/XAD, 1989.
- [3] 宗显政. 平台与天线的一体化电磁建模及工程实践研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [4] 王从恩. 天线机电热多场耦合理论与综合分析方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [5] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 北京电子工业出版社, 2002.

作者简介

池玉友 (1970—), 男, 大学本科/高级工程师, 主要研究方向为宽带天馈系统优化设计、新型阵元研究、阵列与载体平台的一体化设计等。

郭大猛 (1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为振动理论及多体动力学等。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>