2013年4月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2013)02-0179-05

衍射高斯波束分析方法

姚远1,俞俊生1,陈晓东2,李成亮1

(1.北京邮电大学 电子工程学院,北京 100876; 2.英国伦敦大学 玛丽女王学院 电子工程与计算机科学学院,伦敦)

摘 要:毫米波与亚毫米波在军事、民用方面都有广泛的用途。反射面分析通常采用几何光 学法和物理光学法。本文首先对这 2 种方法进行了简单的比较分析,然后特别介绍了基于几何光 学的衍射高斯波束分析方法,并在此基础上将其改进为可以分析三维系统的分析方法。并将其高 效性、精确性与基于物理光学的商用软件进行对比验证。可以看出,三维衍射高斯波束分析方法 是一种高效准确的分析设计三维准光网络的方法。

关键词:衍射高斯波束;准光;毫米波

中图分类号: TN92 文献标识码: A

Diffraction Gaussian beam analysis method

YAO Yuan¹, YU Jun-sheng¹, CHEN Xiao-dong², LI Cheng-liang¹

(1.School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;2.School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary, University of London, London, UK)

Abstract: Millimeter and submillimeter wave has been widely used in the military and civilian. Reflective surfaces are usually analyzed by Geometrical Optics(GO) and Physical Optics(PO) methods. This paper firstly compares these two methods simply, and then specially introduces Diffraction Gaussian Beam Analysis(DGBA) method based on GO. On that basis, this analysis method is improved to analyze the three-dimensional system. The efficiency and accuracy between this method and commercial software based on PO are compared. It could be seen that the three-dimensional DGBA method is an efficient and accurate method to analyze and design three-dimensional quasi-optical network.

Key words: diffraction Gaussian beam; quasi-optical; millimeter wave

过去几十年来,在许多科学领域,如射电天文、大气遥感、等离子体诊断、不接触式的金属探测和太赫兹成 像技术等领域中,毫米波、亚毫米波以及太赫兹系统越来越受到重视。但由于这些系统工作的频率相对较高,结 构精细,造价昂贵,因而对设计分析系统工具的可靠性和高效性提出了更高的要求。如,对于电大尺寸的反射器 天线,一般的天线仿真已经不能得到满意的结果,因此,更有效、更准确的理论分析和数值模拟方法相继被提出。 其中由丹麦 TICRA 公司设计的,利用物理光学、物理衍射理论等数值计算软件 GRASP 是现在最流行的设计准 光网络、反射镜天线等毫米波、亚毫米波及太赫兹波系统的商用软件。另外利用几何光学(GO)也得到比较精确 的分析结果。

GRASP能够计算具有多反射镜、多馈源系统的电磁辐射,甚至不同天线之间的相互影响。该软件不但适用 于标准的几何表面,而且还可以使用用户自定义的赋形面结构。GRASP使用的算法和数值方法主要包括物理光 学(PO)、几何绕射理论、矩量法、物理衍射理论^[1]。使用几何光学在分析反射面时,在镜子中心处,只利用几 何光学的反射计算入射场;在靠近边缘处,同时考虑几何光学的反射和波束的衍射来提高计算的精确度。在衍射 部分采用的是衍射高斯波束分析方法(DGBA),所以这里就将几何光学的方法称为 DGBA。对于太赫兹系统,通 常情况下是电大尺寸,利用物理光学将会消耗大量的时间在电流积分的计算上,尽管现在的 GRASP 利用并行计 算来降低仿真时间,但是相对的数值计算量还是很大、很耗时的。然而,几何光学和衍射高斯波束分析方法的结 合,不仅具有几何光学计算的高效性,同时由于衍射高斯波束分析的补充,保证了仿真结果的精确性。另外, DGAB 高度模块化,有利于多反射镜的分析。

收稿日期: 2012-11-07; 修回日期: 2013-01-05

1 物理光学和几何光学的比较

1.1 几何光学

180

几何光学是麦克斯韦方程在高频下的近似解,它把波的传播处理成垂直于等相位面的射线。它只考虑入射波、 反射波的贡献。采用几何光学首先要满足^[2]:

1) 主反射镜的曲率半径远大于波长,从而每个反射点的局部区域都可以看成平面。

2) 来自馈源的入射波曲率半径很大,在反射点处可以当做平面波处理。

3) 反射器作用像一个理想导体,因而反射波与入射波幅度相等,反射系数r=11。

这里采用的衍射高斯波束分析方法,最初由伦敦大学玛丽女王学院的 C Riechmann 开发。由于在分析电磁场 的过程中将电磁场分解为若干高斯波束,并且用高斯波束在基尔霍夫半平面上的衍射来补充场的准确性,所以称 其为衍射高斯波束分析方法。但原分析方法仅限于分析设计二维结构的系统,在此基础上对其进行了扩展,使其 能够分析设计三维的准光网络系统。图 1 为高斯波束分析方法分析一个镜子的具体过程^[3]。



Fig.1 Process of diffracted Gaussian beam analysis method 图 1 衍射高斯波束分析方法分析一个镜子的具体过程

1) 对入射场(可以是来自馈源的近场或者前一个镜子的辐射场),在入射平面上进行过采样,然后将其分解为一系列高斯波束(如图2),并用相应的高斯波束系数表示^[4-5]。

2) 对每一束传播到镜面且能量大于阈值的波束进行分析。对于 打到镜面边缘的所有高斯波束,要根据相关理论分别对衍射和反射 进行计算;而打到镜面中心附近的波束只考虑反射的影响。反射只 需要根据简单的反射定律进行求解,而衍射则利用高斯波束入射到 基尔霍夫半平面的正则问题的渐进解来计算^[4]。

3)最后,出射平面上的场分布由反射部分和衍射部分叠加而成。如果是最后一个镜子,就由此得到近场;如果不是最后一个镜子,所得到的场将作为下一个镜子的入射场。

1.2 物理光学

GRASP利用物理光学^[1]近似法对反射器表面的电流或等效磁流 进行计算,然后由一般的天线理论通过流积分得到远场结果。

入射波 E^i 入射到几何和电性能已知的反射面上,则总的辐射场为:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}^{i} + \boldsymbol{E}^{s}$$

式中 E^s 为散射场。

所以计算辐射可以分为3步:



 Fig.2 Diagram of Gaussian mode expanding in the incident plane
 图 2 入射波在入射平面内展开成高斯模的示意图

(1)

1) 由入射波计算感应电流或者等效流。任意场照射在无限大理想导电平面上得到的电流由下式计算:

$$\boldsymbol{J}^{e} = 2\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{H}^{i} \tag{2}$$

式中: **J**^e为感应电流; **n**是镜面单位法向量; **H**ⁱ是入射磁场。没有被直接照射到镜面上的点的感应电流近似取 零。如果镜子的表面尺寸和曲率半径相对于波长足够大,曲面镜的感应电流能够得到很好的近似。

2) 由感应电流或者等效磁流计算辐射场。

根据辐射场理论,可以由下列积分得到散射场的解:

$$\mathbf{A}^{e} = \frac{\mu}{4\pi} \iint \mathbf{J}^{e}(\mathbf{r}') \frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR}}{R} \,\mathrm{d}s^{\,\prime} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{A}^{m} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint \boldsymbol{J}^{m}(\boldsymbol{r}') \frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR}}{R} \,\mathrm{d}s^{\,\prime} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{E} = -j\boldsymbol{w} \left\{ \boldsymbol{A}^{e} + \frac{1}{k^{2}} \nabla (\nabla \cdot \boldsymbol{A}^{e}) \right\} - \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \boldsymbol{A}^{m}$$
(5)

$$\boldsymbol{H} = -jw\left\{\boldsymbol{A}^{m} + \frac{1}{k^{2}}\nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{A}^{m})\right\} + \frac{1}{\mu}\nabla \times \boldsymbol{A}^{e}$$
(6)

式中: A^{e} 表示电矢量位; A^{m} 表示磁矢量位; J^{m} 是感应磁流; ε 是介电常数;w为角频率;k为波数; $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, r是观察点,r'是源点,积分区域是整个产生散射的镜面。远场可通过求极限得到。

3) 将入射场和散射场叠加得到总场。

GRASP 也采用了其他的算法来提高运算结果的精确度。

2 衍射高斯波束分析方法的三维化扩展

在此基础上,将二维衍射高斯波束分析方法扩展成可以分析设计三维结构的方法。所谓二维就是指镜子的光 学中心和波束的传播方向都在同一个二维平面上,因此波束仅限于在一个平面上传播。然而在实际应用中,设计 三维准光系统才能满足一些系统指标。如,在空间有限的航天设计中,只有紧凑的结构才能满足相应的技术指标, 这时三维结构就是一个很好的解决办法。GRASP 可以设计三维系统,但缺点是对于电大系统,特别是太赫兹系 统电流积分非常耗时。衍射高斯波束分析方法克服了这一缺点,当频率很高甚至到太赫兹时,电磁波的特性越来 越接近于光学特性,这时利用几何光学计算就可以保证相对的精确度;同时,利用几何光学可以大大降低数值运 算时间,提高仿真效率,得到实时的仿真结果;再加上衍射高斯波束的补充,保证了结果的精确度。

对于全三维的衍射高斯波束分析方法,首先要去除所有原先设置的对称面,包括镜面的对称面、入射面和出 射面的对称面。显然,实际情况中由于很多因素往往不是绝对对称的,这样更接近实际情况。这样做的后果就是

增加了一倍的仿真时间,但是对于 GRASP 来讲,三维衍射高 斯波束分析方法仍然高效快速。在这期间,笔者采用了一种改 进的单纯形算法来完成入射波束与离散镜面相交的精确交点 问题。运算过程中使用了几何光学,简化了计算,缩短了计算 时间,但是在三维化方面却带来了一定的不便。要想使波束可 以在三维空间中向任意方向传播,而由于几何光学的限制,不 能任意改变下一个镜子的方向,只能沿入射波束的方向以任意 角度旋转得到三维的结果。可以通过调整增加的角度这个自由 度,以及调整整个系统来实现任意的三维准光网络系统的设 计。另外如果镜子旋转 β,则等效于相应的入射场旋转-β,为 了充分利用原始代码的衍射高斯波束进行计算,采用了这种等 效的方法得到三维出射场。



used to test the Gregorian 图 3 用来测试格里高利系统的示意图

在文献[3]中,作者 C Riechmann 在论文中详述了二维衍射高斯波束分析方法,并且以一个工作在 30 GHz 的 偏置的卡塞格伦系统进行验证。在工作频率下,它的副镜和主镜的口径分别是 40 λ 和 100 λ,所得结果与使用物 理光学的 GRASP 进行对比。在-30 dB 以内,两者得到的 E 面、H 面结果几乎完全吻合,因此这里不再对二维衍

射高斯波束分析方法进行验证。

对于工作在 2 THz 的三反射镜,镜面口径分别为 45 mm,45 mm,40 mm,利用 CPU 型号为 Intel Core 2 Quad Q9500@2.83 GHz、内存 4 GHz 的计算机进行仿真。GRASP 计算时间大约需要 6 h~7 h,而三维衍射高斯波束分 析方法可以控制在 0.5 h 左右。

3 仿真结果对比

笔者仿真测试了若干三维衍射高斯波束分析方法得到的系统,结果都比较满意。这里只给出一个格里高利的系统的测试结果图(如图 3)。仿真测试的工作频率在 300 GHz,主镜和副镜的口径大小分别为 60 λ 和 160 λ, 馈源是远场型的标准高斯馈源,仿真测试结果如图 4 所示,4(a),4(b)分别为主镜在二维情形下旋转 30° 和 90° 的结果。可以看到,主瓣在-25 dB内,DGBA和 PO的结果几乎完全吻合。



4 结论

本文在基于几何光学的二维衍射高斯波束分析方法的基础上,将其扩展为能够分析准光网络系统的方法,并 将其高效性、精确性与基于物理光学的商用软件 GRASP 进行了对比验证。结果证明三维衍射高斯波束分析方法 是一种高效准确的分析设计三维准光网络的方法。在将来的工作中,要用实物系统的测试结果来验证仿真结果的 准确性,并将已经工程化的基于二维衍射高斯波束分析方法的软件 Simatrix 扩展成三维的软件包。

参考文献:

- [1] Knud Pontoppidan. GRASP9-Technical Description[M]. Copenhagen, Denmark: TICRA, 2008.
- [2] 斯塔兹曼,蒂尔. 天线理论与设计[M]. 朱守正,安同一,译. 北京:人民邮电出版社, 2006:300-325. (Stutzman L, Thiele G A. Antenna theory and design[M]. Translated by ZHU Shouzheng, AN Tongyi. Beijing:Post & Telecom Press, 2006: 300-325.
- [3] Rieckmann C, Rayner M R, Parini C G, et al. Novel modular approach based on Gaussian beam diffraction for analyzing quasi-optical multi-reflector antennas[J]. IEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation, 2002, 149(3):160-67.
- [4] Daubechies, Ingrid. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1990, 36(5):961-1005.
- [5] Takashi Takenaka, Otozo Fukumitsu. Asymptotic representation of the boundary-diffraction wave for a three-dimensional Gaussian beam incident upon a Kirchhoff half-screen[J]. Optical Society of America, 1982, 72(3):331-336.

作者简介:

P

姚 远(1971-),男,沈阳市人,2010年于 清华大学,获博士学位,现为北京邮电大学副 教授,主要研究领域为电磁场与微波技术、天 线技术、太赫兹技术等,目前主持国家自然科 学基金项目、国家高技术研究发展计划(863 计 划)、中央高校基金项目、北京市自然科学基金

项目等,已发表论文 43 篇,其中 SCI 12 篇, EI 31 篇.email: yaoy@bupt.edu.cn.

俞俊生(1961-),男,安徽省无为县人,博士,教授,博 士生导师,主要研究领域为物理电子学、等离子体电子学, 曾任核工业西南物理研究院研究员、中国核工业总公司副处 长、国防科工委副处长、中国核工业集团公司处长,现任国 家 "863"项目专家组成员. 陈晓东(1962-),男,合肥市人,1988 年毕业 于电子科技大学,获博士学位,现为伦敦大学玛 丽女王学院教授,博士生导师,主要研究领域为 无线通信、天线与微波器件、微波的生物效应与 应用、毫米波及太赫兹科学技术研究及应用,系 统地解决了多年来困扰超宽带天线工作机理研 究中的科技难题,首次揭示了平面单极超宽带天 线的工作原理,其论文成果单篇被 SCI 论文他引 达 139 次.

李成亮(1988-),男,山东省泰安市人,现为 在读硕士研究生,主要研究领域为太赫兹准光网 络分析方法.

(上接第170页)

- [5] 彭阳. 具有截止圆波导的盒形窗的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2007. (PENG Yang. Research of Pill-Box Window with Cut-Off Circular Waveguide[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2007.)
- [6] 张新仁.3 mm 波段回旋管高频窗的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008. (ZHANG Xinren. Research of High-frequency Millimeter-Wave Window for a 3 mm Gyrotron Traveling-Wave Tube[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2008.)
- [7] John Douglas Wade, Robert H Macphie. Scattering at Circular-to-Rectangular Waveguide Junctions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1986,34(11):1085-1091.

作者简介:



王亚军(1984-),男,四川省绵阳市人,硕 士,助理研究员,主要从事太赫兹微型电真空器 件研究.email:w_yj323@yahoo.com.cn. **陈 樟**(1982-),男,四川省开江县人,博 士,助理研究员,主要研究方向为THz微纳电子 学器件.

刘 俊(1974-),男,重庆市人,硕士,高 级工程师,主要研究方向为太赫兹电真空器件结 构设计和工艺.