

口径天线瞬态辐射特性的研究

王向晖，蒋延生，汪文秉

(西安交通大学微波与光通信研究所，710049，西安)

摘要：为了在时域研究超宽带口径天线的瞬态辐射特性，利用时域有限差分方法在平面波正投射、斜投射及柱面波投射于不同尺寸和形状的口径面的情况下，对口径面上的场进行了计算，进而得出该口径天线的辐射场。将通常天线的方向图扩展为可用于超宽带天线的空时方向图，并在不同激励的情况下用空时方向图描述了激励脉冲在自由空间展布的宽度与天线口径几何尺寸、形状和主辐射面的辐射波形之间的关系，得出改变口径面的形状和大小可以改变口径面的辐射特性的结论，为理解超宽带口径天线辐射特性并为进一步设计该类天线提供了理论依据。

关键词：超宽带天线；天线口径；空时方向图；时域有限差分法

中图分类号：TN821 文献标识码：A 文章编号：0253-987X(2004)02-0170-04

Research on Transient Radiated Characteristics of Aperture Antennas

Wang Xianghui, Jiang Yansheng, Wang Wenbing

(Institute of Microwave and Optical Communication, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to investigate the transient radiated characteristics of the ultra-wide-band (UWB) aperture antennas in time-domain, the finite-difference time-domain numerical method was used to calculate the aperture field under the condition that the plane waves had front, slanting, and cylindrical waves project on the aperture with various size and shape, and then the radiation field of the aperture could be obtained. The conventional antenna pattern was extended to the space-time pattern which can be used in UWB antennas, then the relationship between the radiated waveform in E-plane and H-plane and the impulse duration in free space and the aperture shape and size could be described by the space-time pattern in different exciting conditions. In the end, a conclusion that the aperture radiated characteristics could be changed through varying the aperture size and the shape was reached. The research provided a theoretical basis for understanding the transient radiated characteristics of aperture antennas and helping engineers to design this type of antennas.

Keywords: *ultra-wideband antenna; aperture; space-time pattern; finite-difference time-domain*

口径辐射的时域特性将提供时域天线^[1]设计的依据，如何高效而又较少畸变地将信号辐射出去是超宽带(UWB)天线设计的关键。传统的超宽带口径天线设计方向是沿用窄带天线的设计方法，即把天线分为内部问题与外部问题。对外部问题沿用窄带天线的要求，认为口径越大方向性越好，同相口径的口径效率最高。已有众多学者在此方面进行了研究，

Baum^[2]于1989年通过给口径面赋值，首次提出脉冲口径天线辐射场的时域积分表达，并对阶跃脉冲激励口径的辐射特征进行了初步的研究分析，建立了口径脉冲天线分析的理论基础，但在采用拉氏变换后的计算中在相位上采用了一阶近似，在求反变换时这一近似条件是不满足的。另外，该文还假设了口径面的场分布，忽视了口径的边缘效应，应用了远

场近似的条件而忽视了超宽带的固有特性,故所得到的结论并不能应用于主轴方向. 2001 年 Dennis Sullivan^[3]用平面波投射到开口的无限大导体平板中,并用时域有限差分(FDTD)方法进行了分析,辐射场应用 Huygens 等效原理计算,并用小波分析来压缩时域数据,在计算时没有应用远场近似条件,但该文没有详细分析天线的口径形状、尺寸与激励脉冲宽度对辐射特性的影响. 王向晖等人^[4]在文献^[3]的基础上进一步分析了在口径赋定场值的情况下,辐射波形与口径的形状及激励脉冲信号的脉宽之间的关系,发现在偏离主轴方向场的辐射情况与文献^[2]的理论分析结果一致,但在轴线附近,辐射波形与口径形状无关,而与口径面积有关.

本文利用 FDTD 方法^[5]研究了平面波正投射、斜投射($\theta=45^\circ, \varphi=90^\circ, \alpha=180^\circ$)及柱面波投射于口径面的绕射场. 研究了在不同激励方式激励不同形状和尺寸的口径时,激励脉冲在自由空间展布的宽度与口径的几何尺寸、形状和辐射波形之间的联系,并提出用空时方向图予以表示,得出了改变口径面的形状和大小可改变辐射特性的结论.

1 口径辐射的分析计算

本文所讨论的模型是无限大金属板上的口径,如图 1 所示,其中带撇的项表示在口径上,而不带撇的项表示不在口径上,以下同.

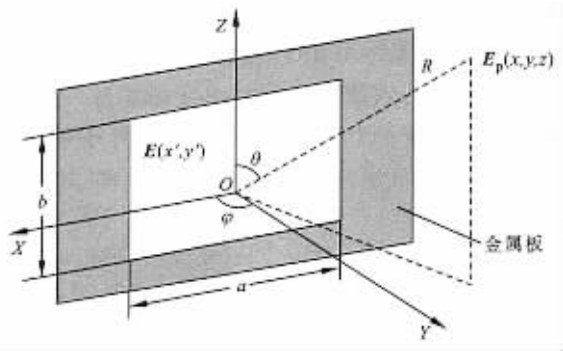


图 1 用 FDTD 方法计算口径场及其辐射场时的计算模型

取口径面为 XOZ 平面, Y 垂直口径面,坐标原点位于口径中心,投射波自 $Y < 0$ 一侧投射于口径,激励电场 E 的极化方向取 Z 向,其中柱面波的传播方向平行于 Y 轴. 采用 FDTD 方法分析 $Y > 0$ 空间的辐射场. 为节省计算机资源,在由 FDTD 方法计算口径附近场时,籍 Huygen 的等效原理作近远场变换. 计算时不采用远区近似,应用文献^[3]的计算方法,可得辐射电场为

$$E = \frac{-1}{4\pi} \iint_{s'} (\mathbf{M}_s(r') \times \mathbf{r}) \left(jq + \frac{1}{R} \right) \frac{e^{-jqR}}{R} ds' \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}_s(r')$ 为口径处的磁流,是口径处的切向电场 E_a 的 2 倍; ds' 为口径上的面元; s' 为口径面积; j 为虚部符号; q 为波数; $\mathbf{r} = \frac{\mathbf{R}}{R}$ 为单位矢量,其中 $R = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2]^{1/2}$ 为观察点到口径上的任意一点的观察距离.

利用 FDTD 方法中的时间和空间的网格离散方法,即 $t \cong i\Delta t, x \cong i\Delta x, y \cong j\Delta y, z \cong k\Delta z, R \cong \Delta z R_{\Delta z}, \Delta t = \frac{\Delta z}{2c_0}$ (其中 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为 x, y, z 坐标方向网格的空间步长, Δt 为时间步长, $R_{\Delta z}$ 为 R 在 z 坐标方向的空间步长个数, c_0 为光速),可得口径处的切向电场为

$$E_a(x', z', n - R/c_0) \cong E_a(i', k', n - 2R_{\Delta z})$$

因为口径场是由 Z 方向极化且传播方向为 Y 方向的投射波所激励,这里只考虑 XOY 平面(H 面)及 ZOY(E 面)平面,而场的特性在 E 面只有 E_z 分量,故离散化后的辐射电场为

$$E_z^n(i, j, k) = \frac{1}{\pi} \sum_{i'} \sum_{k'} r_y \left[\frac{G_a^n(i', k', n - 2R_{\Delta z})}{R_{\Delta z}} + \frac{E_a^n(i', k', n - 2R_{\Delta z})}{2R_{\Delta z}^2} \right] \quad (2)$$

式中: $G_a^n(i', k', n - 2R_{\Delta z}) = E_a^n(i', k', n - 2R_{\Delta z}) - E_a^n(i', k', n - 1 - 2R_{\Delta z})$ 为相邻时刻电场的差.

在 H 面则除 E_z 分量外尚有 E_y 分量,其表达式为

$$E_y^n(i, j, k) = \frac{1}{\pi} \sum_{i'} \sum_{k'} r_z \left[\frac{G_a^n(i', k', n - 2R_{\Delta z})}{R_{\Delta z}} + \frac{E_a^n(i', k', n - 2R_{\Delta z})}{2R_{\Delta z}^2} \right] \quad (3)$$

当波投射于口径面时,口径面除有 E_z 分量外尚有 E_y 分量,但与 E_z 分量相比, E_y 分量甚小,且其值对远区两主平面的影响远小于 E_z 的影响,故可不予考虑. 以下用算例给出方形、圆形和矩形口径的辐射特性.

2 口径辐射场的特性

本文应用 FDTD 方法时采用正交均匀网格,计算空间为 $60 \times 60 \times 60$ 个网格,网格步长取为 2 cm,激励源为高斯脉冲,将幅值降为脉冲峰值的 10% 时定为脉冲宽度,其值为 0.8 ns,而激励脉冲在自由空间展布的宽度为 12 个网格,吸收边界采用 Mur 吸

收边界条件. 口径的形状取为方形和矩形, 其中方形口径尺寸取为 9×9 (表示为 $a\times b$, 其中 a, b 表示口径的尺寸, 见图 1) 网格和 16×16 网格; 矩形口径的尺寸为 8×18 和 18×8 个网格. 计算距离口径面为 300 个网格处的 E 面和 H 面的辐射场.

图 2 及图 3 是平面波或柱面波投射到不同尺寸的方形口径时, 在相同观察方向处辐射的 E 面空时方向图. 电场的幅值为时间和空间的函数, 其中 X 轴表示时间, 为坐标轴所显示的时间步数 n 与时间步长 Δt 的乘积, 而时间步长可根据 FDTD 方法由空间步长得到. Y 轴显示的是 E 面的角度的变化 $\theta=(n-1)\times 5$, 其中 n 为坐标轴所显示的数据, 其有效数据区域为 $1\sim 37$, 故 θ 的变化范围为 $0^\circ\sim 180^\circ$ (研究的模型决定了研究的是半无限大空间的场), Z 轴显示的是在特定的时间和在 E 面特定的角度下辐射的电场在 Z 向的幅值.

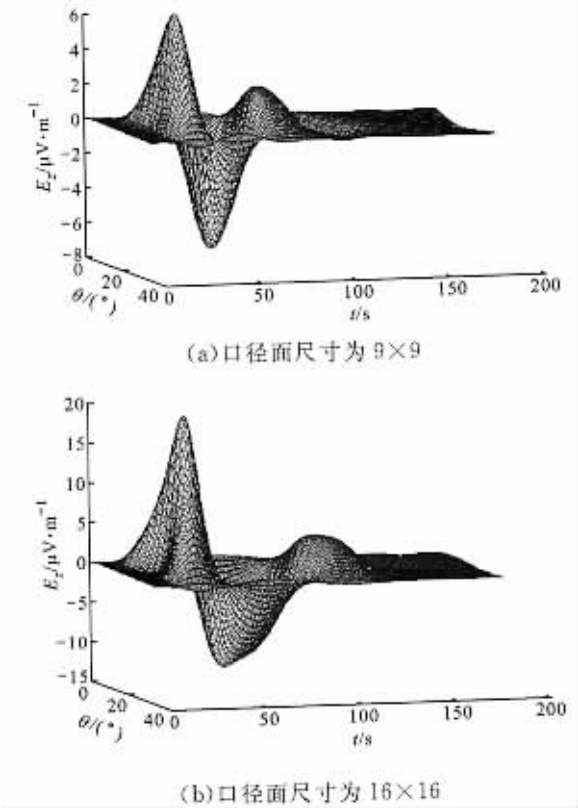


图 2 柱面波照射在方口径时的 E 面空时方向图

由图 2 及图 3 可见, 与平面波的正投射即假设口径面的场是同相位分布(借用窄带情况下的术语, 以下同)的情况相比, 在柱面波照射口径即在口径面的场的相位分布是平方率相移时, 随着口径面积的增大, 口径辐射波形有较大的幅度和较好的方向性, 但波形的持续时间也延长了. 同时, 第 2 个脉冲的宽度大于第 1 个脉冲的宽度, 且在大口径即口径尺寸

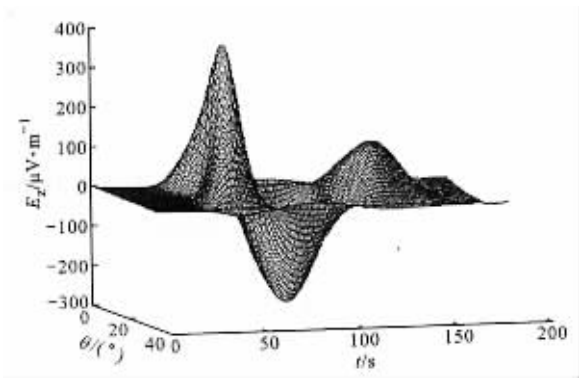


图 3 平面波正投射于方口径(16×16)时的 E 面空时方向图

大于激励脉冲在自由空间展布的宽度时(见图 2b), 第 2 个脉冲的辐射波形发生扭曲, 但在口径尺寸小于激励脉冲在自由空间展布的宽度时(见图 2a)扭曲的现象并不明显. 在 H 面的辐射波形也有相同的现象.

图 4 及图 5 是平面波正投射或斜投射到不同尺寸的矩形口径时, 在相同观察方向处的 E 面的空时方向图. 与平面波正投射相比, 在平面波斜投射到口径上即在口径场的相位分布为直线率相移时, 口径尺寸为 18×8 (矩形口径的窄边与极化方向一致) 时口径辐射场的辐射幅度和辐射脉冲持续时间大于口径尺寸为 8×18 (矩形口径的宽边与极化方向一致) 时的情况. 同时亦可看出, 在极化方向与口径的宽边一致(矩形尺寸为 8×18 时)且宽边尺寸大于激励脉冲在自由空间展布的宽度时, 在 E 面最大电场的方向将偏离 Y 轴($\theta=90^\circ$) 的方向(见图 5a). 在口径窄边与极化方向一致或口径尺寸小于激励脉冲在自由空间展布的宽度时(见图 5b), 此现象并不明显. 在 H 面的辐射波形并没有电场最大值偏离主轴方向的现象出现.

3 结 论

根据以上讨论可见, 无论是柱面波投射还是平

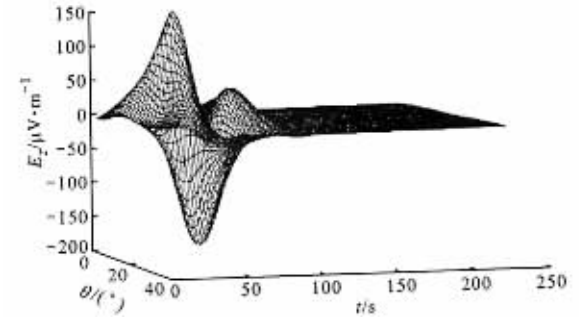


图 4 平面波正投射在矩形口径(8×18)上时 E 面的空时方向图

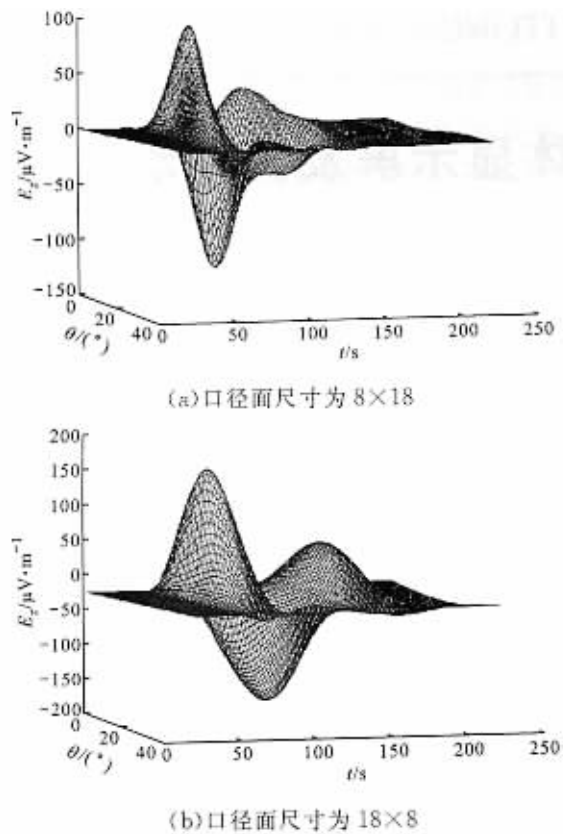


图5 平面波斜投射在矩形口径上时 E 面的空时方向图

面波正投射时,都有随着口径面积的增大辐射场的峰值变大,方向性变好,但波形变宽的特性.在柱面波投射时,第2个脉冲波形的宽度大于第1个脉冲波形的宽度.同时,在口径尺寸大于激励脉冲在自由空间展布的宽度时,第2个波形有明显的畸变,这是

由于中心场产生的辐射与边缘场产生的辐射时延增大造成的.在平面波斜投射于相同面积的矩形口径时,如口径的宽边与极化方向一致,则在 E 面最大方向将偏离主轴方向,而在 H 面并无此现象.在口径窄边与极化方向一致或口径尺寸小于激励脉冲在自由空间展布的宽度时,此现象并不明显.同时亦可看出,对相同面积的矩形口径而言,若矩形口径的窄边与极化方向一致,则该口径辐射场的辐射幅度与辐射脉冲的持续时间大于矩形口径的宽边与极化方向一致时的辐射情况.由此还可得出结论,改变口径面的形状和大小可改变辐射特性.

参考文献:

- [1] 汪文秉.瞬态电磁场 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1991.
- [2] Baum C E. Radiation of impulse-like transient field [R]. Sensor and Simulation Notes, Note 321. New Mexico, USA: Air force Weapons Laboratory, 1989.
- [3] Sullivan D, Young J L. Far-field time-domain calculation from aperture radiators using the FDTD method [J]. IEEE Trans on AP, 2001, 49(3): 464~469.
- [4] 王向晖,蒋延生,汪文秉.超宽带天线口径辐射效应的时域研究 [J]. 现代雷达, 2003, 25(9): 38~41.
- [5] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Trans on AP, 1966, 14(5): 302~307.

(编辑 刘 杨)

(上接第 139 页)

- [2] ITU-T Rec. H. 264/ISO/IEC 11496-10(2002), Advanced Video Coding [S].
- [3] Li R, Zeng B, Liou M L. A new three-step search algorithm for block motion estimation [J]. IEEE Trans Circuits Systems for Video Technology, 1994, 4(4): 438~442.
- [4] Po M L, Ma C W. A novel four-step search algorithm for fast block motion estimation [J]. IEEE Trans Circuits Systems for Video Technology, 1996, 6(6): 313~317.
- [5] Jain J, Jain A. Displacement measurement and its application in interframe imger coding [J]. IEEE Trans Communication, 1981, 29(12): 1 799~1 808.
- [6] Liu L K, Feig E. A block-based gradient descent search algorithm for block motion estimation in video

coding [J]. IEEE Trans Circuits Systems for Video Technology, 1996, 6(8): 419~423.

- [7] Ghanbari M. The cross-search algorithm for motion estimation [J]. IEEE Trans Communication, 1990, 38(7): 950~953.
- [8] Zhu S, Ma K K. A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation [J]. IEEE Trans Image Processing, 2000, 9(2): 287~290.
- [9] Tham Y J, Ranganath S, Ranganath M, et al. Anovel unrestricted center-biased diamond search algorithm for block motion estimation [J]. IEEE Trans Circuits Systems for Video Technology, 1998, 8(8): 369~377.

(编辑 刘 杨)

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>