

文章编号:1006-1630(2009)02-0019-03

口径天线远场时域分析

苏文然,张晨新,王光明

(空军工程大学导弹学院,陕西 三原 713800)

摘要:根据惠更斯等效原理,用直接时域法,基于远场近似推导了口径天线瞬态远场时域解析表达式,给出了主、偏轴方向远场辐射特性。分析和数值计算结果表明:所得远场公式简单,计算正确、可靠,可用于口径天线的设计和测量。

关键词:口径天线;解析表达式;时域;远场;惠更斯等效原理

中图分类号:TN820 **文献标识码:**A

Analysis on Far-Zone Field of Aperture Antennas in Time Domain

SU Wen-ran, ZHANG Chen-xin, WANG Guang-ming

(The Missile Institute of Air Force Engineering University, Sanyuan Shaanxi 713800, China)

Abstract: According to the Hugens equivalent principle, the analytical expressions of transient far-zone field radiation for aperture antennas were derived using the method of the direct time domain based on far-zone field approximation in this paper. The radiation features of the main and offset axis were given out. The analysis and numerical results showed that the formulae of the far-zone field were simple and the computation was correct and reliable, which could be used in the design and measurement for the aperture antennas.

Keywords: Aperture antennas; Analytical expressions; Time domain; Far-zone field; Hugens equivalent principle

0 引言

随着通信技术的发展,超宽带已成为关注的焦点。作为通信设备发射和接收的前端,天线成为制约超宽带技术发展的要素之一。口径天线因其方向性强、辐射效率高和带宽大等优点,已广泛用于目标探测和微波测量等领域。口径辐射的时域特性为时域天线的设计提供了依据,超宽带天线设计的关键是高效、小畸变信号辐射的实现^[1]。

口径辐射的直接时域分析方法主要有解析法和数值法两种。20世纪60年代YEE提出的时域有限差分法(FDTD),因其原理清晰、实现简单,广泛用于口径辐射的瞬态特性分析^[2]。用解析法可得口径辐射时域特性的显式,其结果的物理意义更明显,但所需求解技巧要求较高。1989年,BAUM通过

对口径面赋值提出了脉冲天线主轴上辐射场的时域积分表达式,给出了脉冲口径天线辐射场的时域表达式,并初步分析了阶跃脉冲激励口径的辐射特性,建立了口径天线分析的理论基础,但拉氏变换后的计算对相位采用的一阶近似在求逆变换时并不成立。

本文将口径天线的瞬态辐射模型视为一空时系统(由远区观察点和口径面组成),根据惠更斯等效原理对口径辐射的瞬态特性进行时域解析分析。

1 理论推导

本文讨论无限大金属板上的圆口径,如图1所示。设口径面为平面 xoy , oz 轴垂直于口径面,坐标原点 o 位于口径面中心, θ 为矢量 r 与 oz 轴的夹角, φ 为 r 在平面 xoy 内投影与 ox 轴的夹角。设口径面上加载的磁流

$$M_r(r', t) = \begin{cases} e_x M(r', t) \delta(z) & r' \leq r_0; \\ 0 & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: e_x 为指向 x 的单位矢量; $\delta(z)$ 为狄拉克函数;

收稿日期:2007-06-11;修回日期:2007-09-12

作者简介:苏文然(1983—),男,硕士生,主要从事电磁散射与辐射以及天线瞬态测量等研究。

r' 为口径面上的任意点; r 为 $z>0$ 空间中的任意点;
 r_0 为圆口径的半径; M 为口径面上的磁流分布函
数; t 为时间。其中,撇号项表示在口径上,无撇号
项表示不在口径上。

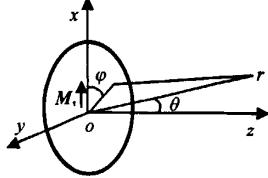


图1 口径天线的瞬态辐射模型

Fig. 1 Transient far-zone field radiation for aperture antenna

根据电磁理论, M 在 r 处所产生的电矢量位

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \frac{\epsilon}{4\pi} \iint_A \frac{M_s(r', t - R/c)}{R} dx' dy'. \quad (2)$$

式中: ϵ 为真空介电常数; c 为真空光速; \mathbf{r} 为场点矢量; R 为场点与源点的距离, 且 $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$; $t - R/c$ 为延迟时间; A 为场源的分布范围。式(2)表明, t 时刻 \mathbf{r} 处的场完全取决于 $t - R/c$ 时刻 \mathbf{r}' 的源分布, 存在一由于电磁波传播产生的时间滞后量, 称为滞后位解。

研究天线辐射时, 主要分析远场。对 R 作泰勒级数展开

$$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = r - \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{r}' + \frac{1}{2} \frac{r'^2}{r} [1 - (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{e}_r)^2] + \dots. \quad (3)$$

式中: $r = |\mathbf{r}|$; \mathbf{e}_r 为指向 \mathbf{r} 的单位矢量; $\mathbf{e}_{r'}$ 为指向 \mathbf{r}' 的单位矢量^[3]。当场点位于远区, 即 $r \gg r_0$ 时, 式(3)可近似取前两项

$$R \approx r - \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{r}' = r - (x' \sin \theta \cos \varphi + y' \sin \theta \sin \varphi). \quad (4)$$

将式(4)代入式(2), 并取 R 为式(4)的第一项, 则式(2)可改写为

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \frac{\epsilon}{4\pi r} \iint_A \mathbf{e}_r M\left(r', t - \frac{r}{c} + \frac{x' \sin \theta \cos \varphi + y' \sin \theta \sin \varphi}{c}\right) dx' dy'. \quad (5)$$

由电磁基本理论, 可得电场

$$\mathbf{E}_{\text{rad}}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{\epsilon} (\nabla F(\mathbf{r}, t)) \times \mathbf{e}_x. \quad (6)$$

式中: ∇ 为哈密顿算符。

在远场, 忽略 $(1/r)^2$ 和更高次项, 有

$$\nabla F(\mathbf{r}, t) \approx -\mathbf{e}_r \frac{\epsilon}{4\pi r c} \frac{d}{dt} \iint_A M\left(r', t - \frac{r}{c} + \frac{x' \sin \theta \cos \varphi + y' \sin \theta \sin \varphi}{c}\right) dx' dy'. \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 可得

$$\mathbf{E}_{\text{rad}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi r c} (\mathbf{e}_\varphi \cos \theta \cos \varphi + \mathbf{e}_\theta \sin \varphi) \times \frac{d}{dt} \iint_A M\left(r', t - \frac{r}{c} + \frac{x' \sin \theta \cos \varphi + y' \sin \theta \sin \varphi}{c}\right) dx' dy'. \quad (8)$$

式中: $\mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_\theta$ 分别为 φ, θ 向的单位矢量。为简化问题, 引入限制条件 $M(x', y', t) = M(x', y') f(t)$ 。此处: $f(t)$ 为激励脉冲信号。即讨论的场在 $z=0$ 平面上为同步, 从馈源至口径上不同点的时间差须小于极窄脉冲的上升时间, 同时取 $f(t)$ 为单位阶跃函数 $u(t)$ 。则式(8)可变为

$$\mathbf{E}_{\text{rad}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi r c} (\mathbf{e}_\varphi \cos \theta \cos \varphi + \mathbf{e}_\theta \sin \varphi) \times \frac{d}{dt} \iint_A M(x', y') u\left(t - \frac{r}{c} + \frac{x' \sin \theta \cos \varphi + y' \sin \theta \sin \varphi}{c}\right) dx' dy'. \quad (9)$$

1.1 主轴向远场辐射特性

当场点处在 oz 轴上(即 $\theta=0$)时, 式(9)可变为

$$\mathbf{E}_{\text{rad}}^{\text{bs}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi r c} (\mathbf{e}_\varphi \cos \varphi + \mathbf{e}_\theta \sin \varphi) \times \frac{d}{dt} \iint_A M(x', y') u\left(t - \frac{r}{c}\right) dx' dy' = \frac{\mathbf{e}_y}{4\pi r c} \frac{d}{dt} u\left(t - \frac{r}{c}\right) \iint_A M(x', y') dx' dy' = \frac{\mathbf{e}_y}{4\pi r c} \delta\left(t - \frac{r}{c}\right) \iint_A M(x', y') dx' dy'. \quad (10)$$

式中: 上标 bs 表示观察点在主轴上; \mathbf{e}_y 为 y 向单位矢量。由 δ 函数性质可知: 仅在时刻 $t = r/c$, $\mathbf{E}_{\text{rad}}^{\text{bs}}(\mathbf{r}, t)$ 不为零, 即

$$r = c t. \quad (11)$$

这相当于只有处于以球心为点 r 、半径为 ct 球面上的源分布对点 \mathbf{r} 时刻 t 的场才有作用。在主轴方向, 口径天线的远区场正比于激励信号的时间导数, 比例因子

$$k = \frac{1}{4\pi r c} \iint_A M(x', y') dx' dy'. \quad (12)$$

1.2 偏轴向远场辐射特性

偏轴方向讨论了平面 xoz (H面)、 yoz (E面)的场。当 $\varphi=0$ (H面)时,电场仅有分量 e_θ 。令 t' 为口径中心至观察点的时间延迟,即 $t'=t-r/c$,则式(9)可写为

$$\begin{aligned} E_{\text{rad}}^H(r, \theta, t) &= \frac{\cos \theta}{4\pi r c} \frac{d}{dt} \iint_A M(x', y') dx' dy' = \\ &= \frac{\cos \theta}{4\pi r c} \frac{d}{dt} \iint_A M(x', y') u\left(t' + \frac{x' \sin \theta}{c}\right) dx' dy' = \\ &= \frac{\cos \theta}{4\pi r c} \iint_A M(x', y') \delta\left(t' + \frac{x' \sin \theta}{c}\right) dx' dy'. \quad (13) \end{aligned}$$

由 δ 函数的尺度变换和取样性质,式(13)可变为

$$E_{\text{rad}}^H(r, \theta, t) = \frac{\cot \theta}{4\pi r} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} M\left(-\frac{c t'}{\sin \theta}, y'\right) dy'. \quad (14)$$

式中: y_{\max} , y_{\min} 分别为圆口径面上 x' 处水平方向的最大和最小值。

同理,当 $\varphi=\pi/2$ (E面)时,即,此时电场分量仅有分量 e_θ ,式(9)可写为

$$E_{\text{rad}}^E(r, \theta, t) = \frac{1}{4\pi r \sin \theta} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} M\left(x', -\frac{c t'}{\sin \theta}\right) dx'. \quad (15)$$

式中: x_{\max} , x_{\min} 分别为圆口径面上 y' 处垂直方向的最大和最小值。

由式(14)、(15)可知:在偏轴方向,圆口径的远区瞬态辐射场与激励信号的时间导数已不再为线性关系,而与 θ 相关,会导致波形失真。

1.3 一致性证明

为验证偏轴和主轴方向结果的一致性,当 $\theta \rightarrow 0$ 时,分别对式(14)、(15)求极限,有

$$\begin{aligned} \lim_{\theta \rightarrow 0} E_{\text{rad}}^E(r, \theta, t) &= \\ &= \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\cot \theta}{4\pi r} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} M\left(-\frac{c t'}{\sin \theta}, y'\right) dy' = \\ &= \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\cot \theta}{4\pi r c} \iint_A M(x', y') \delta\left(t' + \frac{x' \sin \theta}{c}\right) dx' dy' = \\ &= \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\cot \theta}{4\pi r c} \lim_{\theta \rightarrow 0} \iint_A M(x', y') \delta\left(t' + \frac{x' \sin \theta}{c}\right) dx' dy' = \\ &= \frac{1}{4\pi r c} \delta\left(t - \frac{r}{c}\right) \iint_A M(x', y') dx' dy' = \\ &= E_{\text{rad}}^{\text{bs}}(r, t). \quad (16) \end{aligned}$$

同理可得

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} E_{\text{rad}}^E(r, \theta, t) = E_{\text{rad}}^{\text{bs}}(r, t). \quad (17)$$

综上,式(10)、(14)、(15)的激励函数均为单位阶跃函数,即为口径天线的阶跃响应。若令阶跃响应为 $g(t)$,冲激响应 $h(t)$,激励信号为任一瞬态信号 $f(t)$,由系统阶跃响应与冲激响应的关系及卷积积分的性质可得

$$h(t) = g'(t); \quad (18)$$

$$\begin{aligned} h(t) * f(t) &= g'(t) * f(t) = \\ &= g(t) * f'(t). \quad (19) \end{aligned}$$

因此,欲求任一信号激励下口径天线的远场瞬态辐射特性时,只需将该激励信号的时间导数分别与式(10)、(14)、(15)进行卷积即可^[4]。

2 验证

为验证分析的正确性,用 Matlab 软件进行模拟计算。取 $M(x', y') = M_0 \cos(\pi y'/(2r_0))$,即所加载的激励源沿 y 轴成余弦分布。此处: M_0 为幅值。为方便计算,取 $M_0 = 1$,激励信号采用单位阶跃函数,辐射模型为半径 $r_0 = 1$ m 的圆口径,观察点位于距口径中心 60 m 处。偏轴角 θ 分别为 $3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ 时,半径 1 m 圆口径天线远场时域波形的仿真结果如图 2 所示。图中:脉冲幅值为与主轴上 60 m 处的场归一化值。不同 θ 的脉冲幅值如图 3 所示。

由图 2 可知:时域波形幅值随 θ 增大而明显下

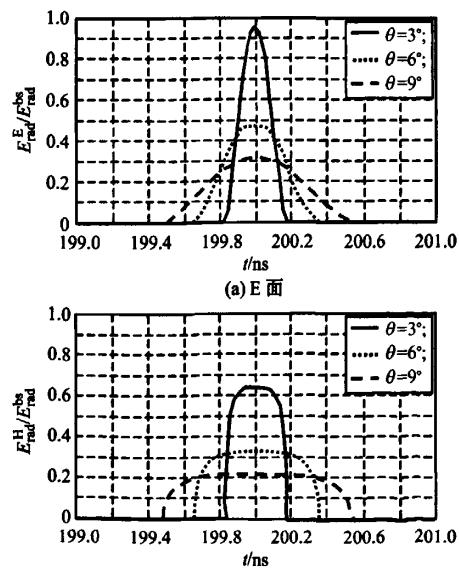


Fig. 2 Time domain of far-zone field of round aperture antenna

(下转第 44 页)

初始时刻 RBF 网络不能精确辨识卫星的姿态角,但控制器仍能控制卫星的姿态角较快趋于零。因根据经验设计了 FNN 规则参数 w_i 的初值,加快了 FNN 在线学习速度,缩短了学习时间。这样,设计的模糊神经网络控制系统具有智能性、容错性和自适应性。但所设计的 RBF 网络在辨识卫星三轴姿态角时,每获得一个在线新数据对都要重新对所有的数据对再作辨识以更新 RBF 网络的权值,会影响在实际系统中的应用。

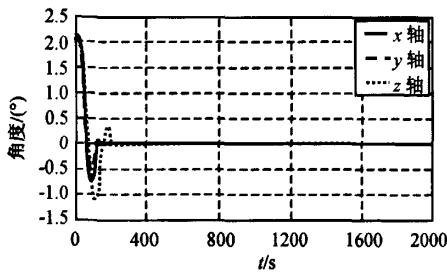


图 10 模糊神经网络控制卫星姿态角

Fig. 10 Satellite attitude angle with fuzzy neural network control

4 结束语

本文将基于 RBF 网络辨识的模糊神经网络控

(上接第 21 页)

降,持续时间显著增加,致使时域波形畸化。其中, H 面畸变较 E 面更严重。当 θ 趋于 0 时, E、H 面的时域波形趋近于冲激脉冲,验证了式(16)、(17)结果的正确。显然,主轴方向口径天线上的远区场正比于激励函数的时间导数。

由图 3 可知:当 θ 较小时, E、H 面脉冲幅值下降均较明显,其中 H 面更剧烈。随着 θ 的增大,幅值变化趋于平缓。本文分析结果与文献[5]利用时域有限差分法获得的结论十分吻合。

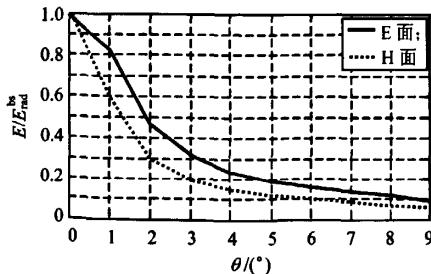


图 3 不同 θ 的脉冲幅值

Fig. 3 Pulse amplitude under different θ

制引入挠性卫星的姿态控制。结果表明,与 PID 控制相比,基于 RBF 网络辨识的模糊神经网络控制器反应速度快、控制精度高,且对卫星的参数变化不敏感,能有效克服卫星的挠性。同时该控制算法无需被控对象的数学模型,能较快进行在线学习,对卫星的不确定性具较强的鲁棒性。本文方法具有一定的实用性和研究价值。

参考文献

- [1] 乔溪荣, 李宝缓. 模糊神经网络控制器及其在航天器姿态控制系统中的应用研究[J]. 航天控制, 1998, 16(1): 12-18.
- [2] WISINE W R, BLANKE M. Fully magnetic attitude control for spacecraft subject to gravity gradient[J]. Automatica, 1999, 7(35): 1201-1214.
- [3] WISINE W R, MARKLY L M. Optimal magnetic attitude control in proc[C]// IFAC World Congers. Beijing, IFAC, 1999: 1-6.
- [4] ORETGA G. Fuzzy logic for spacecraft control[C]// Proc. Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Noordwijk: ESA, 1999: 471-476.
- [5] 管萍, 刘星桥, 陈家斌. 卫星姿态再励学习的模糊神经控制[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(3): 313-316.

3 结束语

本文根据惠更斯等效原理,用直接时域法推导了口径天线远场的时域解析表达式。所得表达式清晰简洁,物理意义明确。仿真结果证明计算结果正确、可靠。因文中理论推导时采用了远场近似条件,故所得公式不适于近场计算,存在一定的局限性。

参考文献

- [1] 汪文炳. 瞬态电磁场[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [2] 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.
- [3] SHLIVINSKI A, HEYMAN E, KASTNER R. Antenna characterization in the time domain[J]. IEEE Trans. on Antenna and Propagation, 1997, 45(7): 1140-1149.
- [4] 王向晖, 蒋延生, 汪文秉, 等. 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.

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,一直致力于专注于微波、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>