

等角螺线天线的时域有限差分分析¹

李太全 田茂 吴庆麟 徐继生

武汉大学电子信息学院 430072 E-mail:mttn@whu.edu.cn

摘要 本文采用时域有限差分算法，分析了等角螺线天线的电流分布、驻波特性。并采用近场-远场变换方法，计算了天线的方向图以及在间断正弦波激励下，天线的远区辐射场的瞬态特性。并分析了此天线用于间断谐波探地雷达的优势及其改进的方向。

关键词 时域有限差分算法；方向图；瞬态特性

等角螺线天线由于其低剖面的几何结构和宽频带、圆极化以及良好的方向特性被广泛的应用于探地雷达、无线电定位等相关场合^[1]。然而，关于此天线的电特性分析，由于其天线臂复杂的几何形状以及随之而产生的多模特性，存在一定的困难，一些天线的参数还得借助于经验的方法确定。时域有限差分算法现已成为电磁场数值计算的重要方法^[2]，特别是在时域电磁场的计算中，它可以给我们提供非常直观的电磁图像。本文采用此方法分析了等角螺线天线的几个问题：(1) 天线臂上的电流分布以及驻波特性；(2) 天线的方向图；(3) 在间断正弦波激励下，天线辐射场的瞬态特性。

1. 天线结构与算法

等角螺线天线的结构如图 1(b) 所示。螺线的一臂由方程 $r = r_0 e^{\alpha\varphi}$ 和 $r = r_0 e^{\alpha(\varphi+\pi/2)}$ 的两线与半径为 R 的圆围成，另一臂将其旋转 180° 而得到。这里我们取 $\alpha = 0.221$ ， $r_0 = 0.0625 \text{ m}$ ，天线的外半径 $R = 0.5 \text{ m}$ ，并将此天线置于 $1.6 \times 1.6 \times 0.2 \text{ m}$ 的反射腔内如图 1(a) 所示。

计算中，我们采用直角坐标系。虽然这样会由于天线边沿的锯齿形导致一定的误差，但却具有较好的稳定性^{[3][4]}。在直角坐标系下，设介质为真空，且用 $\sqrt{\epsilon_0/\mu_0} \mathbf{H}$ 代替麦克斯韦方程中的 \mathbf{H} ，取 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.01 \text{ m}$ ， $\Delta t = \Delta x / 2C$ ，麦克斯韦的旋度方程的差分形式为

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) &= E_x^n(i+1/2, j, k) \\ &\quad + [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k)]/2 \\ &\quad - [H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2)]/2 \quad (1) \\ H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) &= H_x^{n-1/2}(i, j+1/2, k+1/2) \\ &\quad - [E_z(i, j+1/2, k+1) - E_z(i, j+1/2, k)]/2 \\ &\quad + [E_y(i, j+1, k+1/2) - E_y(i, j, k+1/2)]/2 \end{aligned}$$

(1) 式是 x 分量的电场和磁场的方程，表述 y 分量和 z 分量的 E_y, E_z, H_y, H_z 有类似的形式，这组方程构成计算场分布的递推关系。为限定计算区域，在天线辐射的开口面上方，采用 Mur 的吸收边界条件^[2]：

$$(\partial^2 z t + \frac{1}{c} \partial^2 t - \frac{c}{2} \partial^2 x - \frac{c}{2} \partial^2 y) \phi = 0 \quad (z = z_{\max})$$

¹ 国家自然科学基金（编号 50099620）资助项目

$$(\partial_z^2 z t + \frac{1}{c} \partial_t^2 t - \frac{c}{2} \partial_x^2 x) \phi = 0 \quad (z = z_{\max}, y = y_{\min} \text{ or } y_{\max})$$

$$(\partial_z - \frac{1}{c} \partial_t) \phi = 0 \quad (z = z_{\max}, y = y_{\min} \text{ or } y_{\max}, x = x_{\min} \text{ or } x_{\max})$$

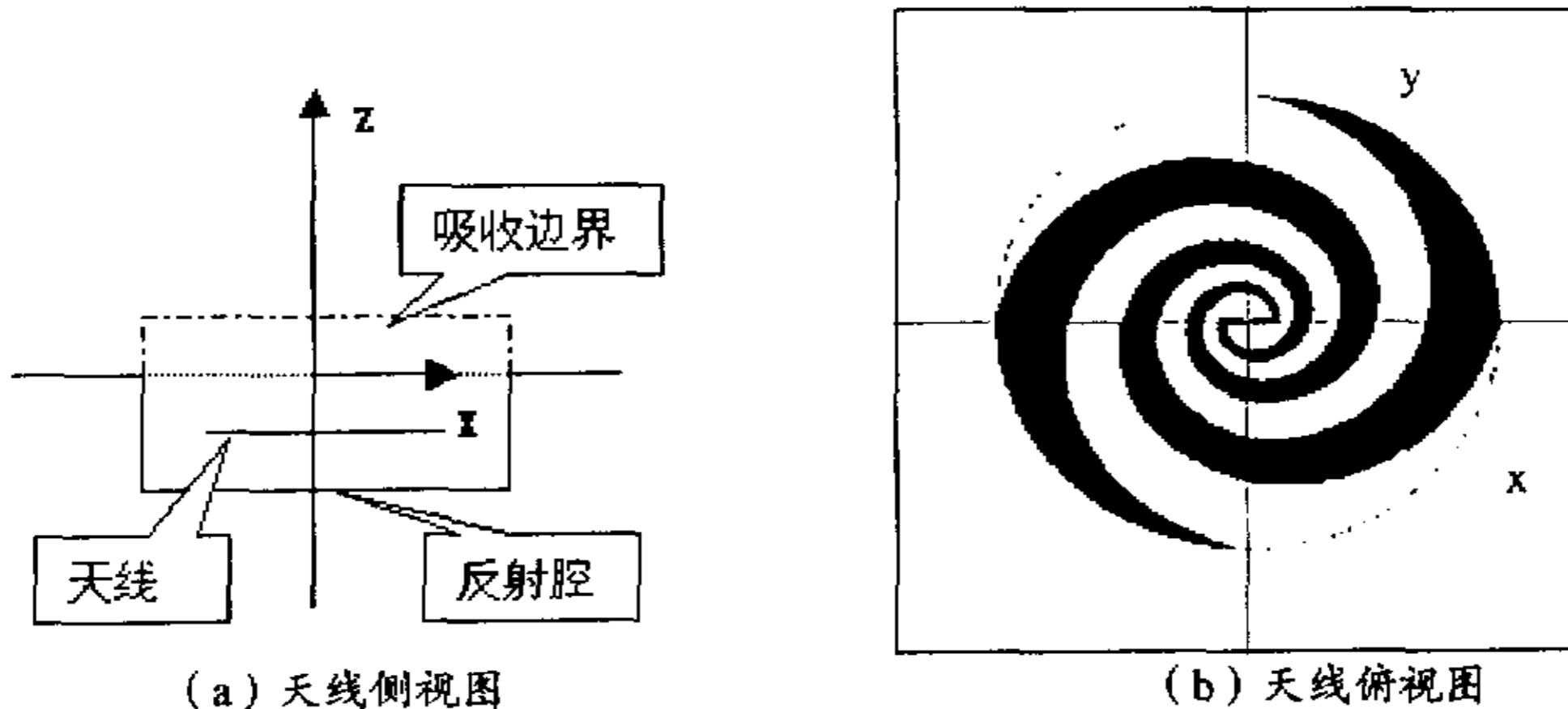


图 1 天线结构示意图

天线的激励采取时谐源 $E_s^n(x_s, y_s, z_s) = \sin(2\pi f n \Delta t)$ 。由于天线中心两臂相距 10 厘米以上，所以采用直线方式沿 X 轴方向从两臂延伸至中心相距一个 Δx 处。激励加在位于天线中心的该间隙处。

为确定天线中的电流分布，由麦克斯韦方程 $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint (\partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{J}) \cdot d\mathbf{S}$ 出发，在垂直于天线臂的横断面内进行积分，由于理想导体表面的切向电场 $\mathbf{E}_t = 0$ ，所以在导体中电流分布为 $\mathbf{J}_t = \hat{n} \times (\mathbf{H}(z = z0^+) - \mathbf{H}(z = z0^-))$ 。用 $\mathbf{H}(i, j, k = k0 + 1/2)$ 近似代替 $\mathbf{H}(z = z0^+)$ 、 $\mathbf{H}(i, j, k = k0 - 1/2)$ 近似代替 $\mathbf{H}(z = z0^-)$ ，而 $J_z = 0$ ，我们得到天线所在面的等效电流分布计算式

$$\begin{aligned} J_x^{n+1/2}(i, j, k0) &= \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cdot [H_y^{n+1/2}(i, j, k0 - 1/2) - H_y^{n+1/2}(i, j, k0 + 1/2)] \\ J_y^{n+1/2}(i, j, k0) &= \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cdot [H_x^{n+1/2}(i, j, k0 + 1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j, k0 - 1/2)] \\ J_z^{n+1/2}(i, j, k0) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中因子 $\sqrt{\epsilon_0 / \mu_0}$ 是由于 (1) 式中 \mathbf{H} 的替代而产生的。

天线的远区辐射场和方向图由等效原理计算。取反射腔的开口面为惠更斯面，根据该面上的电磁场分布计算出惠更斯面的等效电流和磁流分布，远区辐射场可以被认为是该电流和磁流的辐射。惠更斯面的等效电流和磁流分布由等效性原理有

$$\mathbf{J}_s^n(x, y, z) = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cdot \hat{n} \times \mathbf{H}_s^n(x, y, z) \quad \mathbf{M}_s^n(x, y, z) = -\hat{n} \times \mathbf{E}_s^n(x, y, z)$$

在开口面处设有一无限大电壁将空间分为上下两半，在上半空间的辐射场，由位于该壁上侧的等效电流和等效磁流产生。由于等效电流 \mathbf{J}_s 无限接近电壁，其镜像与其自身重叠但方向相反，不向外辐射电磁场，而等效磁流 \mathbf{M}_s 的镜像与它重叠且方向相同，最后得到辐射场^[5]

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -2 \cdot \hat{\mathbf{r}} \times \frac{1}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|c} \frac{\partial}{\partial t'} \mathbf{M}_s(\mathbf{r}', t') ds \Big|_{t'=t-|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|/c}$$

在考虑 $|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| \approx r-r' \cdot \hat{\mathbf{r}}$ 、 $\hat{n}=\hat{z}$ ，且忽略除天线开口面区域外的等效磁流的情况下，远区辐射场为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \approx & \hat{\mathbf{r}} \times \frac{1}{2\pi c} \sum_x \sum_y \left\{ \left[E_x^{t+\Delta t}(x', y', z_s) \hat{y} - E_x^t(x', y', z_s; t') \hat{y} \right] / \Delta t \right. \\ & \left. + \left[E_y^{t+\Delta t}(x', y', z_s) \hat{x} - E_y^t(x', y', z_s; t') \hat{x} \right] / \Delta t \right\} \Big|_{t'=t-|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|/c} \end{aligned} \quad (3)$$

由此，我们可以得到天线的远区辐射场瞬态特性。对时变远区辐射场实施付里叶变换可以得到远场的频域特性，并由此得到天线的方向图。

2. 数值结果与分析

首先，对于频率为 200MHz 的频率点进行时域有限差分分析，计算了在 20 个时间周期内场的变化情况。并根据(2)式计算得到了天线上的电流的分布情况，图 2 是频率为 200MHz， $x=0$ 的断面上电流密度的 y 分量的幅值分布，图中 y 坐标以单元网格 N_y 表示。从图中可见：

1) 天线臂上的电流随着天线的向外延伸，电流密度快速下降，到达最外圈时，电流几乎为 0。用同样的方法，我们计算了 400MHz 时的电流分布，其下降速度更快。2) 天线上的电流主要分布在天线臂的边缘处，中间区域所占的比例较小。

图 3 是在 200MHz 频率源的激励下天线的电流密度幅值分布的灰度等级图。图中为了突出天线末端的电流，灰度等级以对数表示。从图中可以看到天线的外环存在明显的驻波，但内环驻波较弱。但由于电流主要集中在天线的内环，所以，总的来看，天线具有较好的行波特性。但在宽频带范围应用此天线时，低频段需采用相应的措施，以改善天线的行波特性。

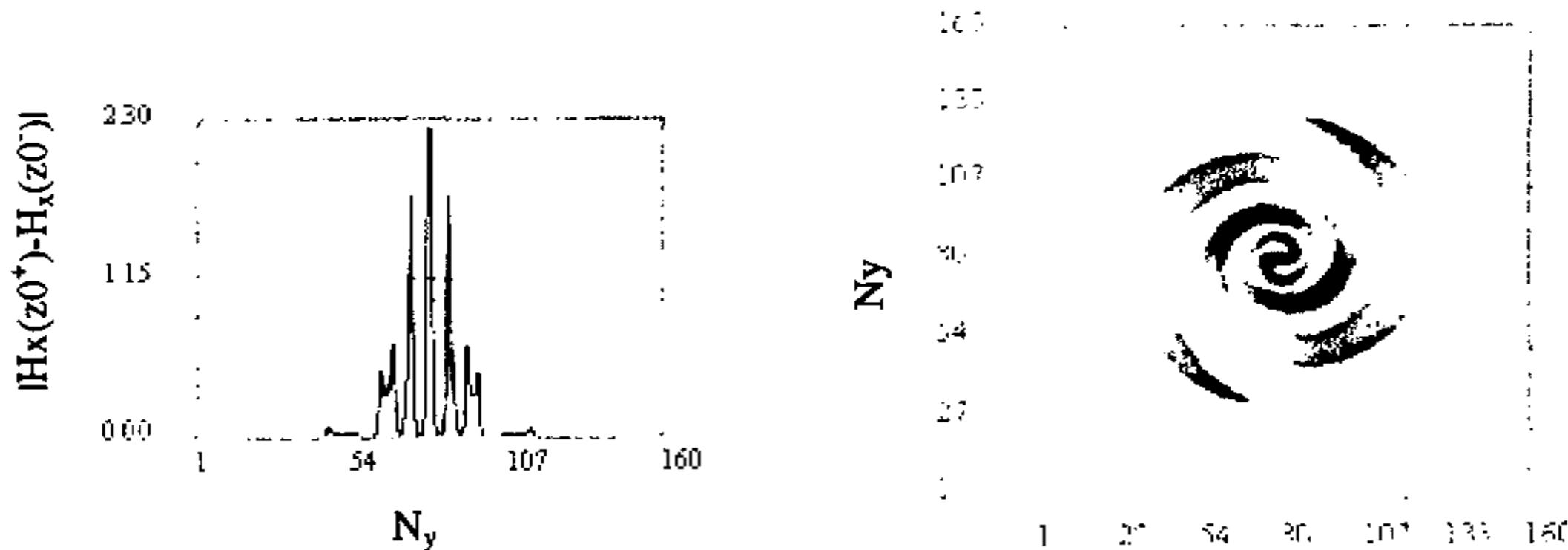


图 (2) 200MHz, $x=0$ 的断面上
电流密度分布

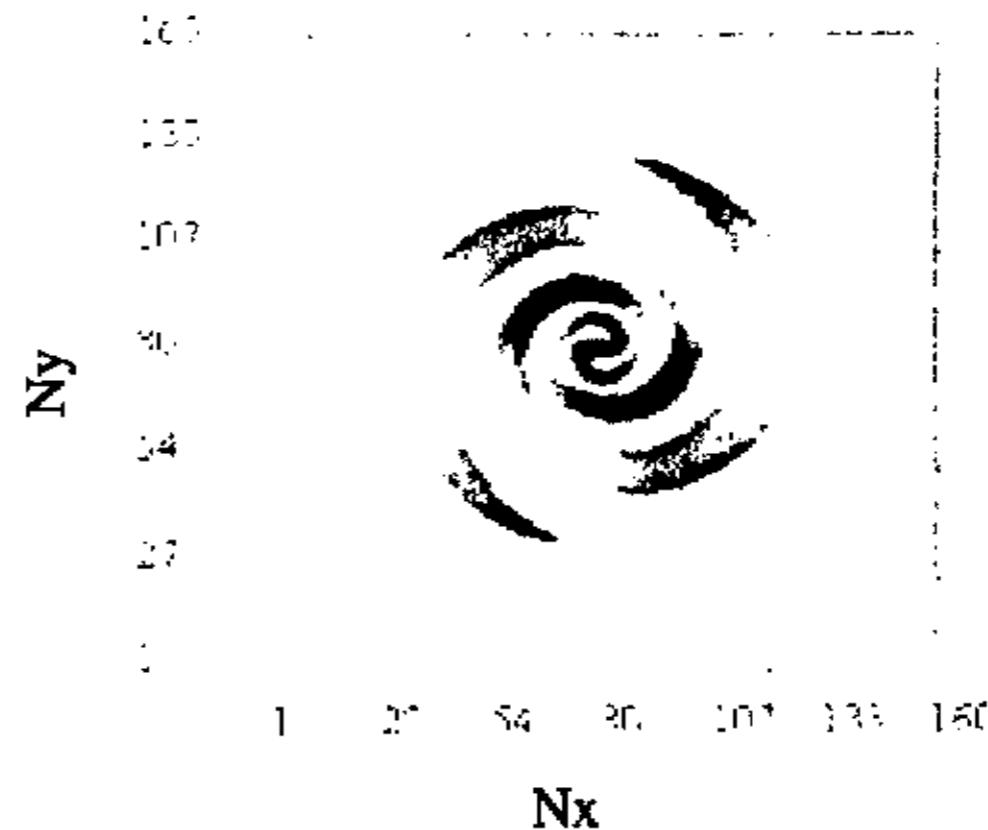


图 3 天线的驻波特性

然后，由(3)式，我们计算了在 200MHz 频率下，天线辐射方向半球面上的电场分布，并由此得到天线的方向图如图(4)所示。图 4 是 φ 角分别为 0 和 90° 的方向图，从图中可见，天线的方向图几乎没有旁瓣，且具有较强的方向性。

最后，我们将激励电压设置为间断正弦脉冲形式，取频率 $f=200MHz$ ，激励持续时间 $T_{on}=50ns$ ，然后关断激励 $T_{off}=50ns$ ，计算得到天线的远区辐射场的瞬态特性如图 5。从图中可见，辐射场存在一定的振铃，但关断后的暂态下降较快，约在 5ns 的时间内，辐射场功率密

度下降 50%以上。

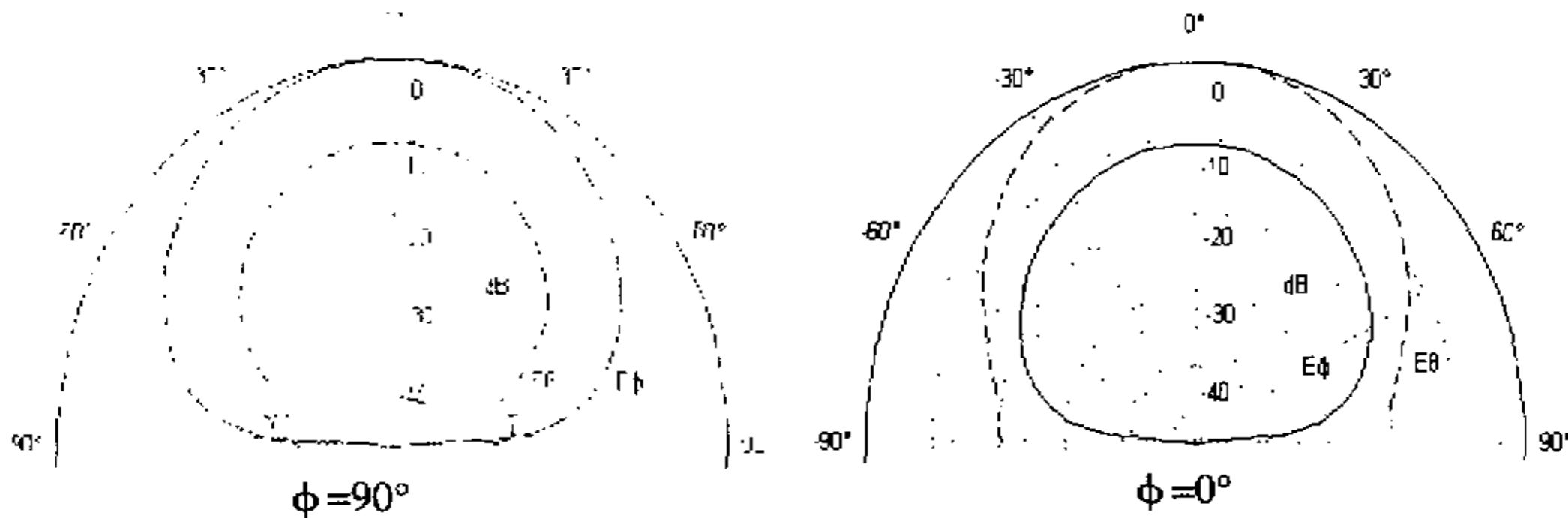


图 4 200MHz 时天线的方向图(实线表示 E_ϕ , 虚线表示 E_θ)

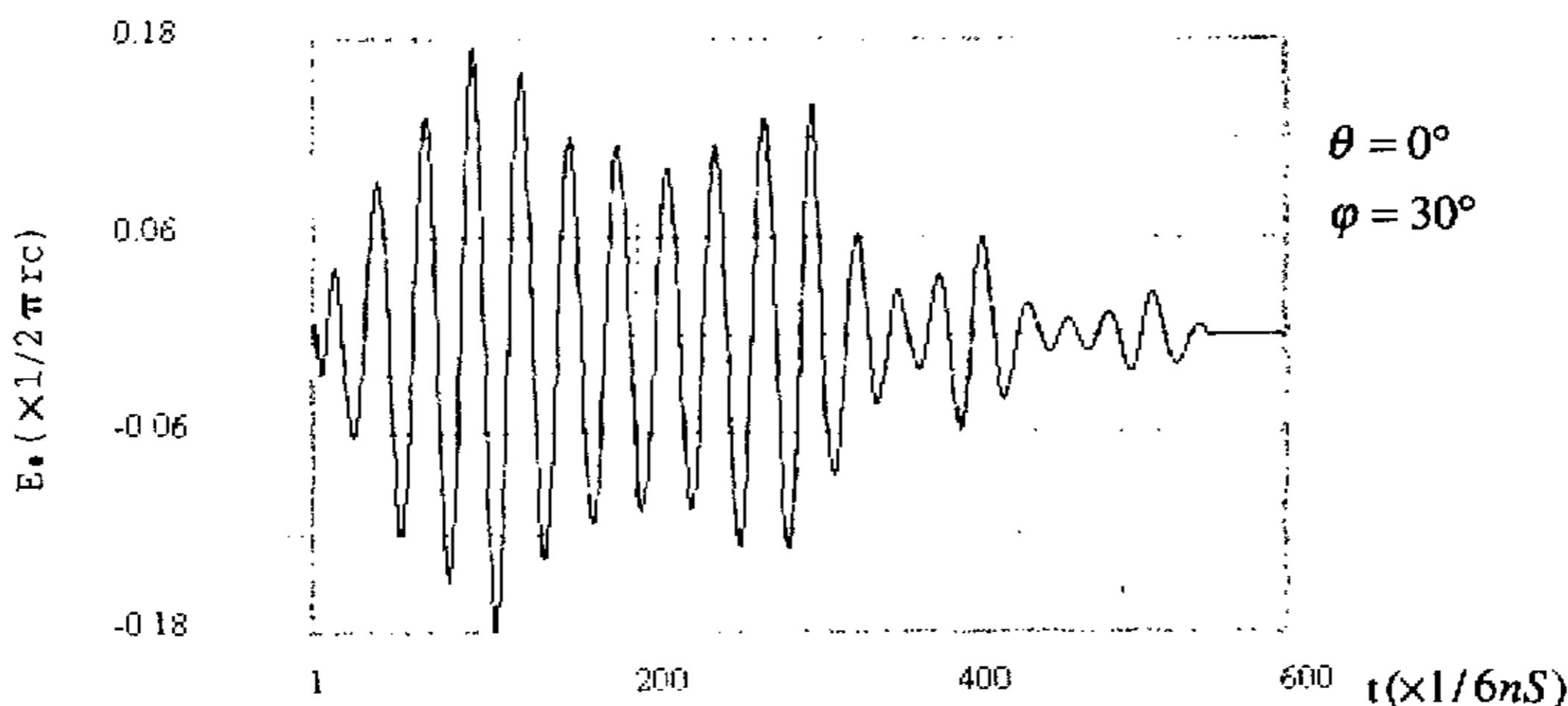


图 5 天线的远区辐射场的瞬态特性

3. 结论

从上面的计算和分析可见, 等角螺线天线具有较好的方向性和行波特性, 且具有快速关断的瞬态特性, 特别适合于作为间断谐波探测雷达的天线。如果对天线采用适当的加载, 将会得到更加优异的性能。

参考文献

- [1] Nathan J.Champagene, "Numerical Modeling of Impedance Loaded Multi_Arm Archimedian Spiral Antennas" IEEE Trans.AP.Vol.40,No.1:102-107,Jan.1992.
 - [2] 高本庆编, 时域有限差分法。国防工业出版社, 1995。
 - [3] Jin-Fa Lee, "Modeling Three-dimensional Discontinuities in Waveguides Using Nonorthogonal FDTD algorithm" IEEE Trans.MTT.Vol.40,No.2:346-352,Feb.1992.
 - [4] Stephen D.Gdney, "Numerical Stability of Nonorthogonal FDTD Methods" IEEE Trans.AP.Vol.48,No.2:231-239,Feb.2000.
 - [5] James G. Maloney, "Accurate Computation of the Radiation from Simple Antennas using the Finite-Difference Time-domain Method" IEEE Trans. AP, Vol.38, No.7: 1059-1069, July 1990.
- 李太全 (1961-), 男, 1992 年在成都电子科技大学获硕士学位, 现在武汉大学电子信息学院攻读博士学位, 主要从事电磁场数值计算、信号处理、数字电路设计等方面的研究。

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>