

文章编号: 1001-4322(2009)04-0595-05

# 介质加载天线阵的瞬态辐射特性\*

陈 宏, 肖开奇, 许建军

(信息综合控制国家重点实验室, 成都 610036)

**摘 要:** 提高天线增益和辐射效率是瞬态天线研究的重要内容之一。通过设定高斯脉冲激励波形, 导出了瞬态辐射的能量阵列因子, 分析了 1 维对称均匀天线阵列的瞬态辐射特性。结果表明: 阵列的辐射波形与观察时间区间和角度有关, 瞬态与稳态特性差异明显, 时域辐射方向图与脉冲宽度有关, 阵列可实现时域波束扫描。设计了介质加载天线阵, 并采用 3 维电磁场分析软件进行了时域仿真计算, 分析了介质加载对天线辐射特性的影响。研究表明: 有介质加载的天线前向辐射电场峰值比没有介质加载的天线增加逾 1 倍, 即瞬态辐射功率增大了 3 倍多, 通过对计算和仿真结果的分析比较, 验证了分析和设计方法的正确性和有效性。

**关键词:** 瞬态辐射; 介质加载; 天线阵; 高斯脉冲

**中图分类号:** TN820.1<sup>+</sup>5 **文献标志码:** A

系统对数据通信传输容量的要求越来越高, 现代通讯设备的频段及频宽也随之不断扩展, 目前相应设备的调制脉冲的前沿及脉宽已达到 ns 甚至 ps 量级。这种超窄脉宽的电磁辐射(瞬态辐射)特性与传统的正弦波辐射(稳态辐射)相比有很大不同, 开展阵列天线的时域瞬态辐射特性分析对于相关技术研究具有积极意义。已有众多学者开展过瞬态辐射特性的理论研究和仿真分析, 如 Harmuth<sup>[1-2]</sup>已进行了针对非正弦波传输和辐射的理论和应用研究, B. Scheers<sup>[3]</sup>和 D. Sullivan<sup>[4]</sup>开展过口径辐射的时域仿真和计算, 而本文则侧重于结合介质加载天线阵开展 1 维线阵瞬态辐射特性的数值仿真分析。

## 1 理论依据

### 1.1 时域脉冲波形

模拟真实的激励波形对于研究天线的瞬态辐射特性来说更加直观, 但会造成过于复杂的表达式和过大的运算量。为简化分析并不失一般性, 本文以单极性高斯脉冲作为时域阵列的辐射波形, 其表达式为

$$f(t) = A \exp[-4\pi(t/T)^2] \tag{1}$$

式中:  $t$  为时间;  $A$  为脉冲幅度;  $T$  为脉冲宽度, 其自相关函数为

$$G(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)f(\tau-t)d\tau = A^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-(\frac{\sqrt{8\pi}}{T}\tau + \frac{\sqrt{8\pi}t}{2T})^2]dt \times \exp(-\frac{2\pi t^2}{T^2}) \tag{2}$$

令  $u = \frac{\sqrt{8\pi}}{T}\tau + \frac{\sqrt{8\pi}t}{2T}$ , 则  $du = \frac{\sqrt{8\pi}}{T}d\tau$ , 利用  $\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-u^2)du = \sqrt{\pi}$ , 可将式(2)简化为

$$G(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)f(\tau-t)d\tau = \frac{A^2 T}{2\sqrt{2}} \exp(-\frac{2\pi t^2}{T^2}) \tag{3}$$

则  $f(t)$  的能量谱分布为<sup>[5]</sup>

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(t) \exp(-j2\pi ft) dt = \frac{A^2 T^2}{4} \exp(-\frac{\pi}{2} T^2 f^2) \tag{4}$$

式中:  $f$  为频率。

典型的时域波形(取  $T=0.5$  ns)及其能量谱分布如图 1 所示。

### 1.2 瞬态辐射的阵列因子

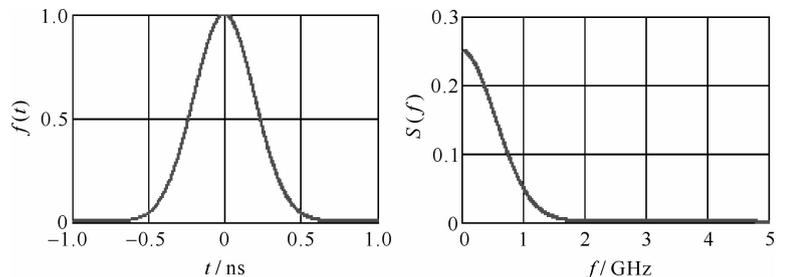


Fig. 1 Time domain waveform and energy spectrum

图 1 时域波形及其能量谱分布

\* 收稿日期: 2008-10-18; 修订日期: 2008-10-31

作者简介: 陈 宏(1977—), 男, 工程师, 从事微波辐射技术研究; swiece@163.com。

假设由全向阵元组成,阵元间距为  $d$ ,阵元数目为  $2m+1$  的均匀线阵如图 2 所示。其中第  $i$  个阵元接收到的信号为

$$v_i(t) = f(t + \tau_i) = A \exp\left[-4\pi\left(\frac{t + \tau_i}{T}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中:  $\tau_i = id \sin\theta / c$ , 其中  $c$  为光速, 则

$$\frac{\tau_i}{T} = \frac{id \sin\theta}{cT} = \frac{i}{2m} \frac{2md}{cT} \sin\theta = \frac{i}{2m} \rho \sin\theta \quad (6)$$

其中, 定义  $\rho = 2md / cT = L / cT$ ;  $L = 2md$ , 是阵列长度。

则阵列接收到信号和为

$$v(t, \theta) = \sum_{i=-m}^m v_i(t) = A \sum_{i=-m}^m \exp\left[-4\pi\left(\frac{t + \tau_i}{T}\right)^2\right] = 2mA \sum_{i=-m}^m \frac{1}{2m} \exp\left[-4\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{i}{2m} \rho \sin\theta\right)^2\right] \quad (7)$$

当  $m \gg 1$  时, 式(7)可用积分式表示。令  $\eta = i/2m$ ,  $d\eta = d(i/2m)$ , 而  $i = \pm m$  时  $\eta = \pm 1/2$ , 则

$$v(t, \theta) = 2mA \int_{-1/2}^{1/2} \exp\left[-4\pi\left(\frac{t}{T} + \rho\eta \sin\theta\right)^2\right] d\eta \quad (8)$$

$t=0$  时刻,  $v(t, \theta)$  有最大峰值

$$v(0, \theta) = 2mA \int_{-1/2}^{1/2} \exp\left[-4\pi(\rho\eta \sin\theta)^2\right] d\eta \quad (9)$$

可定义阵列的归一化能量阵因子为

$$W(\theta) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} [v(t, \theta)]^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} [v(t, 0)]^2 dt} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-1/2}^{1/2} \exp\left[-4\pi\left(\frac{t}{T} + \rho\eta \sin\theta\right)^2\right] d\eta \right\}^2 dt}{T \sqrt{\pi} \exp(4\pi)} \quad (10)$$

定向单元天线的阵列辐射方向图, 可通过在式(10)中调制相应的定向单元方向图来实现。

## 2 数值分析

### 2.1 阵列辐射的波形

阵列时域辐射场的波形不仅与观察方向有关, 而且与观察的时间区间有关。图 3 是时间区间取  $\pm 1$  ns 时阵列辐射波形与观察方向的关系, 图中观察角分别为  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  和  $50^\circ$ 。由图可知, 不同观察角的时域波形是不一样的, 在电轴方向 ( $\theta=0^\circ$ ) 所有阵元的脉冲到达时间一致, 其时域波形完全重合, 幅度实现叠加而达到最大; 而在其它方向波形因到达时间不一致而产生波形畸变, 幅度不能完全叠加而脉冲持续时间相应延长。

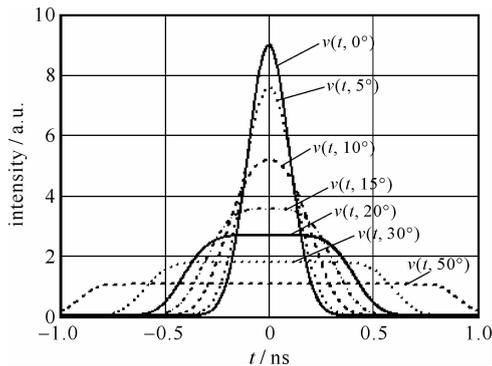


Fig. 3 Waveform for various observed angles

图 3 不同观察角的时域脉冲波形

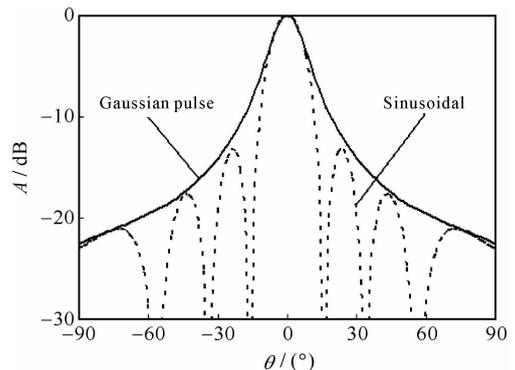


Fig. 4 Calculated pattern for various feedings

图 4 不同激励情况下计算得到的方向图

### 2.2 阵列的瞬态与稳态特性差异

图 4 是同一天线阵分别在瞬态高斯脉冲和稳态时谐正弦波两种激励情况下的计算得到的辐射能量方向图。计算天线阵时取  $m=4$ , 阵列长度取 64 cm, 高斯脉冲的  $T$  取 0.5 ns, 正弦波频率取 1.5 GHz。由图可知, 天线阵在时域脉冲激励的情况下不像时谐场那样具有明显的零点和副瓣。其主要原因是后者依靠电磁波的干涉作用来形成辐射的方向性, 而前者是在不同方向上的辐射波形差异造成幅度和持续时间不同而形成的方向

性,因而其所形成的方向图不会造成正负值相消而出现零点,自然也就不会出现明显的旁瓣<sup>[6]</sup>。这也是时域辐射阵列与普通时谐阵列的重要差异。

当然,上述结果并非绝对的,对于本文采用的单极高斯脉冲波形来说这是成立的。而对于辐射波形本身是双极高斯脉冲或更加复杂的振荡型脉冲波形,则也可形成类似的零点和旁瓣,且零点和旁瓣的数量和位置与辐射脉冲的波形参数密切相关。

### 2.3 阵列时域辐射特性与脉冲宽度的关系

时域天线的方向图与所辐射高斯脉冲的脉冲宽度  $T$  密切相关,不同脉冲宽度所对应的方向图也是有较大区别的,如图 5 所示。分析可知,高斯脉冲的脉宽  $T$  越小,其对应时域方向图的波束宽度就越窄。值得一提的是,天线阵最大辐射方向的电场幅度并不会随着波束宽度的变窄而变大,而各种脉冲宽度(或波束宽度)所对应的最大幅度值是一样的,这与阵列的时谐特性是有区别的。因为脉冲宽度窄则包含总能量就少,在满足与宽脉宽同样最大幅度的条件下只能覆盖相对较小的空域,也就形成相对窄的波束宽度。

### 2.4 阵列的时域波束扫描

阵列的时域波束扫描可通过对各阵列单元进行时延控制来实现。如图 6 所示的发射阵列中,所有单元的辐射信号来自同一脉冲源,每一单元间有固定延迟  $\Delta t$ ,计算时式(4)中  $\tau_i$  变为  $\tau_i = \frac{id \sin \theta}{c} + \Delta t$ ,则阵列的主波束指向为

$$\theta' = \arcsin(c\Delta t/d) \quad (11)$$

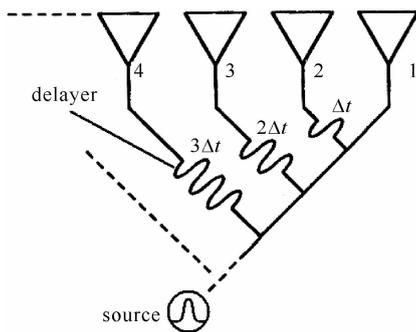


Fig. 6 Time delay system of the array

图 6 阵列的时域延迟系统

单元间延迟时间与扫描方向图的对应关系如图 7 所示。计算天线阵时取  $m=4$ ,阵列长度取 64 cm,高斯脉冲的脉宽  $T$  取 0.5 ns。由图可知,对于此时域天线阵,当单元间时间延迟为 0.13 ns 时,阵列波束可扫描约  $30^\circ$ ;当单元间时间延迟为 0.2 ns 时,阵列波束可扫描约  $48^\circ$ ;而当单元间延迟大于 0.26 ns 时,阵列波束已超过扫描范围。值得注意的是,0.26 ns 正是瞬态脉冲在阵元间距 8 cm 传输所需的时间。所以,只要阵元间的延迟时间不超过光速传播阵元间距所需时间,阵列就可实现波束的扫描。

## 3 仿真验证

为验证前述分析,本文根据实际应用设计并仿真了一种用于辐射冲击脉冲信号的介质加载天线阵,如图 8 所示。这种天线阵的每一个单元采用特殊的 TEM 模馈电装置进行激励,并采用按一定规律缓变的介质慢波结构进行加载,使得天线阵的增益及辐射效率得以大幅提升。

使用基于时域算法的 3 维电磁仿真软件<sup>[7]</sup>计算得到该天线阵某频点的频域方向图,如图 9 所示,而天线辐射口面附近电磁能量传输的时域变化情况如图 10 所示。

比较图 10 中有无介质加载的辐射天线口面场分布,可以看出有介质加载的天线口面场明显受介质影响,

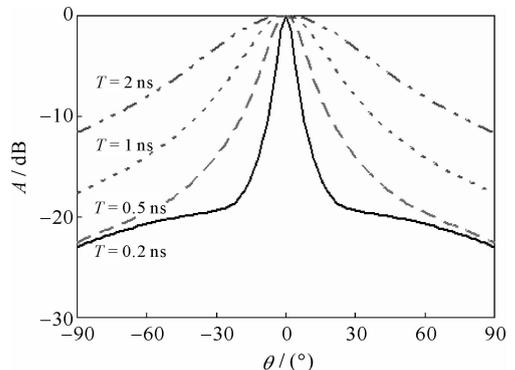


Fig. 5 Calculated pattern for various pulse-widths

图 5 不同脉宽条件下计算得到的方向图

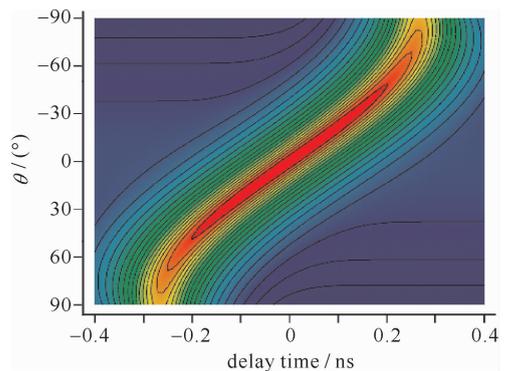


Fig. 7 Calculated scanning pattern for various time delay

图 7 不同延迟时间对应的扫描方向图

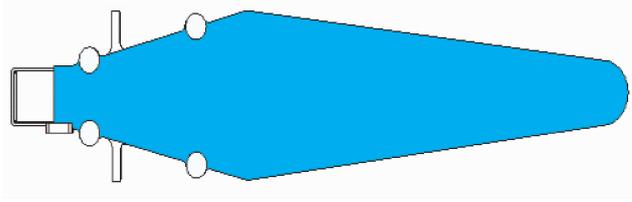


Fig. 8 Model of antenna array

图 8 天线阵模型

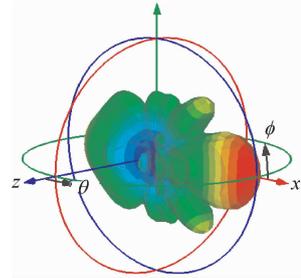


Fig. 9 Frequency domain pattern of the dielectric loaded antenna array

图 9 介质加载天线阵的频域方向图

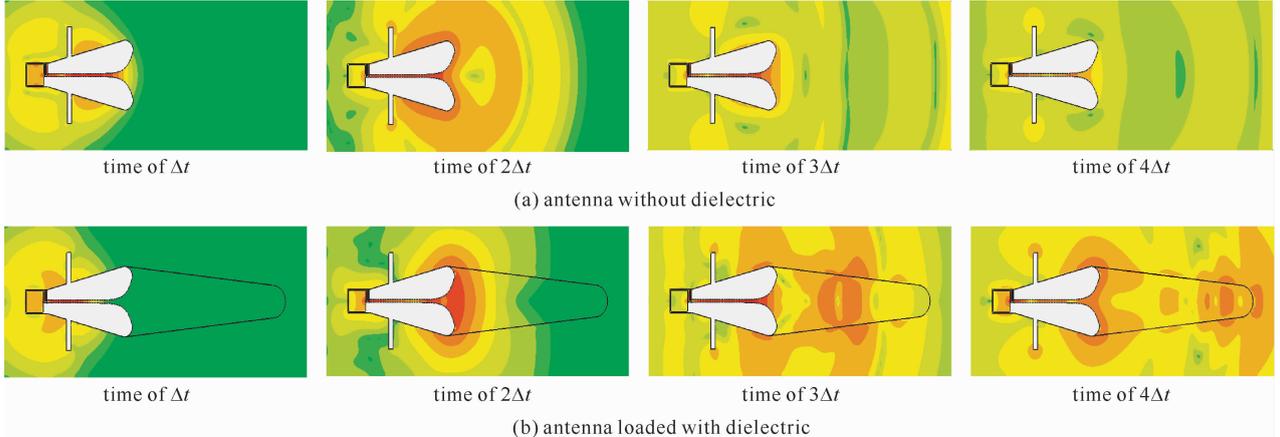


Fig. 10 Electric field transformation in front of the antenna

图 10 天线口面电场变化情况

在介质前端形成更强和更均匀的辐射口径分布,造成更多的能量向前向传播,使得天线的瞬态增益和辐射效率明显提高。仿真结果表明:有介质加载的天线前向辐射电场峰值比没有介质加载的天线增加逾 1 倍,即瞬态辐射功率增大了 3 倍多,如图 11 所示。

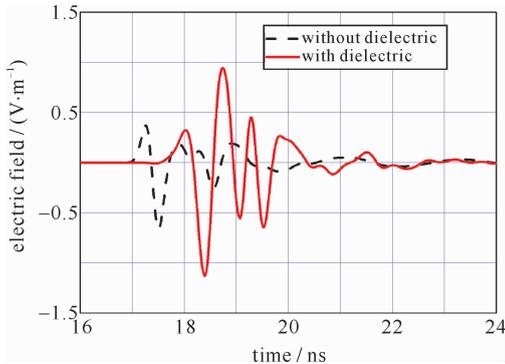


Fig. 11 Electric field at 5 m in front of the antenna

图 11 天线前 5 m 处的场强

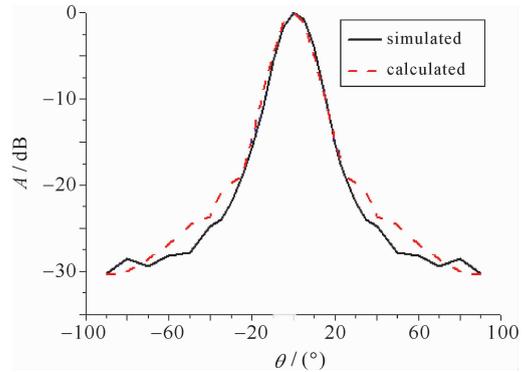


Fig. 12 Simulated and calculated time domain pattern

图 12 天线阵时域方向图

本文用前述分析方法对 1 维线阵进行计算后,又采用 3 维时域电磁场仿真方法进行了模拟仿真,并将二者进行了比较,结果较为吻合,如图 12 所示。

## 4 结 论

本文讨论了天线阵列的瞬态辐射特性,给出了方向图的分析方法,然后通过电磁场仿真手段对分析方法进行了验证,两者的结果较为吻合。为表述简单,本文仅考虑了 1 维线阵的情况,同时采用高斯脉冲作为计算波形。实际上,上述分析方法对于其它脉冲波形同样适用,且做一定调整就可应用于 2 维面阵的分析中。

## 参考文献:

- [1] Harmuth H F. Antennas and wave guides for nonsinusoidal waves[M]. New York: Academic Press, 1984.
- [2] Harmuth H F. Nonsinusoidal waves for radar and radio communication[M]. New York: Academic Press, 1981.

- [3] Scheers B, Acheroy M, Vander Vorst A. Time domain simulation and characterisation of TEM horns using a normalised impulse response [J]. *IEEE Proc AP*, 2000, **147**(6):463-468.
- [4] Sullivan D, Young D. Far field time domain calculation from aperture radiators using the FDTD method[J]. *IEEE Trans on AP*, 2001, **49**(3):464-469.
- [5] 张明友, 吕幼新. 信号与系统分析[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999. (Zhang Mingyou, Lü Youxin. Signal and systems analysis. Chengdu, University of Electronics Science and Technology of China Press, 1999)
- [6] 林昌禄, 聂在平. 天线工程手册[K]. 北京: 电子工业出版社, 2002. (Lin Changlu, Nie Zaiping. Antenna engineering handbook. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002)
- [7] 张敏. CST微波工作室用户全书[K]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004. (Zhang Min. CST microwave studio user's manual. Chengdu: University of Electronics Science and Technology of China Press, 2004)

## Transient radiation characteristic of dielectric loaded antenna array

Chen Hong, Xiao Kaiqi, Xu Jianjun

(National Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** Increasing gain and radiant efficiency is one of the most important aims of the research on transient antenna. The energy array factor of transient radiation was deduced by setting the Gaussian pulse feeding waveform. The transient radiation characteristic of one dimension, symmetrical, and uniform array was analyzed. The radiated waveform of array is correlated with observational time and angle, transient characteristic is quite different from that of transient-free, time domain pattern is correlated with pulse width, and time domain array is scannable. The dielectric loaded antenna array were designed and simulated by using 3D time domain electromagnetic simulation software. The front peak electric field of antenna with dielectric is two times of antenna without dielectric, and the effective radiated power(ERP) is four times. The correctness and validity of this analysis and design is proved by comparing the results of calculation and simulation.

**Key words:** transient radiation; dielectric loaded; antenna array; Gaussian pulse