

# 用点源近似计算时域阵列天线参数

崔海娟 阮成礼 杨宏春 李 扬

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

**摘要:** 本文针对辐射瞬态电磁脉冲的时域阵列天线, 提出了点源近似模型, 利用该模型计算了均匀布阵阵列超宽带天线辐射瞬态电磁脉冲的波形及半功率波束宽度。同时, 采用 CST 对理论计算结果作了间接实验验证, 两者计算结果较好符合, 表明点源近似模型可以作为时域阵列天线参数分析的一种简洁方法。

**关键词:** 点源近似模型, 时域天线阵列, 半功率波束宽度

## Calculation on the Parameters of Time-domain Antenna Array using Point Source Approximate

Cui Haijuan Ruan Chengli Yang Hongchun Li Yang

(Institute of Applied physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054)

**Abstract:** For the radiated transient electromagnetic pulse of the time-domain antenna array, a point source approximate model is introduced in this paper, and it is used to calculate the radiated transient electromagnetic pulse waveform and the half-power beamwidth for uniform embattle ultra-wideband antenna array. At the same time, the results from the CST simulation software have made an indirect experiment verification to the theoretical calculation results, a good match between the two indicates that the point source approximation model can be used as a simple method to analyze the parameters of time-domain of antenna array.

**Keywords:** Point source Approximate Model; Time-domain Antenna array; half-power beamwidth;

## 1 引言

目前, 对于阵列超宽带天线的研究, 若采用电磁仿真软件进行仿真计算, 除计算速度受微机性能的影响, 仿真速度会有点差别外, 仿真结果相对来说比较合理, 但是无法得到清晰的理论模型。若采用电磁场理论进行研究, 由于天线间的耦合很难进行解析分析, 因此对阵列超宽带天线做理论研究有一定的难度。本文针对时域阵列天线辐射的瞬态电磁脉冲, 提出了点源近似模型, 对均匀布阵的天线阵列辐射波束的半功率波束宽度进行计算, 并和 CST 仿真计算结果进行比较, 两者吻合的较好, 因此可以把点源近似模型做为一种计算时域天线参数的简洁方法。

## 2 点源近似模型

根据瞬态电磁脉冲辐射理论, 瞬态电脉冲经超宽带天线辐射后仍为一瞬态电磁脉冲, 且其波形是馈电脉冲波形的一阶导数或高阶导数<sup>[1-2]</sup>。对亚 ns 量级电磁脉冲, 单元天线在轴向  $z < 1m$  的距离处, 就体现出远场、即快衰减特性<sup>[3-5]</sup>, 超宽带单元天线的辐射电磁波场量随  $z$  的变化按反比例衰减; 对实际的单元天线, 其辐射波束的方向图可以用一个含立体角度的函数因子加以考虑; 按波的独立性原理和瞬态电磁脉冲的传输规律, 阵列天线辐射的电磁脉冲波形, 可被认为是各单元天线独自辐射瞬态电磁脉冲的空间叠加<sup>[6]</sup>。基于上述考虑, 提出点源辐射近似模型如下: (1) 由  $m \times n$  个单元天线构成的阵列, 在给定点的辐射, 可以等效看作为  $m \times n$  个点源天线在

给定点辐射场量的叠加; (2) 单元天线辐射的瞬态电磁脉冲的场分量幅度随待测点距离的变化成反比衰减, 辐射波形是时间和空间坐标的函数; (3) 时间  $t$  内, 通过待测点的能量密度值, 正比于合成脉冲场量的平方对时间的积分, 合成脉冲是指各点源天线辐射电磁脉冲在待测点叠加后形成的电磁脉冲; (4) 点源近似模型不考虑各单元天线之间的耦合效应。

按点源近似模型, 天线阵列中任意一个单元天线辐射电磁脉冲通过待测点的时域波形为

$$E(r_{ij}) = E_0 / r_{ij} \cdot f(t - r_{ij} / c, \Omega) \quad (1)$$

式 (1) 中,  $r_{ij}$  为第  $i$  行,  $j$  列的单元天线到待测点的距离,  $r_{ij} = (x_i^2 + y_j^2 + z^2)^{1/2}$ ,  $(x_i, y_j, 0)$  为第  $i$  行,  $j$  列的点源所在位置,  $(0, 0, z)$  为待测点所在位置。 $f(t)$  表示单元天线辐射的瞬态电磁脉冲波形。 $\Omega$  表示单元天线时域方向图的半功率波束宽度(立体角), 式中电场的方向为单元天线的极化方向。根据点源近似模型, 天线阵列辐射电磁脉冲通过待测点的时域波形为

$$E(r_{ij}) = \sum_{i,j} \frac{E_0}{r_{ij}} f(t - \frac{r_{ij}}{c}, \Omega) \quad (2)$$

在实际天线阵中, 阵元之间有相互作用, 并改变了孤立阵元应该有的电流(从而也改变了阻抗), 这种相互作用就是互耦, 它改变了各个阵元上的电流幅度、相位和分布。在布阵过程中要尽量减小阵列天线间的互耦, 就需要考虑单元天线间的相对位置。按瞬态电磁脉冲传输的时域观点, 如果对 1、2 两个相邻天线同时馈电, 当第 1 个天线辐射的电磁脉冲传输到第 2 个天线时, 第 2 个天线的馈电过程还未结束, 则第 2 个天线辐射的电磁脉冲应该是该天线的馈电电流与第 1 个天线在第 2 个天线上产生的感应电流共同辐射的结果, 这种效应就是天线互耦的物理实质, 如图 1 所示。采用光学理论中两个瞬态电磁脉冲可识别的瑞利判据, 如图 2 所示, 则单元天线的最小间距应该满足

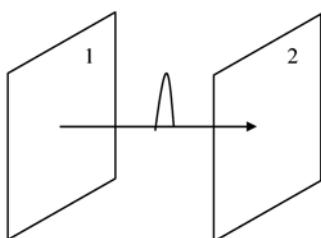


图 1 天线互耦的物理实质

$$d \geq \frac{cT}{2} \quad (3)$$

式 (3) 中  $d$  为单元天线之间间距,  $T$  为馈源脉冲宽度, 若取  $T=1\text{ns}$ , 则  $d \geq 15\text{cm}$ 。

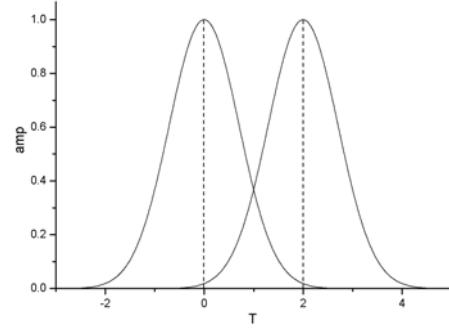


图 2 瑞利判据

由于阵列合成脉冲是指各点源天线辐射电磁脉冲在待测点叠加后形成的电磁脉冲, 因此, 由到待测点最近的单元天线和最远的单元天线和待测点之间的距离差引起的时间差必须在一个周期内, 保证在进入快衰减段后两个波形可以完全叠加。对于一个均匀分布的点源阵列, 其单元间距为  $d$ , 到轴线上  $z$  处的最远光程为  $r_{\max}$ , 最近的光程为  $r_{\min}$ ,  $r_{\max} - r_{\min} \leq cT$ 。对于  $(2m+1) \times (2m+1)$  均匀分布的点源阵列

$$r_{\max} = \sqrt{2m^2 d^2 + z^2} \quad r_{\min} = z \quad (4)$$

可得天线阵列单元间距的最大值应该满足

$$d \leq \sqrt{\frac{c^2 T^2 + 2cTz}{2m^2}} \quad (5)$$

### 3 时域天线阵列辐射波束的半峰值波束宽度计算与讨论

对于频域天线, 通常取某个频率或者中心频率上功率方向图中, 在包含主瓣最大辐射方向的某一平面内 (E 面或者 H 面), 把相对最大辐射方向功率通量密度下降到一半处的两点之间的夹角定义为该平面 (E 面或者 H 面) 的半功率波束宽度。场强方向图中, 把相对最大辐射方向场强下降到 0.707 倍处的夹角也称为半功率波束宽度。而时域天线辐射的瞬态电磁脉冲, 频谱分量很丰富, 本文对于半功率波束宽度的计算, 采用如图 3 所示的方法, 根据单元天线的极化方向和排列方位, 分别沿  $xoz$ ,  $yoz$  平面对角度  $\theta$  进行扫描计算, 把相对最大辐射方向场强下降到 0.707 倍处的夹角称为时域天线阵列的半

功率波束宽度, 计算得到天线阵列的  $E$  面、 $H$  面的波束宽度。图 3 中采用均匀布阵的时域槽天线阵列进行计算, 根据点源近似模型计算的槽天线阵列辐射的瞬态电磁脉冲波形如图 4 所示, 其中未考虑瞬态电磁脉冲的一阶、二阶导数情况。

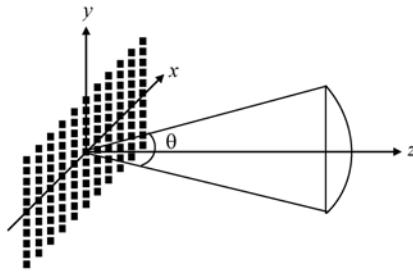


图 3 时域天线阵列辐射波束的半峰值波束宽度

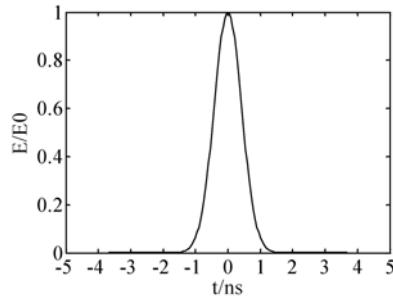


图 4 利用点源模型计算的槽天线辐射瞬态电磁脉冲波形

根据点源近似模型, 如果计算过程中不考虑单元天线时域方向图的波束宽度  $\Omega$ , 则天线阵列辐射电磁脉冲通过待测点的时域波形可以简写为

$$E(r_{ij}) = \sum_{i,j} \frac{E_0}{r_{ij}} f(t - \frac{r_{ij}}{c}) \quad (6)$$

本文根据公式(6), 分别对均匀布阵的  $11 \times 11$ ,  $9 \times 9$ ,  $7 \times 7$ ,  $5 \times 5$  槽天线阵列  $E$  面和  $H$  面辐射波束的半功率波束宽度进行计算, 计算结果如图 5、图 6 所示。从图中可以看出, 随着天线阵列口径变大, 阵列辐射波束宽度变小, 这也说明了瞬态电磁脉冲的波束聚焦特性。为验证点源近似模型的正确性, 采用 CST 仿真软件对上述均匀布阵的槽天线阵列辐射波束的  $E$  面和  $H$  面的半角宽度分别进行计算, 计算结果如图 7、图 8 所示。CST 计算结果和点源近似模型计算结果变化规律一致, 现取  $11 \times 11$ 、 $9 \times 9$  槽天线阵列采用两种方法得到的阵列辐射波束的波束宽度值进行比较分析, 如表 1 所示。

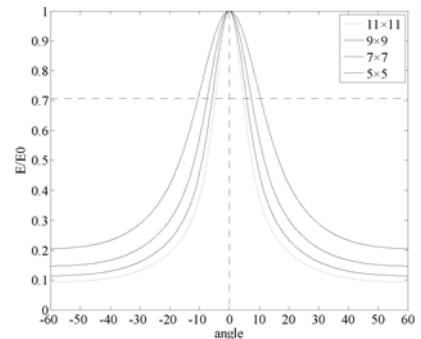


图 5 天线阵列半峰值波束宽度随阵列口径变化 ( $E$  面)  
(用点源近似模型计算)

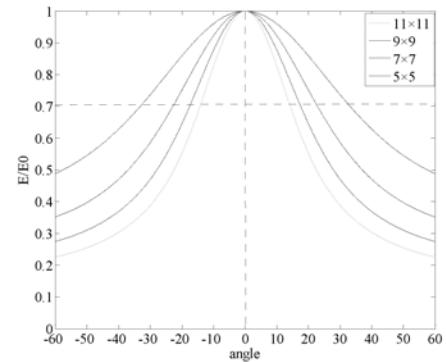


图 6 天线阵列半峰值波束宽度随阵列口径变化 ( $H$  面)  
(用点源近似模型计算)

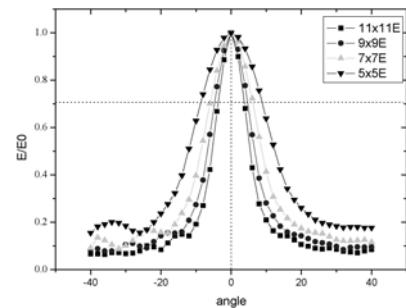


图 7 天线阵列半峰值波束宽度随阵列口径变化 ( $E$  面)  
(用 CST 仿真计算)

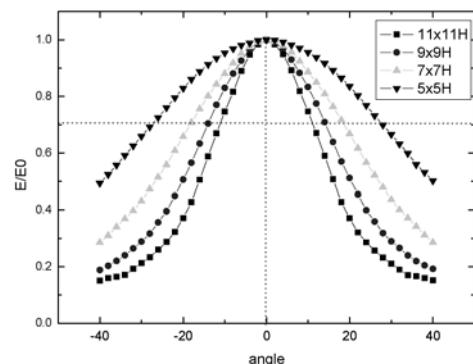


图 8 天线阵列半峰值波束宽度随阵列口径变化 ( $H$  面)  
(用 CST 仿真计算)

表 1 两种方法计算结果

槽天线阵	计算方法	E 面波束宽度	H 面波束宽度
11×11	CST	7.4	21.6
	点源近似	9.4	28
9×9	CST	9.2	27.6
	点源近似	11.6	34.4

从表 1 中数据可以看出 CST 仿真计算和点源近似模型计算结果差别不太大，并且点源近似模型计算的辐射波束宽度要稍大于 CST 仿真计算的结果。这是因为在点源模型计算过程中采用公式(6)进行计算时，未考虑单元天线时域方向图，在各个方向的辐射的功率值各不相同，而是完全看作一个其辐射值在各个方向大小相等的点源来对待，因此造成在实际计算过程中，点源近似模型计算结果比 CST 仿

真结果偏大。这也正是下一步要改进的地方，以期进一步验证电源近似模型的有效性。

## 4 结论

本文采用点源近似模型对  $11 \times 11$ 、 $9 \times 9$ 、 $7 \times 7$ 、 $5 \times 5$  的均匀布阵槽天线阵列辐射波束的半功率波束宽度进行计算。计算结果表明，随着阵列口径增大，阵列辐射波束的波束宽度会相应的变小，说明了瞬态电磁脉冲的波束聚焦特性。文中同时利用 CST 仿真软件对相同布阵方式时域槽天线阵列辐射波束的波束宽度进行计算，计算结果和点源近似模型计算结果基本一致，表明点源近似模型可以作为时域阵列天线参数分析的一种简洁方法。

## 参 考 文 献

- [1] 钟顺时. 微带天线理论与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991, 第一版: 4-18
- [2] Boryssenko A, time domain studies of ultra-wide band antennas. In: Proc. Of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1999: 95-100
- [3] 曾刚, 杨宏春, 吴明和等. 线元天线阵列传输特性实验研究. 压电与声光. 2007, 29(1):103-105
- [4] 杨宏春, 阮成礼. 线元天线阵列波束扫描研究. 电子与信息学报, 2003, 25(3): 427-432
- [5] 杨宏春, 阮成礼. 平面阵列电磁导弹辐射器轴线坡印亭矢量时间积分随距离的衰减. 四川大学学报. 2001, 38(9): 78-86
- [6] 孙庆玲, 杨宏春, 阮成礼. 瞬态阵列电磁脉冲同相合成特性研究. 微波学报, 2009, 25(2): 5-7

作者简介:

崔海娟, 女, 讲师, 博士生, 主要研究领域为超宽带电磁学。

## 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](http://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](http://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](http://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>