

- Foutz. Smart-antenna systems for mobile communication networks part1[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 2002,44(3): 145~154.
- [3] Weiss A J, Friedlander B. Effects of modeling errors on the resolution threshold of the MUSIC algorithm. IEEE Trans on Signal Processing, 1994,42(6): 1519-1526.
- [4] Ching-Yih Tseng, David D. Feldman, Lloyd J. Griffiths, "Steering Vector Estimation in Uncalibrated Arrays," IEEE Trans. on Signal Processing, 1995, vol. 43(6), pp. 1397-1412

## 相控阵天线相位中心的时域全波仿真

王红丽 张敏

(同济大学 电子信息与工程学院)

**摘要:** 本文采用有限积分法对有源相控阵进行全波时域仿真, 计算其相位中心等远场特性。同时, 在 CST 微波工作室®中利用后处理命令(不考虑天线单元间的耦合)对天线阵进行仿真, 当天线阵在较小的角度范围内进行扫描时, 全波仿真和后处理合成所得结果都很准确。在较大的扫描角时, 采用后处理合成所得到的相位中心结果与精确的全波仿真所得的值有较大的误差, 扫描角越大, 后处理合成所得相位中心的误差越大, 对于较大扫描角的相控阵采用全波仿真是必要的。对于有源相控阵, 适当的坐标变换可以大大方便计算主瓣宽度范围内的相位中心。

**关键词:** 有限积分技术, 有源相控阵, 全波仿真, 相位中心

### Full-wave Time-domain Simulation of Phase Center for Phased Array Antennas

WANG Hongli and ZHANG Min

(School of Electronics and Information Engineering, TONGJI UNIVERSITY)

**Abstract** A full-wave time domain simulation of Active Electronically Scanned Array (AES) is carried out based on the Finite Integration Technique (FIT). The phase center of the array can be accurately obtained. Phase center results obtained with both full-wave time domain simulations and post processing method are presented for different scan angles. For small scan angles, both methods deliver accurate phase center results, while for large scan angles, the full-wave-based method proves to be more accurate. Bigger scan angle results in more significant the deviation of phase center calculated by post processing method from the one obtained by full-wave simulation. Regarding the AES, the calculation of phase center will be more convenient if coordinate is changed properly.

**Key words** Finite Integration Technique (FIT), Active Electronically Scanned Array (AES), Full-wave Simulation, Phase Center

## 1、引言

诸如 GPS 等距离测量系统, 都需要非常准确地计算出系统天线的相位中心, 相位中心通常认为是场的相位分量与球面波前相差最小的位置 [1]。天线阵相位中心的计算需要考虑单元天线的辐射和阵因子等很多问题, 因而计算相对复杂。如果我们天线的远场可以看作球面波, 则天线的相位中心即是该球面波的球心。通常情况下

可以根据天线的方向图来推导出天线的相位中心 [2], 但由于有源相控阵的结构复杂, 电尺寸大, 故这种方法在计算相控阵的相位中心时效率并不高。本文在 CST 微波工作室®[3]中建模 3 维全波仿真模型, 并利用时域求解器进行仿真。时域求解器的主要算法是有限积分技术 [4], 同时结合了理想边界拟合 (Perfect Boundary Approximation) 技术®和薄片技术™(Thin Sheet Technique) [3], 建立稀疏矩阵方程, 计算量与

网格数量呈线性关系, 可以很方便地对有源相控阵等电大尺寸模型进行仿真计算。除了全波仿真法, CST 微波工作室还提供后处理仿真工具。在精度要求不高的情况下, 忽略天线元之间耦合, 可以大大提高计算的效率。相控阵的主瓣方向在扫描角内不断变化, 而天线阵的相位中心随着主瓣宽度和切平面的不同而有所不同, 为了得到一致稳定的相位中心, 在 CST 微波工作室®中利用宏命令天线阵的远场特性进行设置, 使得时域求解器可以计算半功率主瓣范围内的相位中心。

本文利用全波仿真和后处理分别计算 9 单元相控阵、25 单元相控阵以及 125 单元相控阵的相位中心等远场特性, 并对仿真结果进行分析比较。分析表明, 全波仿真和后处理仿真都是天线仿真的有效工具, 在扫描角较大时, 全波仿真更为精确。

## 2、理论及仿真实例

### 2.1、有限积分技术介绍

时域有限积分技术 (FIT) 是一种通用的空间离散化技术, 该方法对积分形式的麦克斯韦方程进行离散化, 在计算区域内生成一套网格, 把相应的计算区域分割为许多小的网格单元[5], 在基网格和伴随网格上对相应的麦克斯韦方程中的旋度方程进行离散化, 并引入离散旋度矩阵  $C$  和伴随离散旋度矩阵  $\tilde{C}$  即可得相应的离散旋度方程,  $C\mathbf{e} = -\frac{d}{dt}\mathbf{b}$ ;  $\tilde{C}\mathbf{h} = \frac{d}{dt}\mathbf{d} + \mathbf{j}$ ; 采用同样的方法将散度方程离散化, 并引入两个离散散度旋子  $\mathbf{S}$  和  $\tilde{\mathbf{S}}$  即可得离散散度方程  $\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{d} = \mathbf{q}$ ;

$\mathbf{S}\mathbf{b} = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{h}$ ,  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{q}$  分别表示离散化的电场强度, 磁感应强度, 磁场强度, 电感应强度, 电流密度和电荷密度矢量。散度矩阵和旋度矩阵的元素只与介质结构和边界相关, 其元素只包含 0、1、-1, 并且都是稀疏矩阵。离散化过程如图 1 所示[4]。

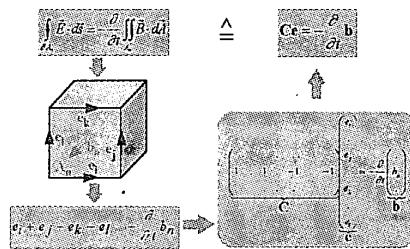


图 1 法拉第电磁感应定律的离散化

时域有限积分法用中心差分代替时间导数, 生成显示时间积分方程。

$$\mathbf{e}^{n+1/2} = \mathbf{e}^{n-1/2} + \Delta t \mathbf{M}_e^{-1} [\tilde{\mathbf{C}} \mathbf{M}_\mu^{-1} \mathbf{b}^n + \mathbf{j}_s^n]$$

$$\mathbf{b}^{n+1} = \mathbf{b}^n - \Delta t \mathbf{C} \mathbf{e}^{n+1/2}$$

在满足 Courant-Friedrichs-Levy (CFL) 稳定性条件  $\Delta t \leq \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}}$  的情况下, 即可求得所有电磁场结果[3]。

### 2.2、相位中心的计算

天线阵的主瓣方向发生变化时, 相位中心也会随之变化。通常, 选择天线阵主瓣所在方向的半功率范围内进行相位中心的计算。如果天线的主辐射方向位于天线阵的 +Z 方向, 则可以直接计算半功率主瓣宽度内的相位中心。相控阵的主瓣方向随着扫描角的变化而变化, 这时我们需要进行坐标变换, 以方便天线阵相位中心的计算。

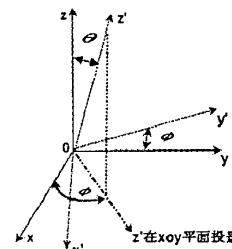


图 2 相控阵的主瓣方向变换

相控阵的主瓣方向由 Z 方向扫描到 Z' 方向后, 相位中心也会随之发生变化, 在 CST 微波工作室®中旋转坐标系, 使得新坐标系下 Z' 方向为主瓣方向。由图 2 可得相应的坐标变换公式为:

$$x = x' \cos \theta \cos \varphi - y' \sin \theta \cos \varphi + z' \sin \varphi$$

$$y = x' \cos \theta \sin \varphi + y' \cos \theta \sin \varphi + z' \sin \theta \sin \varphi$$

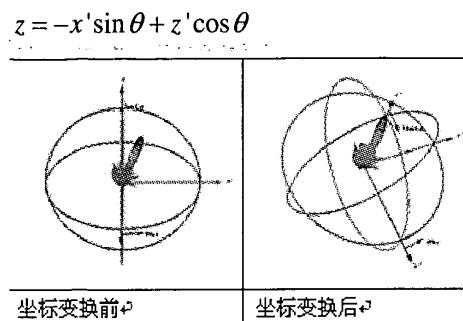


图 3 625 单元天线阵的 3D 方向图

对于 625 单元有源相控阵, 其单元天线的主要瓣方向为 +Z 方向, 相位中心为 (-1.04, -1.55, 4.33), 均方差为 1.09。当主瓣方向旋转到 30 度位置时, 坐标变换前后所得 3 维方向图如图 3 所示。而且, 坐标变换前计算所得相位中心为 (929.70, -315.95, -9559.35), 均方差 Sigma 的值为 27575.40, 该相位中心是以 Z 轴范围内的电场分量为基准进行计算的, 因而并不是我们需要的主要瓣范围内的相位中心。坐标变换后计算所得的原坐标系下的相位中心为 (14.31, 13.32, 34.34), 均方差 Sigma 的值为 11.45。可见, 在相控阵的相位中心计算过程中, 坐标变换是非常必要的。

### 2.3. 全波仿真与后处理结果对比

全波仿真是指建模完整的天线阵列进行仿真, 考虑天线单元间的耦合, 是计算天线阵远场特性的最精确的方法。对于大型天线阵, 建模所有的天线单元进行仿真将受到计算机资源等条件的限制。因而需要利用仿真软件的后处理功能进行仿真计算, 后处理功能并不考虑天线单元间的耦合, 是计算天线阵远场特性的一种近似方法。

对于相控阵, 没有相位加权时, 天线阵的主要瓣指向 Z 方向, 对  $3 \times 3$  的 9 单元相控阵分别进行全波仿真和后处理计算, 所得 3 维远场结果如图 4 所示, 图 5 给出了两种计算方法所得 2 维远场方向图在两个主平面的对比, 计算所得相位中心见表一。

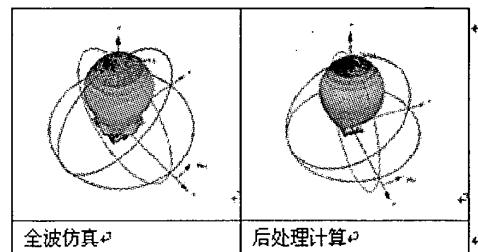


图 4 9 单元相控阵的 3D 方向图

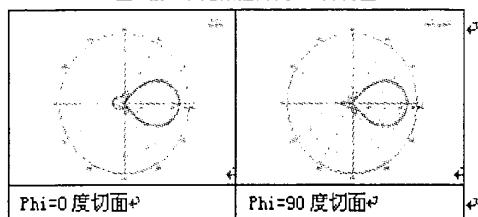


图 5 9 单元相控阵的极坐标对比

表一 无相位加权的 9 单元阵列相位中心对比

	坐标值			均方差
	X	Y	Z	
全波	-0.77	-2.27	19.30	1.61
后处理	-1.04	-1.55	4.33	1.09

全波仿真 45 度角扫描的 9 单元相控阵和后处理计算所得的 3 维远场特性如图 6 所示, 两种计算方法所得极坐标图在主平面的对比如图 7 所示, 表二中列出了两种算法所得的相位中心。

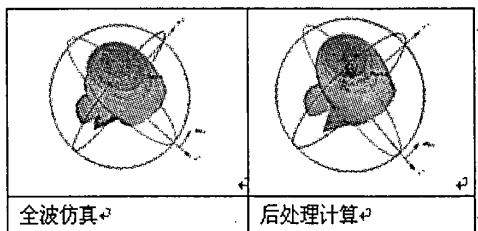
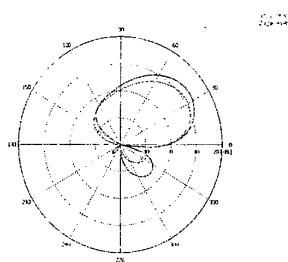


图 6 9 单元相控阵 45 度角扫描时的 3D 方向图

图 7 9 单元相控阵的极坐标对比  $\phi=45$  度

表二 45 度角扫描的 9 单元阵列相位中心对比

	坐标值			均方差
	X	Y	Z	
全波	0.00	-1.44	5.46	0.01
后处理	0.00	-1.55	5.01	0.01

对于较大的天线阵，如果不对天线阵进行相位加权，则完全可以采用后处理计算天线阵的远场特性，图 8 和图 10 分别给出了 25 单元阵列和 125 单元阵列在两种计算方法下所得的 3 维远场结果对比，图 9 和图 11 给出了两种情况下所得天线阵远场特性在两个主平面的极坐标对比。其相位中心对比见表三和表四。

	坐标值			均方差
	X	Y	Z	
全波	0.00	-1.44	5.46	0.01
后处理	0.00	-1.55	5.01	0.01

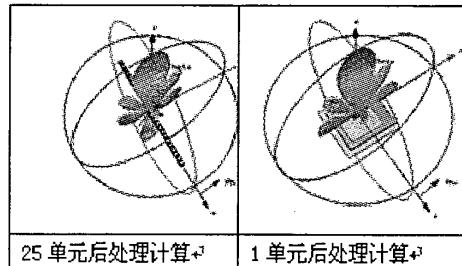


图 10 125 单元相控阵的 3D 方向图

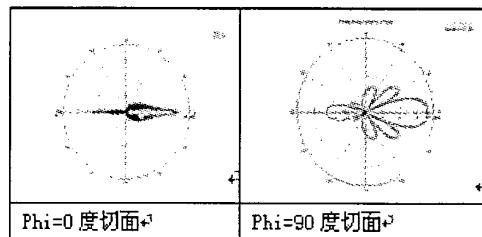


图 11 125 单元相控阵的极坐标对比

表四 无相位加权的 125 单元阵列相位中心对比

	坐标值			均方差
	X	Y	Z	
25 单元	0.00	-1.44	5.45	0.01
1 单元	0.00	-1.55	5.02	0.02

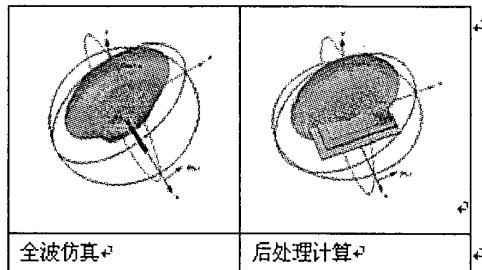


图 8 25 单元相控阵的 3D 方向图

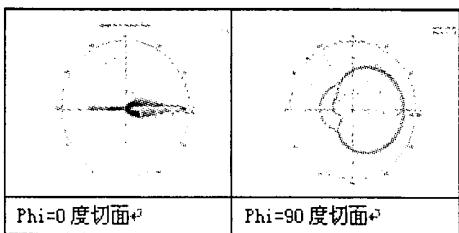


图 9 25 单元相控阵的极坐标对比

表三 无相位加权的 25 单元阵列相位中心对比

对结果进行对比可知，扫描角较小（通常小于 45 度扫描角）时，全波仿真所得天线阵的远场特性与后处理计算所得远场特性的误差满足工程精度（10%）要求，（特别的，在扫描角为 0 度时，全波仿真所得结果和后处理计算所得结果吻合的很好，）此时我们完全可以用后处理计算来代替全波仿真。当相控阵工作在较大扫描角时，后处理计算所得结果的有较大的误差，此时要获得精确的相位中心值，全波仿真时必要的。

### 3、结束语

精确相位中心的计算在阵元间互耦较强的情况下必须使用全波仿真，尤其是对于较大扫描

角下的相控阵，采用时域有限积分技术进行全波仿真计算相位中心是很有必要的。对于特大规模的天线阵，阵元间耦合作用相对较小的情况下，在较小的扫描角范围内，全波仿真和后处理计算所得结果的误差满足工程精度要求。此时，考虑到计算时间以及计算机资源等问题，可以用后处理计算代替全波仿真。

### 致谢：

同济大学现代集成电磁仿真研发中心和 CST China 对课题的完成提供了很多帮助，在此表示感谢！

### 参考文献

[1] David Taggart, Louis Sacks. The Calculation of the Phase Center for Spacecraft phased Array

- Antennas. [J] The Aerospace Corporation EI Segundo, CA
- [2] Qun Wu, Bo-shi Jin, Li Bian, Yu-ming Wu, Le-Wei Li. An approach to the determination of the phase center of Vivaldi-based UWB. [J] Proceedings of the IEEE, November 2006
- [3] CST 工作室套装系列丛书 [DB/OL], 2006. [www.cst-china.cn](http://www.cst-china.cn)
- [4] Thomas Weiland. Time Doamin Electromagnetic Field Computation with Finit Difference Methods[J]. International Journal of Numerical Modeling Electronic Networks Devices and Fields, 1996, Vol 9:295-319.
- [5] 盛新庆. 计算电磁学要论 [M]. 科学出版社, 2004

## 利用 CST 软件快速仿真相切比雪夫天线阵

王红丽 张敏

(同济大学 电子与信息工程学院)

**摘要：**利用三维全波时域电磁场仿真软件 - CST 自带的 VBA 语言，编写相应的宏命令，实现有源相控阵的幅度和相位加权。宏命令将单元天线扩展为任意线阵或是平面方阵，并对天线阵的幅度进行切比雪夫加权或余弦加权。切比雪夫加权后的天线阵，可以在给定副瓣电平后获得等副瓣条件下最优的主瓣宽度。提出的相位加权方法，可以使得天线阵的波束指向预定的方向，并采用时域有限积分法 (FIT) 计算天线阵的相位中心。实验结果表明在不影响精度的情况下，该方法大大提高天线阵计算的效率。

**关键词：**切比雪夫多项式，有源相控阵，有限积分技术，相位中心

### Fast Simulation of Chebyshev Antenna Arrays by Using CST MWS

Hongli WANG and Min ZHANG

(School of Electronics and Information Engineering, TONGJI UNIVERSITY)

**Abstract** The powerful Visual Basic for Applications (VBA) compatible macro language, which is equipped in the commercial 3D electromagnetic simulation tool - CST, is used to quickly simulate the Chebyshev antenna arrays. The VBA macro can extend an antenna element to an arbitrary linear or square array with their amplitudes of the array elements being weighted in the Chebyshev polynomials or Cosine functions. After Chebyshev amplitude weighting, the antenna array can give the best mainlobe width with respect to the given sidelobe level. This paper also provides a method which can be used to weight the phases of the array elements, when the array elements' phases are weighted, the mainlobe of the array will point to a specific direction. The phase center of the array can be calculated using the Finite Integration Technique (FIT). It is shown that the computational efficiency was improved greatly without losing any significant

## 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>