

毫米波段共形相控阵天线技术研究

毕佳明 金博识 杨彩田 吴群

(哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院, 黑龙江哈尔滨 150001)

Email:bjm625.5@163.com

摘要: 飞机、导弹、巡航导弹和卫星等各种先进的飞行器, 为了获得更高的武器性能, 它们所携载的雷达用相控阵雷达形成“共形阵列天线”已成为发展趋势。本文分析了共形相控阵天线的原理和特点, 介绍了实现共形相控阵天线的一些新技术特点, 为毫米波段共形相控阵天线的研究奠定了一定的基础。

关键词: 共形 相控阵 毫米波

1. 引言

相控阵天线通过电控扫描代替机械扫描, 提高了天线对目标的跟踪速度, 是目前武器系统天线的发展方向。1937年, 美国首先展开相控阵天线的研究工作, 并在60年代, 同前苏联相继研制和装备了多部相控阵雷达, 多用于弹道导弹防御系统^[1]。但目前的相控阵天线基本上还是平面阵列天线。平面阵列天线计算模型简单, 技术趋于成熟, 但随着扫描角度的增大, 增益跌落较快。而本文介绍的共形相控阵天线, 通过方位面波束的开关切换, 可以实现该空间区域的连续扫描; 并且在满足增益要求的前提下, 共形阵通过展宽波束, 减少了空间的波束数目。另外, 对于一些特殊的应用场合, 如飞行器表面的天线, 共形相控阵更符合空气动力学要求。

2. 共形相控阵天线基本原理

共形相控阵天线的基本原理可简述如下:

如图1所示, N 个阵列天线单元安装在某一曲面上, 每一天线单元的坐标位置可用其位置矢量 \vec{r}_i 来表示。每一天线单元的电场强度辐射方向图分别为 $f_i(\theta, \varphi)$ 。即使每一天线单元的场强方向图都相同, 但由于它们分布在曲面上, 同样 (θ, φ) 方向上的 $f_i(\theta, \varphi)$ 也是不相同的。设第 i 个天线单元的幅度与相位加权系数分别为 a_i 和 $\Delta\varphi_{i0}$, 即第 i 个天线的复加权系数 W_i 为 $W_i = a_i e^{-j\Delta\varphi_{i0}}$ 。另外, 假定相位参考点选择在坐标原点 O , 则

阵列中所有天线单元在 \vec{r} 方向上辐射的合成场强或天线的场强方向图可表示为

$$E(\vec{r}) = E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N f_i(\theta, \varphi) a_i e^{-j\Delta\varphi_{i0}} \cdot \frac{e^{-j(2\pi R_i / \lambda)}}{R} \quad (1)$$

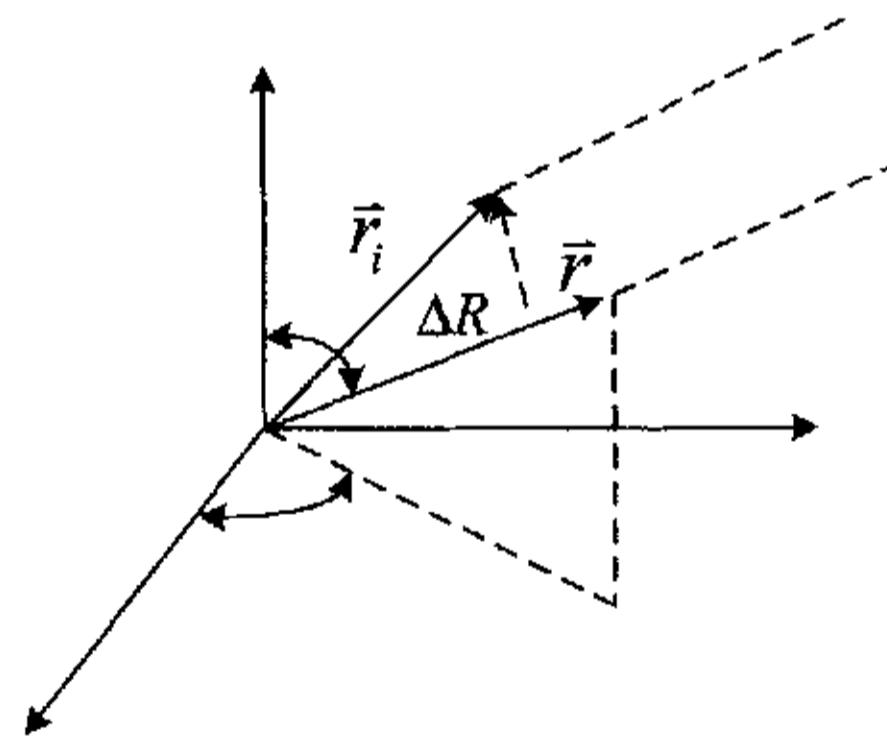


图 1 共形阵列天线单元位置矢量表示

对于远区的目标，由于阵列相位参考点到目标的距离 R 远大于相位参考点到各天线单元的距离(r_1, r_2, \dots, r_N)，即 $R \gg r_i$ ，故式(1)分母中的 R_i 可用 R 代替。各天线单元到目标的距离 R_i 可表示为

$$R_i = R - \Delta R_i \quad (2)$$

去除公共相位因子，不考虑幅度的常数项，式(1)可改写成

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N f_i(\theta, \varphi) a_i e^{j(2\pi R_i/\lambda) - \Delta\phi_{i0}} \quad (3)$$

ΔR_i 是第*i*个天线单元到目标的距离与参考点(坐标原点 o)到目标距离的差值。 ΔR_i 取决于

$$\Delta R_i = \bar{r}_i \cdot \hat{r} \quad (4)$$

即 ΔR_i 是第*i*个天线单元的位置矢量 \bar{r}_i 与参考点到目标的单位矢量 \hat{r} 的标量乘积。 \hat{r} 可用其方向余弦来表示

$$\hat{r} = \hat{i} \cos \alpha_x + \hat{j} \cos \alpha_y + \hat{k} \cos \alpha_z \quad (5)$$

其中， α_x, α_y 和 α_z 分别是单位矢量 \hat{r} 与 x, y 和 z 三个坐标轴的夹角。

由图2所示的坐标系，不难看出

$$\cos \alpha_y = \sin \theta \sin \varphi \quad (6.a)$$

$$\cos \alpha_x = \sin \theta \cos \varphi \quad (6.b)$$

$$\cos \alpha_z = \cos \theta \quad (6.c)$$

第*i*个单元在阵面上的位置，如果以它在 (x, y, z) 坐标系中的投影来表示，即

$$\bar{r}_i = \hat{i} x_i + \hat{j} y_i + \hat{k} z_i \quad (7)$$

则根据式(4)， ΔR_i 可以表示成

$$\Delta R_i = x_i \cos \alpha_x + y_i \cos \alpha_y + z_i \cos \alpha_z \quad (8)$$

ΔR_i 对应的相位，即第*i*个单元相对于参考点 o 的信号相位 $\Delta\phi_i$ 为

$$\Delta\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R_i = \frac{2\pi}{\lambda} (x_i \cos \alpha_x + y_i \cos \alpha_y + z_i \cos \alpha_z) \quad (9)$$

为了使天线波束的最大值在 (θ_0, φ_0) 方向上，由式(3)和式(9)可得每一个天线单元的移相器所提供的相移 $\Delta\phi_{i0}$ 。必须为

$$\Delta\phi_{i0} = \frac{2\pi}{\lambda} (x_i \cos \alpha_{x0} + y_i \cos \alpha_{y0} + z_i \cos \alpha_{z0}) \quad (10)$$

式中

$$\cos \alpha_{x0} = \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \quad (11.a)$$

$$\cos \alpha_{y0} = \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \quad (11.b)$$

$$\cos \alpha_{z0} = \cos \theta_0 \quad (11.c)$$

显然，按式(10)改变每一天线单元的相移，即改变每一天线单元复加权系数中的相位项，就能使天线波束

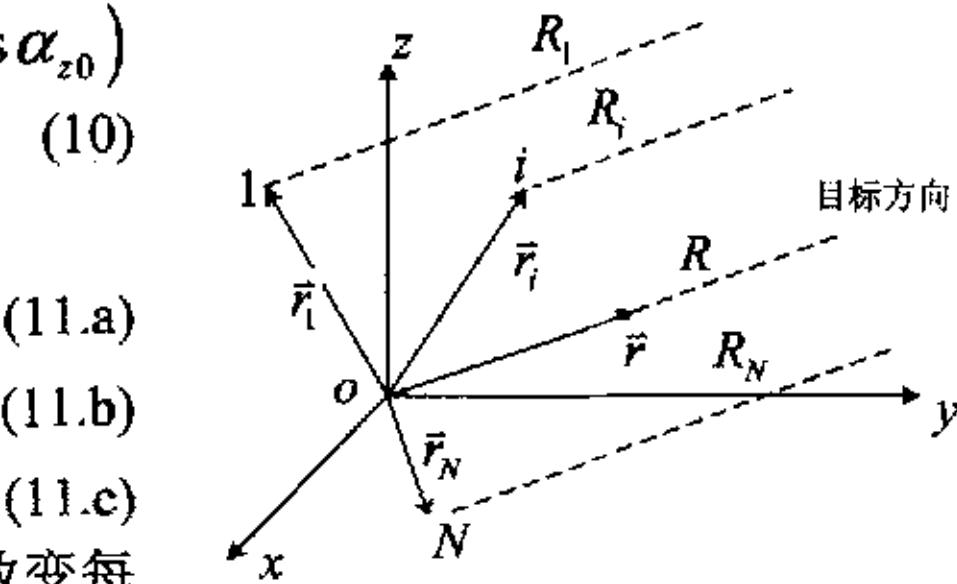


图2 \bar{r}_i 与 \hat{r} 的标量乘积示意图

实现扫描。具体到MOM-UTD方法^[3]，将式(10)计算所得相移赋给广义电压矩阵便可在UTD-MOM方法中实现相位扫描。

3. 毫米波共形相控阵分析方法

目前，关于共形相控阵分析设计的相关报道，国内外的研究人员不断尝试采用一些新技术来分析共形相控阵天线，下面介绍几种共形相控阵分析中的一些新技术：

(1) 神经网络技术。神经网络技术主要是验证带有失效阵元、甚至阵面被阻挡物遮住的天线阵的精确测向能力。传统的天线波束形成算法需要完全一样的阵元，这是因为这些传统算法涉及这样一个问题：从非线性或未知的阵元退化性能来计算精确解很复杂，而神经网络可以解决这类问题，某些神经网络体系结构在对函数输入和它们对应的所需输出样本“训练”之后，能使未知的非线性函数映射逼近到不同精度。美国有关专家已经根据高斯径向基函数 (Gaussian radial-basis functions) 建立一个神经网络，正在进行训练自适应神经网络体系结构的试验，以确定该网络是否能学习所需要的波束形成函数，并使该函数适应非线性阵元故障和由于阵列超时使用引起的性能退化。

(2) 遗传算法技术。遗传算法已经有效的用于解决电磁场问题。该技术是达尔文自然选择和适者生存理论的实际应用，同其他全局优化技术相比，更适合于宽带问题以及解域未知的新问题，尤其当搜索空间较大时遗传算法的收敛速率比其他算法要快^[2]。目前，已经使用简单遗传算法SGA (Simple Genetic Algorithm) 来设计几何结构简单的天线。整个模型中，SGA计算工具最优设计基于一个单一函数，优化的程序依赖于权值的选择。它的设计程序包括三个步骤：(1) 编码和初始化 (2) 再生 (3) 求值和重复。但是如果设计者想要改变一个目标的权值，所有权值都要有所变动，即整个优化程序就要改变，所以近两年引入非控解分类遗传算法NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm) 来设计共形天线。同SGA相比，NSGA寻找帕累托优化解来代替单一优化解。寻找帕累托最优解的过程是通过适合分配流程和共享流程两个步骤实现的，而其中共享流程保证了解空间的多样性。它的设计程序包括四个阶段 (1) 明确非控个体 (2) 分配虚拟适合度因数 (3) 共享进程 (4) 重新分配适合度因数。

(3) 数字波束形成技术。随着有意和无意干扰的剧增，电磁环境变得日益致密，加之要求雷达系统提供更多的信息，使得对天线的性能要求不断提高。在这种情况下，数字波束成形 (DBF) 这门新技术正可以大大提高天线性能。在数字波束成形天线阵中，接收到的信号在阵元处检波并数字化。专用数字计算机再对该信号进行处理，形成所希望的波束。这种措施保留了在天线孔径处可用的全部信息，即N个分立阵元信号。相反，模拟波束成形器仅生成这些信号的加权和信号，将信号从N个减少到一个。高级信息加之灵活的数字处理可以实现许多诱人的特性，而这些特性是常规天线阵实现不了的。数字波束成形技术有很多的优点，如改进的自适应方向图置零；紧密相间的多波束；阵元方向图修正；天线自校准及超低旁瓣；超高分辨力；灵活的雷达功率和时间管理等。

4. 毫米波共形相控阵天线设计

近20年来，国外毫米波技术在军事上的应用引人注目。随着毫米波固态器件、超大规模集成电路和超高速集成电路的发展，将使毫米波导引头和弹载信号处理机体积更小，灵活性和实用性更强。这必然导致各种“灵巧”导弹、“末敏”炮弹大量出现在现代战场上。而对付这种“近身”威胁的办法就是发展装有毫米波共形相控阵天线、具有

快速反应能力的电子对抗设备。因此，毫米波共形相控阵天线的分析和设计成为具有很大发展潜力的研究方向。

毫米波共形天线阵的设计，需要选择合适的数值分析方法进行分析。由于直角坐标不能精确模拟曲面边界，而共形天线的边界比较复杂，因此毫米波共形天线阵数值方法的选择尤为重要。对于圆柱共形相控阵天线可以采用两类分析方法进行计算。一类基于频域矩量法，即通过导体边界条件建立表面积分方程，然后使用矩量法数值求解贴片表面感应电流。另一类以FDTD方法为基础，直接在时域求解初值问题，然后通过Fourier变换提取天线频域参数。使用频域方法时，由于涉及到圆柱分层媒质中并矢格林函数的精确计算问题而使得天线近场特性计算显得十分困难，因此不得不对特定的结构导出特殊的格林函数形式使数值计算能够进行；远场辐射特性计算由于可以通过鞍点法或最速下降法使得格林函数的计算仅限于实数域，因此一旦贴片电流确定，方向图的计算可以用通用程序实现。时域方法的优点是对于天线近场的计算避免了复杂的格林函数计算问题，只要天线的数值模型建立的足够精确，各种近场信息如输入阻抗等参数可以比较容易得到。对于辐射远场的处理，普遍采用频域或时域近远场变换的方法。

对于毫米波共形相控阵天线的设计模型，可以通过HFSS、CST等电磁仿真软件的仿真来验证。这为工程设计提供了依据，并大大减轻了工程试验的工作量，提高了工作效率，既节省了人力、物力、财力，又缩短了研制周期。

另外，由于毫米波共形天线阵元体积小，研制毫米波共形相控阵需要注意一些特殊的问题。首先，加工的精度会对天线性能有很大影响。8 mm 波段机械装配上相差百分之二毫米，相位就会相差 1° ；3 mm 波段机械精度差不到百分之一毫米，相位就会相差 1° 。这样高的加工精度给天线毫米波器件、馈线的设计和加工带来很大的困难。因此，它的关键技术之一就是如何保证每一天线单元及相关器件的相位一致性。

另外，数字式毫米波移相器国内尚未生产出来，国外处于禁运状态，如何解决毫米波数字移相器问题也是关键之一。还有，相控阵要实现波束扫描，各支路肯定要处于不同状态，这必然会引起各支路幅度上的不一致，而相控阵各支路的幅度要尽量保持一致，如何解决这个问题也是毫米波共形相控阵的技术关键。

5. 结论

本文分析了共形相控阵天线的基本原理和一些新技术特点。由此可见，共形相控阵天线研究已经初见端倪，并得到了世界各国的重视，但是其功能与性能可望有飞跃的进步。毫米波共形相控阵天线是一新兴的技术，对现有天线性能有明显的提高，将成为21世纪对抗国外军事强国需要研究的课题，因此具有广阔的军用和商用发展前景。

6. 参考文献

- [1]. Robert J Mailloux, David D Curtis, Peter G Block, Hans Steyskal. Pointing Antennas toward the future. *Journal of Electronic Defense* , 1994(6):31-38.
- [2]. B.A.Austin and Wen-chung Liu.Genetic Algorithm optimization of vehicle-mounted loop antenna for NVIS applications. *Electronic Letters*, 1999, vol 35, No 4, pp.252-253
- [3]. Huan-Wan Tseng and P.H.Pathak.A hybrid UTD-MM analysis of the radiation from a composite slot-blade cavity-backed antenna on realistic aircraft configurations. *Radio Science*, vol.34, no.3, 1999, pp.587-598

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>