

基于遗传算法的多板天线时延相位补偿技术

王 琼,林志强,秦丽平

(第二炮兵工程学院 602 教研室,陕西 西安 710025)

摘要:关于动中通系统中普遍采用抛物面天线,可使得系统小型化难度增加,为优化最佳天线方案,采用平板天线取代抛物面天线可以部分改善。为促进动中通技术在车载平台中的应用,提出了超低轮廓相控阵天线方案,使得平板相控阵天线的高度进一步降低。针对孔径效应和孔径渡越时间限制问题,给出了时延相位两级补偿的方法,有效扩展了天线系统的工作带宽;同时采用遗传算法调整天线阵因子相位,对多板相控阵天线方向图的副瓣高度实现了优化。仿真结果表明,多板天线方案可以实现性能对平板天线的逼近,并很好的适应了车载平台对天线高度的严格要求,有较高的工程实用价值。

关键词:相控阵;卫星通信;相位补偿;遗传算法

中图分类号:TN828 文献标识码:B

Compensation for Time - delay and Phase of Multi - planar Antenna SOTM Based on Genetic Algorithm

WANG Qiong, LIN Zhi - qiang, QIN Li - ping

(The 602 Staff Room of the Second Artillery Engineering Institute, Xi'an Shanxi 710025, China)

ABSTRACT: To reduce the height of the planar phased array antenna is a key problem in satellite communication on the move (SOTM). A scheme of multi - panel phased array antenna can resolve it. The method of two - class phase compensation is given in order to resolve the problems of aperture effect and aperture transition time of the phased antenna. This technique improves the bandwidth of the antenna system. The SLL of a multi - panel phased arrays is optimized by adjusting phases of sub - arrays on genetic algorithm (GA) in this paper. As a final example, the design specification for the multi - panel phased arrays is given. Successful applications show that the GA can be used as a general tool for pattern synthesis of the multi - panel phased array antenna.

KEYWORDS: Phased array; Satellite communication; Phase compensation; Genetic algorithm

1 引言

“动中通”系统是指运动中的卫星通信系统,是在运动中使车载天线实时跟踪地球同步卫星,可以实现车载卫星地球站在移动中连续不间断通信^[1],简称SOTM系统。目前,应用于“动中通”系统的天线可以分为两大类:一类是采用机械扫描体制的反射面天线;另一类是相控阵体制的平板天线。而早在二十世纪最后十年国内就提出了“动中通”,国内几家公司在基于偏馈及标准抛物面天线的“动中通”卫星通信中做出了很大努力,由于抛物面天线的高度比较高,大大影响了车辆的行驶速度和行驶范围,也限制了此类天线的应用范围。所以,探索相控阵天线和平板天线技术应用于“动中通”就显得尤为重要了。

多板相控阵天线“动中通”系统因具有低轮廓、体积小、方便装载等特点而具有广泛的应用前景,是国外动中通系统研究的主流方向。本文针对天线高度降低后带来的一些相关问题进行了深入的研究,为了解决多子阵天线孔径效应和孔径渡越时间的限制,采用了两极相位补偿机制,同时引入遗传算法,进一步优化了相位权值,有效地降低了天线方向图的副瓣高度,最终确定最佳天线设计方案。

2 相控阵天线的基本原理

设有 $M \times N$ 个辐射单元组成的矩形平面阵列,按矩形栅格状排列在 XY 平面上。沿 X 方向间距为 dx ,沿 Y 方向的间距为 dy ,第 (m, n) 个单元的位置用 (x_m, y_n) 表示, $x_m = md_x, y_n = nd_y$ 。若第 (m, n) 个单元的电流用 I_{mn} 表示,忽略阵中各单元间互耦的相互影响,则上述矩形阵的阵因子方向图(将实际辐射元用无方向性的点源来代替而形成的阵方向图)可以

表示为：

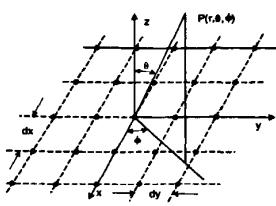


图1 二维相控阵阵列

$$F_a(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} \exp j(x_m d_x u + y_n d_y v) \quad (1)$$

式中：

$$\begin{aligned} u &= k \sin \theta \cos \phi - \beta_z \\ v &= k \sin \theta \sin \phi - \beta_y \\ \beta_z &= k_0 \sin \theta_0 \cos \phi_0 \\ \beta_y &= k_0 \sin \theta_0 \sin \phi_0 \end{aligned}$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为工作电磁波的波长, (θ_0, ϕ_0) 为空间指向坐标, (θ, ϕ) 为目标所在角坐标。

由方向图乘积原理可知^[2], 方向图是它的辐射元的方向图与阵因子的方向图的乘积。则定义方向图函数为：

$$F(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) F_a(\theta, \phi) \quad (2)$$

其中 $f(\theta, \phi)$ 为辐射单元方向图, $F_a(\theta, \phi)$ 为阵因子方向图。

由式(1)可以看出, 只需要控制相邻阵元的相移 β ($\beta = \beta_z + \beta_y$), 就可以使波束最大值指向不同的方向, 从而实现波束的二维扫描。为了获得所需相移, 可利用电控移相器, 即在每一个阵馈电网络中接入移相器。各移相器的移相量都由一波束移相控制器按特定的波束指向要求加以控制。

当天线口径照射函数为等幅分布, 即不进行幅度加权时, 有 $I_{mn} = 1$, 并设 $f(\theta, \phi) = 1$, 即天线单元是无方向性的点源, 此时平面相控阵天线方向图可以看成两个线阵方向图的乘积, 即

$$|F(\theta, \phi)| = |F_1(\theta, \phi)| \cdot |F_2(\theta, \phi)| \quad (3)$$

式中, $|F_1(\theta, \phi)|$ 是水平方向线阵的方向图, $|F_2(\theta, \phi)|$ 是垂直线阵的方向图。

3 多子阵天线孔径效应和孔径渡越时间的限制

由于子阵之间存在较大波程差 ΔL , 从而存在空间相位差, 它是与卫星信号的频率相关^[3-5]。相控阵天线实际是一个窄带系统, 因此, 如果采用传统移相器来弥补各个平板之间的空间相位差会存在如下两个问题：

3.1 相控阵天线的“孔径效应”

当采用移相器补偿各子阵天线信号之间的空间相位差, 由于传统移相器是一个独立于频率的固定值, 所以当电磁波频率在大范围内变化时, 将引起空间相位差的较大变化, 远离中心频率的边频的波束指向偏离目标。信号频率由 f_0 变成 $f_0 + \Delta f$ 后所引起的天线波束指向偏移 $\Delta\theta_0$ 为：

$$\Delta\theta_0 = -\frac{\Delta f}{f_0} \tan \theta_0 \quad (4)$$

式中, θ_0 为扫描角, $2\Delta f/f_0$ 为相对带宽。结果, 天线的增益在目标方向在工作频段内波动。

3.2 子阵天线之间的孔径渡越时间的限制

最大瞬时带宽, 除受天线波束最大值指向偏移的限制外, 还受天线子阵之间的空间渡越时间 T_A 的限制。当渡越时间 T_A 大于信号带宽 Δf_{\max} 的倒数 τ 时, 各子阵所接收到的信号将在时间上完全分开, 无法进行相加合成, 而且会造成通信时相互干扰。事实上, 由于低仰角时, 子阵之间存在较大波程差 ΔL , 使得渡越时间 T_A 大于信号带宽 Δf_{\max} 的倒数, 如果没有时延装置, 那么无法将每一个单元的信号同相相加。

为了解决上述问题, 必须采用合适的时延补偿机制来弥补各个平板之间的空间相位差。

4 多板天线的两级相位补偿技术

为了提高天线系统的带宽, 解决天线的“孔径效应”以及子阵天线之间的孔径渡越时间的限制, 必须采用群延时相同 (Ture-time delay) 的时延器件。然而, 将系统设计成真正的时延控制是非常困难的, 也是没有必要的, 因此, 只能采用两级相位补偿的方法, 即将天线的时延补偿与移相器相位补偿结合起来。如图2所示, 先让各天线板接收到的信号通过群延迟相同的延迟线进行粗补偿, 然后再经由移相器进行细补偿, 这样就能够最大限度地减少由于信号频宽造成的性能下降。在多子阵天线中, 各子阵后的延时线长度依次递增, 成等差数列 (子阵等宽时)。

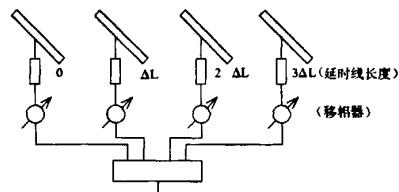


图2 两级相位补偿

4.1 延时线长度选取

为了体现延时线对天线带宽的影响, 计算了在不同频率下最低信号强度由 η_{min} 与最大天线波束指向偏移 $\Delta\theta_{max}$ 的变化曲线, 如图3、图4所示。

延时线长度的选取标准可以根据具体情况确定。本文中设延时线用来补偿天线在角度扫描范围内板间产生的相位差的均值, 设延时线的相对介电常数为 ϵ_r , 则延时线长度 L_n 满足:

$$L_n = \frac{n}{(\theta_b - \theta_a) \sqrt{\epsilon_r}} \int_{\theta_a}^{\theta_b} D \cos \theta d\theta \quad (5)$$

其中 n ($n = 0, 1, 2, 3$) 为板代号, θ_a, θ_b 分别为波束扫描上限

和下限。

为了便于计算机进行控制,时间延迟线的补偿是以二进制方式实现的,即按波长 λ 的整数倍长度的传输实现,即只能按 $m\lambda$ (m 为正整数) 来实现。这样,由于 $m\lambda$ 不一定正好与 l 完全相等,故有 l 的补偿剩余部分,即 $\Delta l = l - m\lambda$,若时间延迟线时延不够,就可以使用移相器进行补偿。

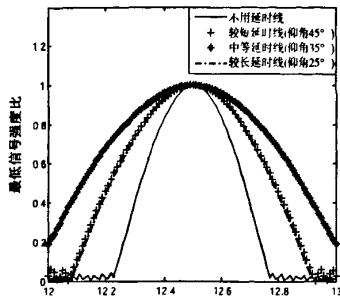


图3 不同条件下的 η_{\min} 的变化曲线

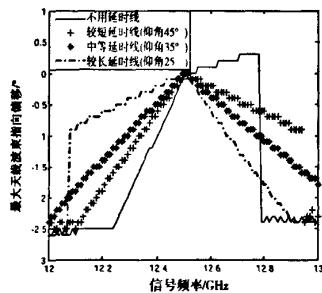


图4 不同条件下的 $\Delta\theta_{\max}$ 的变化曲线

4.2 移相器移相值计算

设各板馈电端在坐标系中的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,各板来波信号经延时线后相位与原点处来波相位差为:

$$\varphi_i = k y_i \sin \theta + k z_i \cos \theta - k \lambda \text{round}(L/\lambda) \sqrt{\epsilon}, \quad (6)$$

对于 b 为数字移相器,其相位状态应该是最小位 Δ ($\Delta = 2\pi/2^b$) 的整数倍。因此,来源信号经延时线再经移相器后的相位差为:

$$\epsilon_i = k y_i \sin \theta + k z_i \cos \theta - k \lambda \text{round}(L_i/\lambda) \sqrt{\epsilon} - \Delta \text{round}(\varphi_i/\Delta) \quad (7)$$

经过两级补偿后,相位得到了有效地补偿,但因为器件本身的原因,少量的误差仍然存在,这里为了进一步提高多板天线的性能,采用遗传算法对剩余的误差进行校正。

5 多板天线的低副瓣优化

5.1 超低轮廓阵列天线的数学模型

如图所示 5,对星仰角为 α ,板宽为 W ,板间距为 D ,来源信号在板与板之间形成的相位差为:

$$\phi_0 = k_0 D \cos \alpha \quad (8)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为来波信号的自由空间波数, λ_0 为来波信号的自由空间波长。要接收来自卫星的信号,即让天线波束指向卫星方向,必须对各板间的信号相位差 ϕ_0 进行补偿,即补偿量 $\phi_{\text{补}} = \phi_0$ 。

文中只对俯仰方向进行分析。辐射单元俯仰方向的辐射方向图为 $e(\theta)$, y 方向单元个数为 N , 单元间距 d , 则俯仰方向子阵方向图^[7]为:

$$f(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e(\theta) \exp(jknd \sin \theta) \quad (9)$$

由于天线安装在运动载体上,板俯仰角和对星仰角将随载体运动进行实时调整。但是在低于卫星仰角方向看天线板间仍然有遮挡,高于卫星仰角方向看天线板间有间隙,所以天线波瓣图分两部分:

$$F(\theta) = \begin{cases} a_0 f(\theta) + \sum_{i=1}^{L-1} a_i \exp(j\varphi_i) f'(\theta) & (\theta > 0) \\ f(\theta) \left(\sum_{i=0}^{L-1} a_i \exp(i\varphi_i) \right) & (\theta \leq 0) \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$f(\theta) = \frac{e(\theta)}{N} \sum_{n=1}^N \exp(jkn(\phi_n + \varphi_n + \sigma_n)) \quad (11)$$

$$f'(\theta) = \frac{e(\theta)}{N} \sum_{n=1}^{N'} \exp(jkn(\phi_n + \varphi_n + \sigma_n)) \quad (12)$$

为受遮挡的单板子阵方向图, $N' = N - \text{round}(dtan(\theta)/dy)$ 为被遮挡后板上的有效单元个数, L 为分板数, a_i ($i = 1, 2, \dots, L$) 为板间加权系数, ϕ_n 为延时线补偿的相位值, φ_n 移相器补偿的相位值, σ_n 为相位优化值。

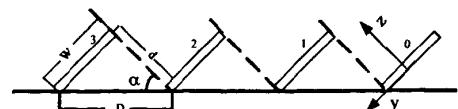


图5 多板天线示意图

5.2 遗传算法

由于天线最优问题中的目标函数或约束条件大多呈多参数、非线性、不可微甚至不连续,因此基于梯度寻优技术的传统无法有效地求得工程满意解。而 GA 是一种基于生物遗传和进化机制的适合于复杂系统优化设计的自适应概率优化技术,它具有简单、全局优化、鲁棒性强等优点,近年来被广泛的应用于电磁学领域^[8-11]。在 GA 算法中,每一个染色体的初始种群包括天线阵因子的相位权值信息,并用二进制代码表示。然后,根据每个染色体的适应度,经过选择、交叉和变异多次迭代后,用最优天线阵因子相位权值计算出天线的方向图,同时最高副瓣得到优化,最终求得最优解。

由这里给出,天线的适应度函数为:

$$\text{fitness} = \max \left\{ 20 \log_{10} \frac{|F(\theta)|}{\max |F(\theta)|} \right\} \quad (13)$$

5.3 算法仿真

仿真条件:子阵数量 $N=8$,各子阵上的阵元数 $n=4$,信号中心频率 $f=12.5\text{GHz}$,天线仰角 $\theta=0^\circ$,天线的照射函数为均匀分布。图6为未经行优化的天线方向图,图7为由遗传算法搜索到的最优天线方向图。可以看出,天线的副瓣得到有效地优化,完全满足了工程的要求。

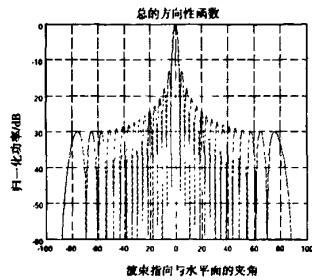


图6 未经行优化的天线方向图

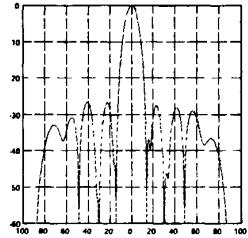


图7 优化后的天线方向图

6 结论

本文采用了多板相控阵天线的设计方案,进一步降低了天线的高度,使之更好地应用于“动中通”。由于天线应用于运动中的载体上,为了能使多子阵天线的波束方向能实时地对准卫星,各子阵的仰角必须随着对星仰角的改变而改变,天线因子之间的相位必须也随之改变,这样就严重影响了天线的性能。本文针对多板天线的孔径效应和孔径渡越时间的问题,给出了两级相位补偿方法,较好地提高了天线的带

宽。为了进一步提高天线的性能,通过遗传算法,优化天线因子的相位,通过相位的调整,有效地降低了天线方向图的副瓣高度,达到设计要求。

参考文献:

- [1] 贾勇强,黄炎. 第二代数字卫星电视系统浅析[J]. 电视技术, 2004, (12): 28-30.
- [2] 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2006. 11-19.
- [3] I Cayrefoureq, M Schaller, C Fourdin, J P Vilcot, J Harari, D Decler. Optical switch design for ture time delay array antenna [C]. IEEE, 1998, 145(1): 77-82.
- [4] M Hosseini, A Pirhadi, R Fallahi, M Hakkak. Bandwidth enhancement of a low profile antenna by applying non-uniformity to its high impedance ground plane[C]. 11th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theroy, 2005. 202-204.
- [5] Yihong Chen, Ray T Chen. A fully packaged ture time delay module for a k - band phased array antenna system demonstration[C]. IEEE, 2002, 14(18): 1175-1177.
- [6] Robert J Mailloux. 相控阵天线手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. 9-14.
- [7] J Michael Johnson, et al. Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetic[C]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, August 1997, 39(4): 10-18.
- [8] 陈国良,等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 1996. 25-40.
- [9] 王小平,曹立明. 遗传算法[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002. 60-80.

【作者简介】



王 琼(1980-),女(汉族),山西省文水人,博士研究生,主要研究领域为卫星移动通信。

林志强(1982-),男(汉族),福建人,博士研究生,主要研究领域为卫星移动通信。

秦丽平(1982-),女(汉族),安徽潜山人,硕士研究生,主要研究领域为卫星移动通信。

【作者简介】



江 冰(1960-),女(汉族),江苏常州人,河海大学常州校区计算机及信息工程学院副院长,教授,硕士生导师,主要研究方向为通信与信息系统。

曾 为(1984-),女(汉族),湖北人,河海大学常州校区硕士研究生,主要研究方向为检测技术与自动化装置。

朱成健(1984-),男(汉族),江苏人,河海大学常州校区硕士研究生,主要研究方向为通信与信息系统。

(上接第327页)

- [5] R H Kwong and E W Johnston. A variable step size LMS algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal processing, July 1992, (7): 1633-1642.
- [6] 蒋明峰,郑小林,彭承琳. 一种新的变步长LMS自适应算法及其在自适应噪声对消中的应用[J]. 信号处理, 2001, 17(3): 282-296.
- [7] 邓江波,侯新国. 一种变步长归一化LMS算法及性能分析[J]. 电声基础, 2004, 12: 4-6.

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>