

军用通信卫星多波束天线 自适应调零算法研究

童新海 王华力 甘仲民

摘要 自适应调零天线是军用卫星通信抗干扰的重要方面。本文首先指出采用自适应调零天线的必要性，讨论了星载多波束天线自适应调零的结构。然后对三种自适应调零控制算法进行了比较分析，文中还探讨了高分辨自适应多波束调零天线的结构及方法。

一、研究背景及意义

军事卫星通信系统是现代高技术战争保障通信指挥、控制和信息传递极为重要的关键性手段。但由于电子战技术的发展，军用通信卫星已不大可能会在没有干扰的现代战争环境中工作。上行干扰（包括连续波同频干扰和脉冲同频干扰）是敌方实施电子攻击的一种普遍而有效的方式，因为它可使许多链路同时受到影响。脉冲同频干扰可以采用常规的干扰对消技术解决，而功率压制式连续波干扰只能通过有效消除从天线主、副瓣区进入的干扰信号来克服。提高军用通信卫星抗干扰能力的措施是多方面的，包括卫星天线波束的可编程（跳变）覆盖、接收天线波束的自适应调零、多频段搭载以及星上处理技术等。美、英等发达国家在研制军用卫星通信系统时都特别重视卫星的“拦截获、抗干扰、抗摧毁和自适应”性能。其中接收天线波束自适应调零技术是军用通信卫星抗干扰的重要方面。天线系统能够利用方向图的变化，自适应地调整波束的零点位置，使之对准干扰源方向并降低副瓣波束电平来抑制干扰，同时保证天线主波束（信号波束）输出始终处于最佳状态。也就是说，赋予天线系统能够对正在变化着的信号环境具有自适应响应的能力。这里“变化着的信号环境”不仅指有用信号，也包括干扰信号。

为美军提供全球范围内的固定和移动终端通信服务的 DSCS-III，其主要技术特征是使用了窄覆盖的多波束天线，即一副方向可控的 61 波束的接收天线，且能自适应调零；另外还有两副方向可控的 19 波束发射天线，每副天线可以覆盖直径为 1600 公里的区域。目前美国新一代军用通信卫星 Milstar 系统采用更为先进的多口径多波束天线自适应调零技术，不仅可实现全球范围内的高增益、低旁瓣的抗干扰通信，而且能够自动在敌方干扰方向使天线波束以极高的分辨率置零，其抗干扰能力将超过现有的任何卫星。

由于历史和技术原因，我国目前使用的军用卫星通信系统主要采用民用通信体制，缺乏有效的星上（也包括地面设备）抗干扰手段，难以适应现代高技术条件下的局部战争对军用卫星通信的要求。如何采取有效的抗干扰技术措施，已是我国研制新一代军用卫星通信系统时必须解决的一个重大课题，其中研究和开发星载自适应调零多波束天线技术，对提高我国军用通信卫星的抗干扰水平有着极其重要的实用价值。

二、多波束调零天线结构

星载多波束天线通常是把馈源阵列置于反射面或透镜天线的焦平面，控制馈源与焦点的相对位置，由偏焦的各个馈源形成相应的单波束；通过波束形成网络形成一个赋形波束覆盖整个空域。与一般的赋形天线相比，多波束天线在波束形成方面有着很大的灵活性，多波束天线较普通的单波束天线要复杂许多，它不仅要求各波束都有高的增益，同时还要求高的覆盖电平（即两波束相交处电平较高）及低的旁瓣电平。

军用卫星通信系统要的多波束自适应调零天线系统组成如图 1 所示。主要单元包括：(1) 多波束天线；(2) 多通道信道接收机；(3) 数字波束形成 (DBF) 网络和 (4) 自适应处理器。DBF 的作用就是通过将各个波束加权求和之后，在输出形成一个具有干扰零陷的抽象波束，等效为接收天线的波束形状产生自适应变化。而自适应处理器利用选定的算法来调整波束形成网络中的可变加权系数，它是整个系统的核心，也是我们讨论的重点。

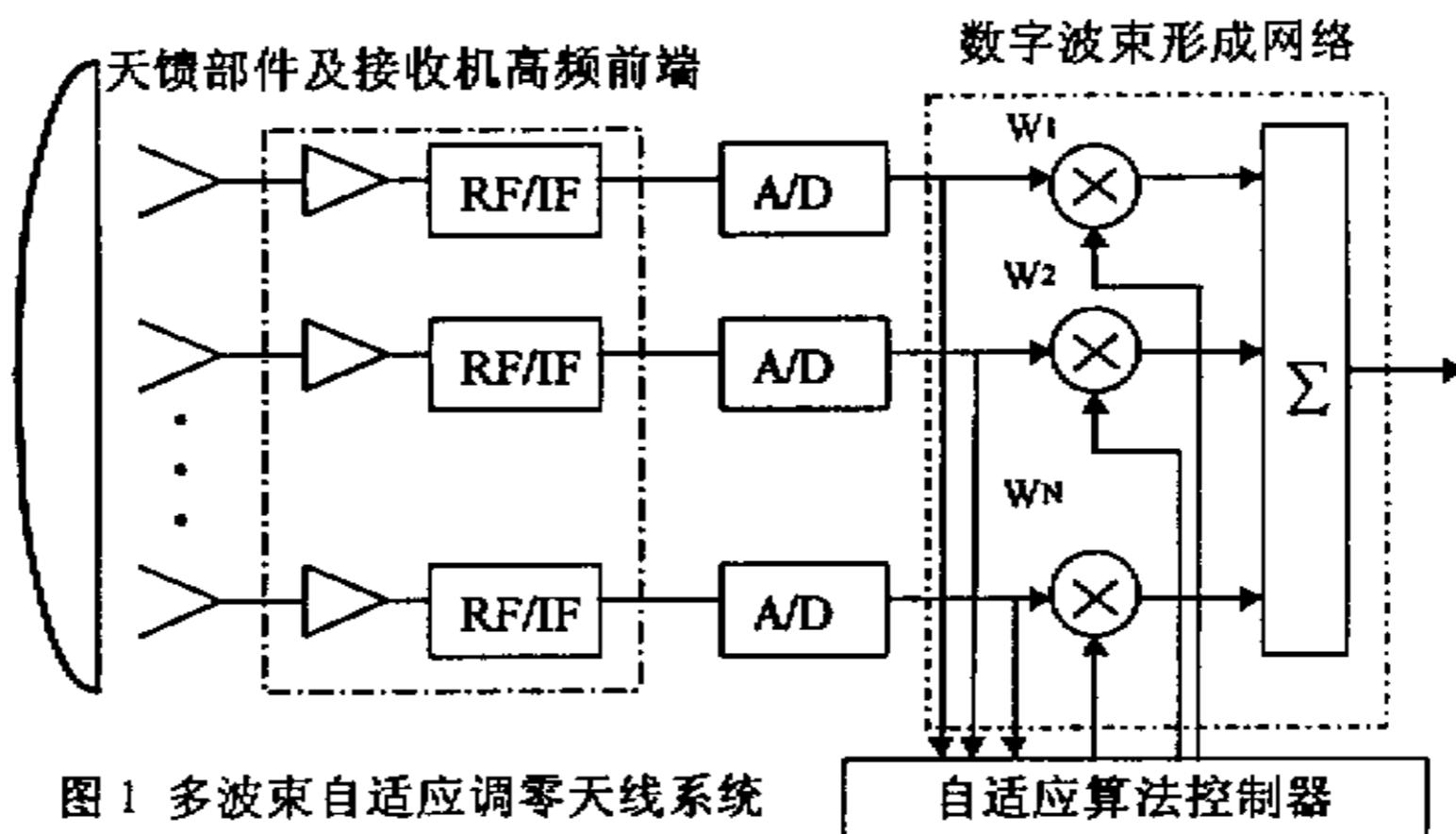


图 1 多波束自适应调零天线系统

三、自适应调零控制算法

自适应天线的自适应能力是通过自适应控制的算法来实现的，通常自适应算法可分为两类 (1) 反馈或闭环法和 (2) 直接求解或开环法。一般来讲，闭环算法相对简单且实现代价较小，但它们收敛到稳态解的速度较慢；而直接求解法虽然收敛速度较快，但受到求解的数值精度限制。下面将具讨论几种算法。

1. LMS 算法

在解决自适应阵权值调整所提出的控制问题中，最小均方 (LMS) 算法是一种受到广泛应用的方法，原因是它比较简单明了。Widrow 基于多数情况下人们对有用信号具备某些先验知识的事实，提出在接收系统中设置本地参考信号（与有用信号具有较大相关性），调整阵列加权系数，使阵列输出与参考信号的误差均方值最小。LMS 算法是将最陡下降法应用于 MSE 性能量度。

LMS 算法要求产生一个参考信号，以便它与阵输出比较而形成误差信号。在实际应用中，自适应阵需要预先知道所接收信号的方向特性和频谱特性都是有一定困难的。其原因为：

(1) 自适应阵的各加权系数均为随机过程，它们会对所需的有用信号产生调制，因此所

需信号的波形或自适应算法必须选择得使这种调制不致损伤通信系统的有效性。

(2) 所需信号波形与干扰信号波形必须在某一方面不同，以便使设计者能够利用这种不同性使自适应阵能够鉴别出这两类信号。

(3) 必须有可行的参考信号实际产生办法，参考信号并不是所需信号的完全复制，但它必须与阵输出处的所需信号紧密相关，且与阵输出处的干扰信号不相关。

Griffiths 曾提出一种改进的 LMS 算法，这种算法虽不再要求事先知道期望信号，但却要事先知道输入信号矢量 $x(k)$ 与期望信号 $d(k)$ 的互相关矢量 r_{xd} ，这仍是困难的。因此，Frost 进一步提出了线性约束 LMS 算法，它将一些约束条件（如在自适应处理过程中要求保持某些主波束特性，以避免发生有用信号的畸变）加在自适应权上。由于阵在特定方向（称为“观察方向”）的空间频率响应特性（波束方向图）与自适应权矢量间存在一定的关系，该算法能够在保持选定的观察方向空间频率响应的同时，使输出噪声功率最小。

2. SMI 算法

LMS 算法虽然比较简单，但阵列接收信号的协方差矩阵直接影响着算法的性能。当阵列协方差矩阵诸特征值大小存在数量级的差别时，就可能使自适应权矢量收敛很慢，因此简单的算法有不利的一面。在许多应用中，自适应阵的效能，密切地依赖于它所能达到的收敛速率。例如，当自适应雷达要求同时抑制干扰和杂波并提供台架运动自动补偿时，快速收敛到稳态解就是基本的要求。加速收敛和克服收敛速率依赖于特征值分布的缺点的一种办法，是基于信号环境的取样协方差矩阵，通过采样矩阵求逆法 (SMI) 计算自适应权。它是通过对阵列协方差矩阵的直接求解来获得自适应权系数的。根据维纳解的结果，最优权矢量可以表达为 $\hat{W}_{OPT} = \hat{R}_{xx}^{-1} \hat{r}_{xd}$ ， \hat{R}_{xx} 为阵列协方差矩阵 \hat{R}_{xx} 的估计， \hat{r}_{xd} 是互相关矢量 r_{xd} 的估计。研究表明：只要取样协方差矩阵的特征值散布度小于某个临界值（取决于计算机中运算所需矩阵求逆的资用比特数），SMI 便不敏感于特征值散布度。一超过临界值，算法性能就产生恶化。

3. RLS 算法

表 1 自适应处理算法的比较

	LMS	SMI	RLS
基本原理	最陡下降，闭环	阵列协方差矩阵的直接估计，开环	类似 Kalman 滤波方法的数据加权，闭环
瞬态响应	对于大量应用，其失调与收敛速率的折衷是可以接受	达到满意的失调与收敛速率折衷条件下的最快收敛	优于 SMI
优点	易于实现，需 N 个相关器和积分器，容许硬件误差	与特征值散布无关的最快收敛速率	同 SMI，易于进行不同的数据加权预处理
缺点	收敛速率对协方差矩阵的特征值散布敏感	需用 $N(N+2)/2$ 个相关器，矩阵求逆需要 $N^{3/2+N/2}$ 次足够精度的复数乘法运算	需用 $N(N+2)/2$ 个相关器，计算量大
计算量	正比于 N	正比于 N 立方	正比于 N 平方

SMI 算法虽然有效克服了 LMS 算法的缺点，可是算法复杂性以及矩阵求逆运算可能出现

的“病态”仍是面临的问题。与计算量仅为 $O(N)$ 的 LMS 算法相比，其计算复杂度为 $O(N^3)$ 。所以阵列单元数目（即信号矢量维数）将直接影响 SMI 方法的可行性。因此有必要寻找具有更好的性能和计算量折衷的算法。研究表明，递推最小二乘（RLS）算法比其他方法具有更好的数值性能。该算法与 Kalman 滤波方法有着密切的联系。

不同于 LMS 算法所采用的最小均方误差准则，也不同于直接从最优维纳解出发的 SMI 算法，RLS 算法是基于使每一快拍的阵列输出误差平方和最小的准则，即最小二乘（LS）准则。为了避免直接计算方法所需的矩阵求逆运算，RLS 算法是利用递推方法来完成矩阵求逆运算。

RLS 算法在收敛速率和特征值散布度的关系上具有与 SMI 算法一样的不敏感性，与 SMI 算法的主要差别是矩阵求逆计算方法的不同。与 LMS 算法相比，RLS 算法能够实现更好的收敛速率与计算复杂性的折衷，且比较适合快速时变的场合，成为人们乐意选用的自适应算法。表 1 给出了以上三种算法的比较。

四、高分辨自适应调零结构

前面讨论的自适应调零控制算法是通过调整权系数希望的响应方向上提供最大的增益而在干扰方向的响应却很小，这种方法虽然简单，易于实现，却存在着很大的局限性，它是采用旁瓣对消方法来抑制自主波束附近或副瓣方向进入的强干扰信号，难以对付从天线主瓣进入的强干扰信号。但在现实环境中（特别是根据空地一体化的作战原则，战斗部队将分散在整个作战地区的“分地”内，中间隔着敌方部队或不可控制的地区。在这些“分地”外部，敌方部队都有可能干扰卫星通信系统），干扰信号很可能与有用信号同时处于天线波束的主瓣区域，此时常规星载多波束自适应调零天线系统就难以胜任，解决的途径就是要提高天线系统的分辨能力。

以现代谱分析为基础的超分辨阵列信号处理技术，目的在于解决密集信号环境中多个信号源的高分辨和精度测向定位问题。利用信号处理的超分辨谱估计技术来提高自适应调零多波束天线系统的空间分辨性能可以有效地抑制波束内的邻近干扰。目前国外已有将超分辨处理技术应用于星载多波束天线的研究报道，应引起我们足够的重视。

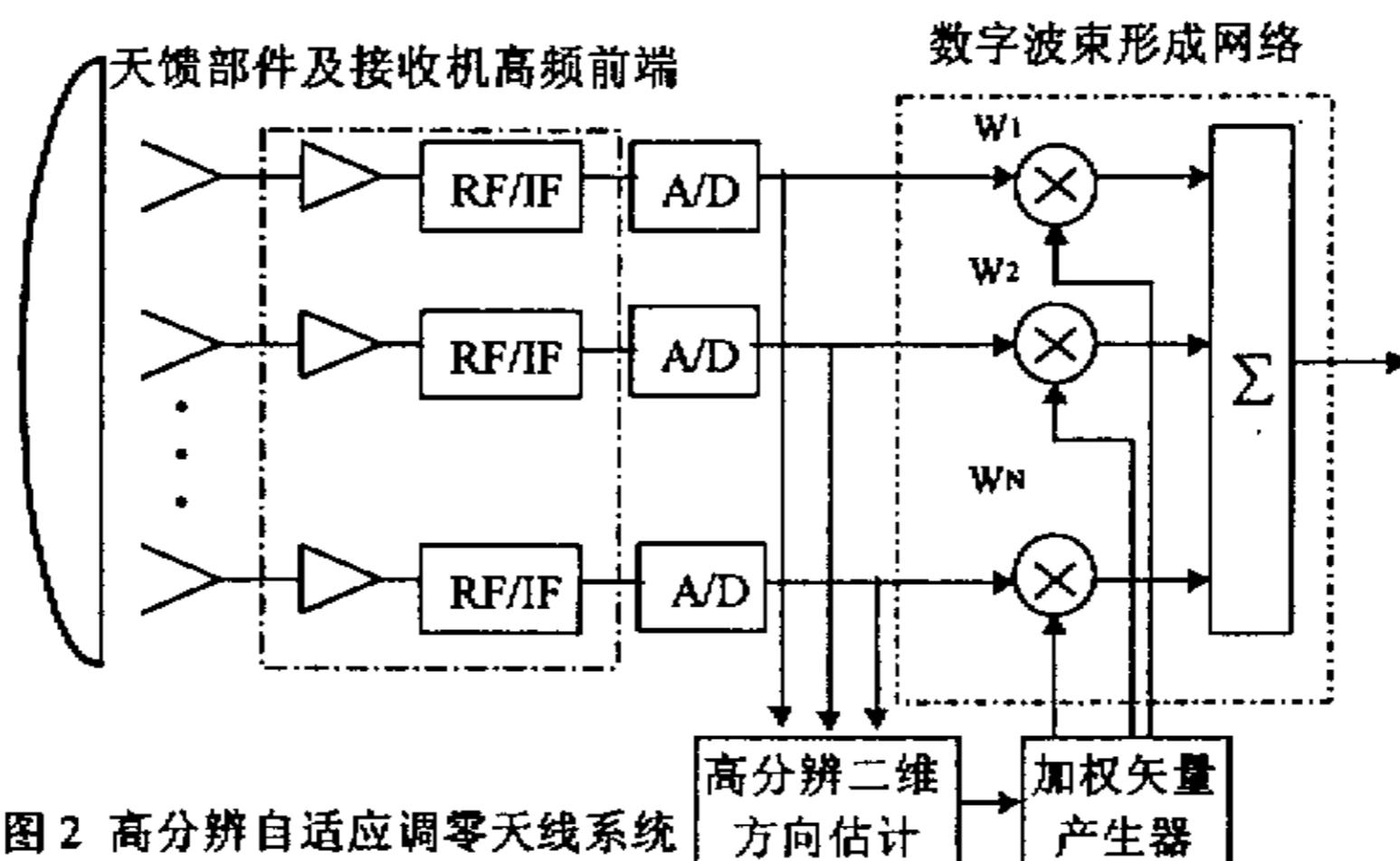


图 2 高分辨自适应调零天线系统

图 2 高分辨自适应调零天线系统

图2所示的是一高分辨自适应调零天线结构框图，其工作过程如下：（1）将多波束天线接收的N路信号进行高分辨二维（方位角和仰角）方向估计获得信号和干扰的方向信息；（2）区分信号方向和干扰方向；（3）将信号方向的输出约束为所需值，而将干扰方向的输出约束为零；（4）计算波束加权矢量；（5）由波束加权矢量对N个波束进行加权求和。

这种方案利用了高分辨方向估计和自适应数字波束形成的有关成果，具有空间分辨力高、抗干扰零陷深和不存在收敛问题等突出优点，适用于强干扰威胁的环境，其中正确估计干扰方向是成功调零的关键，其相应算法有MUSIC、MN、ML等。

五、结束语

自适应调零多波束天线是利用空间特性来改进接收系统输出的信噪比，与在信号波形设计上采用的扩展频谱抗干扰技术相比，它具有特别强的抗干扰能力。为适应未来高技术条件下局部战争对卫星通信的需求，重点保证领土、领海及周边地区作战的通信指挥，应该是我国研制星载自适应调零多波束天线系统的根本出发点。结合国外在这一领域的发展动态，力争做到既具有技术先进性，又切实可行，在技术和经济条件允许时，建设我们自己的具有比较完备抗干扰功能的军事卫星系统。

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>