

通信卫星自适应调零多波束天线系统现状研究

王俊敏 张立峰

中国人民解放军 62315 部队, 北京 100000

[摘要] 自适应调零多波束天线系统在我国通信卫星中得到广泛的应用, 随着相关科研工作的推进, 多波束天线系统在功能、性质上衍生出一些新的理论经验, 文章对通信卫星自适应调零多波束天线系统的相关理论进行阐述, 并对其发展现状进行分析。总结技术发展成果, 研究自适应调零多波束天线系统算法的实现过程, 供相关研究人员借鉴参考。

[关键词] 通信卫星; 多波束; 自适应调零

DOI: 10.33142/sca.v2i8.1218

中图分类号: TN927

文献标识码: A

Research on Current Situation of Adaptive Zeroing Multibeam Antenna System for Communication Satellite

WANG Junmin, ZHANG Lifeng

People's Liberation Army of China 62315, Beijing, 100000, China

Abstract: Adaptive zeroing multibeam antenna system has been widely used in communication satellites in China. Multibeam antenna system has derived some new theoretical experience in function and nature with advancement of related scientific research. This paper expounds relevant theory of adaptive zeroing multibeam antenna system of communication satellites, analyzes its development status, summarizes development of technology and studies realization process of algorithm of adaptive zeroing multibeam antenna system for reference of relevant researchers.

Keywords: communication satellite; multibeam; adaptive zeroing

引言

自适应调零天线的主要功能优势为抗干扰, 其作用原理是可在干扰来源的方向上形成波束零陷, 在有效防止卫星系统受到干扰影响的同时, 其本身又不会对卫星运行产生负面影响。在卫星系统当中, 对信号接收灵敏度及抗干扰能力的要求非常高, 因此一般采用多波束天线系统。

1 通信卫星自适应调零多波束天线系统理论

1.1 通信卫星自适应调零多波束天线系统

对卫星系统的最基本要求就是, 既要实现信号的增强, 又可针对性的抑制干扰信号, 因此选用可实现以上要求的自适应调零多波束天线系统。该系统的主要组成包括多波束天线、DBF 网络、多通道信号接收机以及自适应处理器四部分。其中 DBF 网络和自适应处理器为核心。DBF 可利用来自自适应处理器的加权系数, 对各个波束进行加权求和。将带有干扰的零陷抽象波束转化为接收天线的波束形状, 并进行自适应处理。而自适应处理器借助既定的算法对多波束的加权系数进行调整, 主要包括信号处理器及自适应算法控制器两个结构, 是天线系统的核心部分。

1.2 自适应调零多波束天线的算法

自适应调零多波束天线功能的实现依托既定的算法, 算法有开环和闭环之分。其中, 闭环算法的实现比较简单, 所需的成本较低, 但带来的收敛速度不理想。开环算法的收敛速度更高, 但计算的精确度难以保证。本文主要对开环进行研究。常见的算法包括最小均方误差法、直接取样矩阵求逆法和递归最小二乘法三种。

2 通信卫星自适应调零多波束天线系统现状

2.1 开环自适应调零多波束天线系统算法实现

2.1.1 信号处理机设计

通信卫星天线系统中雷达接收机的作用是在微波、射频、中频等频段, 对雷达回波信号进行处理, 放大信号噪声、转换信号频率, 通过一定的调节过程输出回波信号^[1]。以上处理过程均需要在基带的范围内进行。20 世纪左右, 雷达接收机的信号处理就能实现数字化, 随着科技的进一步发展, 中频的信号的处理也已实现数字化。利用数字化技术, 还可对回波信号的频率、增益、基带等进行调整。信号处理机设计在雷达接收机的后方, 其数字化特征也越来越明显,

逐渐具备接收机的功能。开环自适应调零多波束天线系统的处理机可被分成预处理和信号处理两个模块。由预处理模块进行数据的采集、误差矫正等，再将这些经初步处理的信号传输至信号处理模块，进行信号的测向并计算自适应调零的权数，输出数字波束。信号处理机安装 DSP 和 FPGA 芯片，分别用来实时计算和信号预处理与通信控制。

2.1.2 信号预处理模块设计

预处理模块的工作流程为：对来自模拟接收机的数据进行采样，由数据采集模块判断数据采样是否需要后期处理。利用数据正交插值将数据处理为 I、Q 数据，经过误差处理模块的校正，完成整个预处理过程。

(1) 模数转换器

模数转换器处于信号处理机的前端，用以分隔模拟电路和数字电路，经过模数转换器的处理，可将数字信号转化为对应速率和波长的信号。此过程中，保证信号转换的真实性、安全性和实时性最为重要。模数转换器的类型较多，可结合雷达接收机的性质选择相关参数。调制信号的宽带要小于载波频率，为准确恢复载波上的调制信息，因此要求采样频率必须与采样定理的要求相一致，以便得到准确的恢复信息。保证芯片内部放大缓冲器以及采样保持器的运行质量，可有效降低信号处理过程中的运算压力。

(2) 带通采样定理

射频信号经过滤波、放大等处理并经过 ADC，可被 FPGA 控制。若进行低通信号采样，要求采样频率高于输入信号最高频率的 2 倍。若最高频与信号宽带之间的差距过大，就会导致采样频率极高，提高芯片成本。以上问题需要依靠带通采样定理来解决。带通采样定理可用以下公式表示：

$$\textcircled{1} \quad \frac{2f_H}{M} \leq f_s \leq \frac{2f_L}{M-1} ;$$

$$\textcircled{2} \quad f_s = \frac{4f_0}{2M-1} .$$

其中， f_s 表示带通采样频率； f_H 为带通信号的频率上限； f_L 为带通信号的频率下限； f_0 为带通信号的中心频率； B 为频带宽度。令 $f_s=2B$ ，得出 M 值。利用 M 值频率进行采样，可避免频谱混叠的问题。

(3) 数字正交鉴相器

该设备用于处理正交误差、幅度不均衡的问题，其基本原理是：使用数字正交鉴相器对采集到的数据做正交插值处理，将 I 和 Q 分离，得到需要的正交双通道数据。中频模拟信号经 ADC 的处理后被转化为数字信号，利用鉴相器进行调整，发生混频。尤其是带通采样可获得信号基带，但 I、Q 未被分开。若信号载频与采样频率相关，参考信号的数值由 0、1、-1 组成，通过数字的计算即可实现 I、Q 的分离^[2]。上述过程数字鉴相器的状态为无混频，其作用效果与混频相同。数字正交鉴相器的应用可显著提高信号质量，为之后的信号处理奠定基础。

(4) 幅相误差校正

卫星通信的雷达系统多为多通道接收形式，例如三通道单脉冲测角、数字多波束等接收形式。自适应调零多波束天线技术虽然存在诸多不可替代的优势，但这些优势的发挥需要建立在信号无失误传输的基础上，传输通道的幅相误差会严重影响波束的形成。幅相误差校正可使用硬件补偿的形式，也可利用 FPGA 软件进行处理。在开环系统中，数据经处理机处理被传输至 DSP，在此对数据进行计算并换频。选取通道中的一组数据为标准，记录当前的普峰值及频点。在标准通道与其他通道普峰值之间作除法，将计算结果归一并存储在 FPGA 当中。此被存储的数据即为校正权系数。当多波束天线系统正常运行时，以来自 FPGA 的校正权系数乘以通道基带，即可对误差进行校正。误差校正的流程为输入 FPGA 采集的数据——将定点数转化为浮点数——复数据 FFT 运算——谱峰搜索——权值校正计算——将校正值存入 FLASH。整个过程在测量通道的幅相误差的核心程序中进行。

2.1.3 信号处理模块设计

自适应调零多波束天线系统调零算法一般在 DSP 芯片中进行。信号处理机硬件的设计方案介绍如下：第一，分析目标运算量、存储量和能耗。第二，确定芯片型号、数量和外部存储器的型号。第三，为各个芯片设计对应的功能，确定数据传输方式。第四，设计外围电路及芯片连接形式。第五，进行加载调试。若单一 DSP 芯片无法满足卫星运行的需求，可适当增加芯片数量加以配合。DSP 芯片的连接方式分为两种：(1) 采用芯片的链路口进行连接，并将外部总线当做各芯片存储器的总线。采用该方法进行连接，可控制不同芯片之间耦合作用的程度，扩展性更佳，运算能力有

所保证。(2) 利用外部总线进行连接, 共享总线的外部存储器和芯片的内部存储器。相比较之下, 该种连接方式的耦合作用明显。军用卫星通信读取信息的过程中, 通过总线进行访问的速度最快, 因此总线连接的方式可提供更高的数据传输、转换速率。其原因是总线连接的存储器相互共享, 可一步读取完成, 而链路口连接的方式数据需先到达指定的存储器内。但是总线连接方式对总线的依赖程度过高, 当数据处理频率显著上升时, 总线就会出现一定的限制^[3]。因此两种方法需根据情况配合使用。若系统要求高运算速度, 可将芯片分组, 并以组为单位在使用链路口的方式进行连接, 可有效提高系统运行效率。

2.2 自适应调零多波束天线系统研究现状简介

2.2.1 区域覆盖范围优化设计

结合通信卫星对覆盖区域的要求, 对多波束天线的覆盖范围进行优化, 通过大量实验研究, 选择将覆盖方式设计为蜂窝型。主要的计算方法为混合差分法, 构建两个优化模型, 并进行交互求解, 使系统优化更为简便。研究结果表明, 使用 62 个波束可实现对目标区域的无缝隙覆盖, 波束覆盖电平值可达到 41dB, 同频复用波束载干比也超过 12dB。

2.2.2 系统连接关系优化设计

优化系统连接关系的主要目的是提高多波束天线系统的功率调配性能。利用新型排列组合差分的方法, 计算不同规模下多波束天线系统对应的连接关系, 找出最佳的设计方案。

3 结语

自适应调零多波束天线是卫星通信领域研究的重要课题之一, 在军卫星中有着十分重要的研究意义。本文对自适应调零多波束天线系统及相关算法进行介绍, 研究自适应调零多波束天线的算法实现过程以及当前的研究成果。目前, 我国有关自适应调零多波束天线系统的研究大多停留在理论层面, 随着研究的进一步深入, 相信该技术会在实践中有更广范的应用。

[参考文献]

- [1]王磊, 周国印, 黄华东, 等. X 波段高隔离度双信道多波束天线系统实现[J]. 无线电工程, 2018(10): 883-889.
- [2]王继业, 喻火根. 基于模糊逻辑的 GEO 多波束卫星移动通信系统切换策略研究[J]. 通信技术, 2017(10): 6.
- [3]孟文超, 段红光. GEO 多波束卫星移动通信系统多址方式选择的研究[J]. 现代电信科技, 2013(10): 17-20.

作者简介: 王俊敏, 女, 北京, 从事专业方向通信工程、卫星、程控设备等。张立峰: 男, 北京, 从事专业方向卫星通信工程专业。