

巨型数字阵列光传输系统设计

王查散,王东岳,高文辉

(南京电子技术研究所,江苏 南京 210039)

摘要:光传输技术是数字阵列雷达系统中的重要技术,主要实现高精度的定时同步和高速海量的数据传输。巨型数字阵列由于阵面规模大、组件数量多,加大了光传输系统设计的技术复杂度和工程实现难度。文中首先分析了巨型数字阵列信号传输的特点和具体要求,给出了巨型数字阵列光传输系统的设计方案和技术途径,对系统中的光纤传输网络、高速串行传输和系统测试等关键技术进行了详细分析,通过采用 PON、SERDES 等多项先进技术解决了设计中的技术难点,最终实现了巨型数字阵列的光传输系统设计。

关键词:巨型数字阵列;光传输;PON;SERDES

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)08-0242-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.08.062

Design of Huge-DAR Fiber-optic Transmission System

WANG Cha-san, WANG Dong-yue, GAO Wen-hui

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Optical transmission technology is an important technique of digital array radar system, it is mainly to realize high-precision timing synchronization and high-speed and massive amounts of data transmission. Due to some characteristics including large scale and more components of giant digital array, technical complexity and engineering realized difficulties of system design for optical transmission have been widely increased. First analyze the signal transmission characteristics and some specific requirements of giant digital array, then put forward the design schemes and the technological approaches of optical transmission design, next analyze some key techniques including optical fiber transmission network, high-speed serial transmission, system testing and so forth in detail, meanwhile, solve the technical difficulties of design by adopting PON, SERDES and many advanced technologies, finally realize the system design of optical transmission for giant digital array.

Key words: giant digital array; optical transmission; PON; SERDES

0 引言

自 20 世纪 70 年代第一根低损耗光纤问世以后,光传输技术得到了飞速发展,无处不在的光传输系统使得人们身处其中的社会已逐渐成为信息社会,由于光纤具有传输距离远、信号带宽大、可重构性强等优点和良好的抗电磁干扰性能,光传输技术在雷达上的应用越来越广泛^[1],尤其在数字阵列雷达中几乎是雷达信号传输不可或缺的技术手段^[2]。

随着数字阵列^[3]、双/多基地等雷达系统的快速发展,高精度的定时信号同步、高速海量的数据传输对光传输系统提出了越来越高的技术需求,而国内外导弹防御系统的一体化建设也导致雷达系统的规模越来越大,具备预警、探测、识别和跟踪功能的相控阵天线采

用了数千甚至上万路数字通道构成的巨型数字阵列,此时光传输系统的设计不仅要考虑传输技术的可行性,还要综合考虑链路中光网络^[4]设备的可实现性。文中详细分析了巨型数字阵列信号传输的技术需求,给出了完整的数字阵列光传输系统实现方案。

1 巨型数字阵列光传输系统要求

一个典型的数字阵列组成框图如图 1 所示。其主要部件包括数字收发组件(DTRU)、雷达控制器、数字波束形成系统和相应的传输网络。雷达系统发射时,由雷达控制器产生定时信号和控制指令经传输网络传输到各个 DTRU, DTRU 根据指令产生一定频率、相位、幅度的射频信号输出至对应的天线单元,最后由各

收稿日期:2012-11-01

修回日期:2013-02-20

网络出版时间:2013-04-22

基金项目:2010 江苏省科技支撑计划(编号略)

作者简介:王查散(1970-),男,江苏睢宁人,研究员级高工,研究方向为相控阵雷达阵列控制和光纤传输。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130422.1727.053.html>

单元的辐射信号在空间合成所需的发射方向图;接收时,每个 DTRU 接收天线各单元的微波信号,经过下变频、中频 AD 采样处理后输出 I/Q 回波信号,经传输网络至数字波束形成系统处理后形成波束。

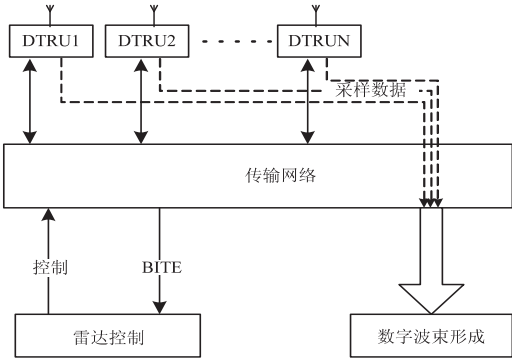


图 1 数字阵列组成框图

以战略预警雷达为代表的新一代雷达系统均采用了具有灵活性、模块化、可扩展性和高性能的数字阵列雷达,其数字收发组件(DTRU)的数量可达数千甚至上万,要实现如此超大规模的巨型数字阵列的实时控制和海量数据传输,光传输系统在方案设计和工程实现等技术领域都面临巨大的挑战。

首先,巨型数字阵列需要更高精度的定时同步。数字收发组件发射波束形成是由定时同步脉冲触发 DDS 产生的,为了实现发射波束空间相干合成,能量叠加,理论上要求系统送到各个数字收发组件的触发脉冲“严格”同步。从工程可实现性角度看,同步触发脉冲的相对延时与抖动度应当被限制在一个精确的纳秒级范围,否则将使系统无法稳定工作。

其次,巨型数字阵列需要完成海量数据传输。由于采用了全数字单元,同一时刻数千路数字通道的 AD 采样数据将达到惊人的 Tbps 量级,为实现稳定的数字波束形成,如此海量的数据必须满足可靠的高速传输,其传输误码率要求低于 10⁻¹¹,这对传输链路提出了极高的要求。

最后,巨型数字阵列规模宏大,需要完成数千数字单元的控制和数据传输,对信号传输的稳定性、实时性、同步性等指标有着很高的要求,同时也要求具备高度的智能化和灵活性,这不仅给系统的方案设计和工程实现带来了很大的困难,同时对整个巨型数字阵列的调试、测试和维护都带来了前所未有的难题。

2 光传输系统设计

基于超大规模数字集成电路、多元件 T/R 模块、SOC 芯片及光纤技术是数字阵列雷达高速发展的技术基础,在光传输系统的设计中正是融合了当今成熟的高速串行传输、光纤通信等先进技术,才能满足巨型数字阵列的应用需求。另一方面也要看到,由于光传

输系统的设计关系到传输、光纤、光学和光通信^[5]等多个方面的知识,任何一个环节设计上的疏忽或错误都将导致整个系统指标性能的下降或不稳定。

针对巨型数字阵列同步精度高、传输数据多、系统规模大等特点,光传输系统采用了 Top-Down 的设计方法,首先进行顶层的系统架构设计,然后再对底层具体的传输协议、拓扑结构进行详细设计。

2.1 系统架构设计

从图 1 的数字阵列组成框图中可以看出,光传输系统需要完成上行的控制指令和定时信号的广播式传输和下行海量采样数据的点对点传输,虽然传输路径相对复杂,但仍然可将其看成是一个简单的互联系统,并以开放系统互连参考模型 OSI 为基本框架,根据数字阵列的应用需要施加自主的通信协议。根据数字阵列光传输系统的特点,其基本框架由物理层、数据链路层和应用层组成。对应关系如表 1 所示。

表 1 光传输系统基本框架组成表

| 序号 | OSI 模型 | 光传输系统 | 对应关系 |
|----|--------|--------|-------------------|
| 1 | 物理层 | 传输网络 | 光纤传输网络 |
| 2 | 数据链路层 | 传输协议 | 高速串行互连 |
| 3 | 应用层 | 数字阵列部件 | 雷达控制器、数字波束形成、DTRU |

光传输系统应用了 OSI 模型的三层,省略了 OSI 参考模型中的 3~6 层,第 1 层定义了物理的传输特性,第 2 层定义了传输协议,第 3 层定义了应用功能。

物理层^[6]:采用光纤传输网络构成系统的物理通道,光纤传输网络一般包括光纤光缆,光放大器、光开关等光有源设备,光功分器和光连接器等光无源设备。在进行光纤传输网络设计之前,必须了解和熟悉链路中每个元件的工作原理、工作特性以及元件的特性如何影响系统的整体性能,然后才能根据应用需求进行整个拓扑结构的设计及元件选型。

数据链路层:在光传输系统中,数据链路层是整个光传输系统的设计核心,数据链路层采用了高速串行互连技术,在应用层各部件之间通过物理层的光纤传输系统实现了控制信号的实时高精度传输及海量数据的可靠性传输。

应用层:在光传输^[7]系统中分别对雷达控制器、数字波束形成和 DTRU 设计了用于交换信息的一组功能或服务,通过自定义的数据格式实现高速数据交换。

2.2 光纤传输网络设计

根据巨型数字阵列应用的需求和特点,光纤传输网络可分为数据网络和控制网络。数据网络以数据传递为目的,实现海量采样数据的可靠性传输,控制网络是以传递信息和状态为目的,实现巨型阵列的分布式控制。图 2 为光纤传输网络的系统组成框图。

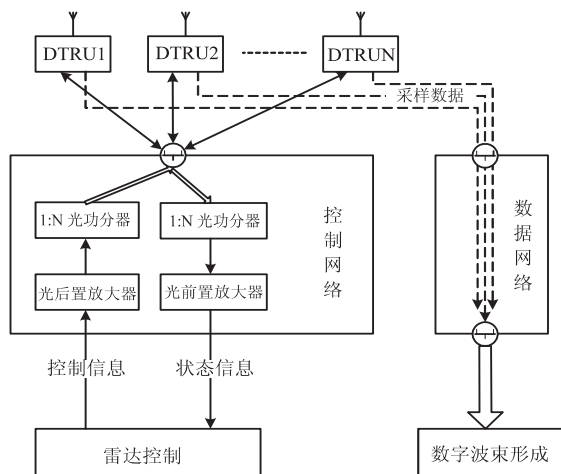


图2 光纤传输系统组成框图

PON(无源光网络)^[8]系统具备高安全性、高经济性以及具备组播业务支持及端到端管理能力的综合承载能力,已经成为下一代互联网的核心网络技术,得到了广泛的关注和应用,其下行的一点到多点的广播式技术和上行的时分多址(TDMA)技术完全适用于数字阵列中的控制网络,由于巨型数字阵列的DTRU数量巨大,光功分器经过多级分光后光功率已无法满足要求,所以在控制网络的设计中采用了PON加光放大器的方案,既简化了系统架构,又提高了系统可靠性。

在巨型阵列中,控制网络的分布节点多达数百甚至上千,为了实现严格的同步,尽量减少信号重构带来的抖动,在雷达控制和DTRU之间建立一个全光网络,设计要点如下:

1)为实现光信号^[9]的有效放大和功分,传输模式采用1550nm单模光纤,既可利用1550nm最低损耗窗口,又能被具有高增益、宽带宽和低噪声的全光放大器EDFA(掺铒光纤放大器)高效放大;光功分器采用了PON系统中广泛应用的基于平面波导技术的光功率分配器;

2)光纤放大器^[10]解决了衰减和损耗对光网络传输速率与距离的限制,在波分复用传输、全光网络传输、CATA等系统中得到了大量应用。在控制网络中一方面作为功率放大器(后置放大器)用以提高输出光功率实现分布式传输,另一方面作为前置放大器,提高接收系统灵敏度,实现BITE信息的时分多址接收。在实际应用中还需注意对后置放大器输出功率的控制,避免因功率过大带来的非线性影响导致系统的不稳定,对前置放大器则要注意对滤波器的选择,以免因为信噪比不够导致误码率过高。

数据网络传输的是点到点的AD采样数据,物理形式上是多点到一点的拓扑结构,所以在传输根部的数字波束形成系统会产生海量的数据集束,高密度的光连接器和多路合一光模块是实现物理接入的关键,

同时,由于巨型阵面采用了模块化设计,其数据网络的光纤光缆要经过多次、多路径转接,所以在进行数据网络设计时需注意以下几点:

1)为实现高速大量的数据传输,有效利用成熟高速高密度光模块,传输模式采用850nm多模光纤,为保证可靠性,采用具有较高机械强度、弯曲不敏感和随温度变化附加损耗小的室外光缆,还要满足尺寸小、柔韧、防火、防动物撕咬等要求;

2)在光纤系统中,链路中的所有部件总损耗必须足够小,以确保有足够的功率到达光接收模块。对于数据网络,足够的功率则是低误码率的保证,基于误码率对入射功率值微小变化的敏感性,设计中一方面要尽量提高DTRU的光模块发射功率和数字波束形成光接收模块的灵敏度,另一方面要尽可能减少转接环节,减少光连接器的插入损耗。

2.3 高速串行通信

在雷达控制、数字波束形成和DTRU之间建立了全光网络后,主要用于光纤通信^[11]的串行通信技术—SERDES技术^[12]也成了巨型数字阵列传输系统的关键技术,这种时分多路复用(TDM)、点对点的通信技术,充分利用了光纤的信道容量,减少所需的传输信道,实现了巨型数字阵列控制指令和定时信号的广播式传输和海量采样数据的点对点传输。

由于SERDES接口的广泛应用,现在许多高端的FPGA都内嵌了基于商业化IP模块的SERDES接口硬核,如Altera公司的Stratix GX器件族内部集成的SERDES单通道支持500Mbit/s到3.1875Gbit/s数据传输速率。在雷达控制端将指令、各种定时信号通过SERDES的编码器、串行器、发送器以及时钟产生电路完成发送,经过光传输网络后到达DTRU,通过SERDES接口的解码器、解串器、接收器以及时钟恢复电路组成实现指令与定时的接收,同时,DTRU的AD采样数据通过SERDES的编码器、串行器、发送器以及时钟产生电路完成发送,经过光传输网络后到达数字波束形成,通过SERDES接口的解码器、解串器、接收器以及时钟恢复电路完成数据接收。

虽然SERDES接口按照高速串行通信标准制订了严格的性能指标,包括抖动产生、抖动容限、抖动转移以及系统误码率等,这在一定程度上确保系统的可靠性和互用性,但在雷达系统应用中,定时信号经过编码变换后会出现传输延时不确定等问题,难以满足雷达系统的同步相参要求。

分析表明,信号在传输过程中受到半导体器件和传输介质光纤的影响,一定会产生信号抖动和传输延时。这些抖动和延迟来自传输链路上的各个环节,主要包括以下三个方面:

1)绝对延时:绝对延时来源于物理层,如光纤光缆、光功分放大等,由于光纤网络采用了全光网络,所以延时是相对固定的,在设计中只要保证光纤链路的长度是一致的,就可以保持信号的物理同步;

2)随机抖动:随机抖动主要来源于光电器件的热噪声等;系统中主要是光收发模块,选用好的抖动量小的光收发模块可减少随机抖动;

3)系统抖动:系统抖动是影响传输精度的主要原因。通过试验,信号的系统抖动主要来自于信号在进行编码、串行和解串过程中不同时钟域之间的多次传递,这些时钟相位的随机性和不相参性造成了信号在不同对象的传输时间的不确定性。为实现信号的高精度同步必须保证两点:一是采用同源基准,即在雷达控制、DTRU和数字波束形成之间采用统一基准时钟以避免非同步采样引入的抖动;二是对所有的时钟进行相参处理,在发送端通过鉴相处理保证发送时钟相位的稳定,在接收端通过自适应时钟相位匹配处理保证接收的绝对同步。

3 光传输系统的测试设计

传统雷达系统中常用的检测技术^[11]和设备已无法满足光传输系统的测试维护需要,而巨型数字阵列规模宏大,光电设备和光网络设备量多,工程化难度大。所以,测试技术和测试设备也是整个光传输系统设计中的重要环节,通过系统技术和专业测试设备,可对光传输系统中的每个传输环节,如光电转换、传输协议、光缆系统的指标进行验证,并测试和验证诸如稳定性、一致性、同步性、可靠性等间接影响系统性能的指标,查找和分析各种问题,对系统故障进行检测和定位。

设计中采用了高集成度的多路光信号检测系统,该系统主要包括有光开关、光功率计、光源等模块,具备光功率光波长测试、光源信号产生、光通道切换等多种功能,不仅可以实现光设备的常规检测,还可通过RS-232接口与计算机和数字示波器方便地组建测试系统,对整个光传输链路进行性能测试、故障检测和快速定位。

系统设计采用了时分复用技术实现DTRU的BITE检测,即各个数字单元根据地址在不同的时刻发送BITE数据。但当某个DTRU在不属于自己的时间段发送时(如光器件损坏长发光),就会与其他数字单元的发光信号发生冲突,这样就会影响到整个测试链路,这个DTRU通常称之为“流氓节点”^[13]。这时候可以采用功率检测法实现检测:正常工作状态下,由于每个时刻前置光放大器接收的是某个特定的已知数字单

元的光信号,其功率大小相对固定在某个范围内,如果出现了流氓单元,那么每个时刻收到的光信号强度就会增加一倍,这时可通过轮询法,对每个数字单元进行询问,询问正常单元时,是大功率信号(正常单元+流氓单元),询问到流氓单元时,由于其他单元都已关闭,只有流氓单元有光信号,此时收到的是较小的光信号,可以通过功率检测法定位到故障单元。

4 结束语

随着对数字阵列雷达研究的逐步深入和光通信技术发展的日趋成熟,光传输系统在相控阵雷达的应用已进入实用化和工程化。文中分析了巨型数字阵列的信号特点和传输需求,详细设计了光传输系统,对系统架构、传输协议和系统测试等关键技术进行了具体分析,提出了解决方案并在工程实践中得到了初步验证。文中对数字阵列光传输系统的设计既有较高的理论指导意义,又有实际借鉴作用。

参考文献:

- [1] 郑清. 光纤传输技术在雷达系统中的应用[J]. 光通信技术, 2006, 30(4): 54-56.
- [2] 龙伟军, 王 晔, 王查散. 光纤传输在数字阵雷达中的应用[J]. 现代雷达, 2008, 30(10): 57-60.
- [3] 吴曼青. 数字阵列雷达及其进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006, 1(1): 11-16.
- [4] Akiba S, Yamamoto S. WDM undersea cable network technology for 100GB/s and beyond[J]. Opt. Fiber Technol., 1998(4): 21-25.
- [5] Suzuki K, Nakazawa M. Recent progress in optical soliton communication[J]. Opt. Fiber Technol., 1995(1): 289-291.
- [6] 王 桢, 王廷尧. 万兆以太网技术讲座-(二): 物理层[J]. 光通信技术, 2003, 27(7): 52-54.
- [7] 陈弘达, 左 超. 甚短距离光传输技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 周 桃, 宗竹林, 赵 磊. 一种PON结构航电总线协议的建模与仿真[J]. 计算机工程及应用, 2011, 47(29): 60-63.
- [9] Langrock C, Kumar S, McGeehan J. All-optical signal processing using χ^2 nonlinearities in guided-wave devices[J]. Lightwave Technology, 2006(7): 24-25.
- [10] 杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [11] 赵同刚, 任建华, 崔岩松, 等. 通信光电子器件与系统的测量与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] 曹跃胜, 胡 军, 刘焯铭. 高速SERDES的多板传输技术与SI仿真[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(8): 139-143.
- [13] 张 勇, 徐永国, 李广成. GPON系统中长发光流氓ONU检测的解决方案[J]. 光通信研究, 2011(1): 19-21.

巨型数字阵列光传输系统设计

作者：[王查散](#)，[王东岳](#)，[高文辉](#)，[WANG Cha-san](#)，[WANG Dong-yue](#)，[GAO Wen-hui](#)

作者单位：[南京电子技术研究所](#), [江苏 南京](#), [210039](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

ISTIC

年，卷(期)：2013(8)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201308062.aspx